

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA. GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA
E ENERGIA



CENÁRIOS SÍSMICOS EM PONTA DELGADA

Liliana João Pereira de Matos Maia

DOUTORAMENTO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E DA GEOINFORMAÇÃO

(Especialidade em Geofísica)

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA
E ENERGIA



CENÁRIOS SÍSMICOS EM PONTA DELGADA

Liliana João Pereira de Matos Maia

DOUTORAMENTO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E DA
GEOINFORMAÇÃO

(Especialidade em Geofísica)

Tese de doutoramento orientada pela Prof^ª. Doutora Maria Paula
Pompeu de Miranda Rodrigues de Teves Costa

2011

Agradecimentos

Em primeiro de tudo um agradecimento muito especial ao meu Pai, que sempre me incentivou e motivou a ir mais além, e que infelizmente perdi a meio desta jornada e a quem presto aqui homenagem.

Em segundo, gostaria de agradecer a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta tese, e de um modo especial:

- os meus sinceros agradecimentos à minha orientadora de tese, Prof^a. Doutora Maria Paula P. Teves Costa pelo seu apoio e orientação incondicional e também pela sua amizade durante todo este tempo;

- ao Prof. Doutor Luís Matias e à Prof^a. Doutora Cristina Catita da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa pela sua paciência e ajuda nalgumas questões relacionadas com o trabalho;

- à Dr. Ana Gomes e Prof^a. Doutora Gabriela Queiroz da Universidade dos Açores pela disponibilidade, esclarecimentos e cedência de dados sobre a geologia de Ponta Delgada;

- a Phiplipe Guéguen e Pierre Yves Bard do Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique – Universidade Joseph Fourier em Grenoble, França, que me acolheram durante o estágio de formação complementar;

-à Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos, Instituto Nacional de Estatística, Instituto de Meteorologia e ao Laboratório Regional de Engenharia Civil pela cedência de dados sem os quais este trabalho não teria sido possível;

- ao Instituto Geofísico do Infante D. Luís, na pessoa do Prof. Doutor Miguel Miranda pelo apoio logístico nos trabalhos de campo;

- a toda a minha família e amigos pelo tempo que lhes foi roubado em prol da tese;

-à Fundação para a Ciência e a Tecnologia da qual fui bolseira de doutoramento (SFRH/BD/23759/2005) e por ter financiado o projecto, onde este trabalho se inseriu parcialmente: COMICO – Contribuição para a Minimização do Risco Sísmico nas Cidades de Ponta Delgada, Angra do Heroísmo e Horta - POCI/CTE-GIN/ 57759/ 2004, também co-financiado pelo FEDER.

Resumo

A cidade de Ponta Delgada, capital do Arquipélago dos Açores, localiza-se na ilha de S. Miguel e, apesar de não ser a aglomeração que mais tem sofrido a acção de sismos, a sua importância socio-económica é indiscutível, pelo que merece um estudo de perigosidade e risco sísmico adequado.

Com o objectivo de estimar este risco decidiu-se realizar um estudo conducente à elaboração de cenários de risco expressos em termos de danos no edificado. Para tal foi necessário realizar previamente um conjunto de tarefas com o objectivo de definir os parâmetros fundamentais para a elaboração dos cenários de danos: análise da sismicidade e avaliação da perigosidade sísmica; caracterização geológica e geotécnica dos terrenos e quantificação da sua resposta sísmica; e estimativa da vulnerabilidade sísmica do edificado. No estudo da perigosidade sísmica utilizou-se uma abordagem probabilista, o que permitiu obter valores de referência de aceleração de pico e de aceleração espectral para a cidade de Ponta Delgada. A caracterização dos terrenos superficiais e a sua classificação de acordo com o EC8, foi realizada a partir da análise da geologia superficial e de perfis geológicos interpretativos recorrendo, também, à utilização de medidas de vibrações ambientais e a modelação teórica unidimensional. A estimativa da vulnerabilidade sísmica foi conseguida através de uma análise global dos principais parâmetros estruturais do edificado. A interpretação dos dados disponibilizados pelo INE e pela SRHE bem com a elaboração de um inquérito específico permitiu identificar as diferentes tipologias, classificar e agrupar os diversos edifícios.

Por último foram seleccionados dois sismos de cenário, de acordo com a sismicidade passada e tomando em consideração o potencial sismogénico da região, foram elaborados os cenários de danos que permitiram a identificação das zonas mais vulneráveis que deverão merecer uma maior atenção nas acções de prevenção, nos planos de emergência e na gestão do risco sísmico.

Palavras-chave: Ponta Delgada; Cenários de Danos; Perigosidade Sísmica; Vulnerabilidade Sísmica.

Abstract

Ponta Delgada, the main city of the Azores Archipelago, situated in S. Miguel island, has suffered a moderate seismic activity up to our days. Because of its social and economic importance deserves an adjusted hazard and seismic risk evaluation.

With the goal to quantify the seismic risk, a study was developed in Ponta Delgada for the elaboration of risk scenarios expressed in terms of building stock damage. For this it was necessary to carry out a set of previous studies with the purpose to define the fundamental parameters for the elaboration of the damages scenarios: seismicity analysis and seismic hazard evaluation; geological and geotechnical characterization of the soil profiles and quantification of their seismic response; and seismic building stock vulnerability estimation. The seismic hazard study developed in this work used a probabilistic approach that allowed the definition of reference peak ground acceleration and spectral acceleration values for Ponta Delgada city. Soil characterization was carried out based on surface geology and geotechnical available information and using also ambient vibrations measurements. Soil profiles were classified, according EC8, using also 1D mathematical modeling. The estimation of the building stock vulnerability was obtained from global analyses of the main structural building parameters. Through the interpretation of INE and SRHE data and of a specific questionnaire, it was possible to identify and classify different buildings typologies, and perform building zoning.

At the end, in accordance with past seismicity and taking in consideration the seismic potential of the region two seismic scenarios were selected and damages scenarios had been elaborated which allowed the identification of more vulnerable areas that deserve special attention in prevention actions, emergency plans and seismic risk managements.

Keys-word: Ponta Delgada; Damaged Scenarios; Seismic Hazard; Seismic Vulnerability.

Índice

Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Símbolos.....	xv
Lista de Abreviaturas.....	xvii
Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Objectivos.....	1
1.2 Organização da Dissertação.....	4
Capítulo 2: Metodologia.....	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Metodologias para o Cálculo da Perigosidade.....	8
2.2.1 Análise Determinista.....	8
2.2.2 Análise Probabilista.....	9
2.2.3 Leis de Atenuação.....	14
2.3 Efeitos de Sítio.....	16
2.3.1 Zonamento Geotécnico.....	17
2.3.2 Análise Unidimensional da Resposta do Terreno.....	19
2.4 Metodologias para o Cálculo de Vulnerabilidades.....	22
2.4.1 Método Risk-UE.....	24
2.4.1.1 Nível I.....	25
2.4.2 Método Vulneralp.....	29
Capítulo 3: Estimativa da Perigosidade Sísmica.....	33
3.1 Introdução.....	33
3.2 Enquadramento Sismotectónico da Região.....	34

3.2.1	Ilha de S. Miguel.....	35
3.3	Sismicidade em S. Miguel.....	36
3.3.1	Sismicidade Histórica.....	37
3.3.2	Sismicidade Instrumental.....	40
3.4	Catálogo Sísmico Regional	42
3.4.1	Catálogo SIVISA.....	43
3.4.2	Catálogo CSRA.....	47
3.4.3	Catálogo de Trabalho.....	51
3.5	Zonas de Geração	53
3.6	Resultados.....	56
3.6.1	Aceleração de Pico (PGA).....	59
3.6.2	Aceleração Espectral (SA).....	61
 Capítulo 4: Caracterização dos Terrenos.....		65
4.1	Introdução.....	65
4.2	Caracterização Geológica e Geotécnica	66
4.3	Registos de Vibrações Ambientais.....	71
4.3.1	Aquisição.....	71
4.3.2	Análise	72
4.4	Análise Unidimensional da Resposta dos Terrenos.....	75
4.4.1	Movimentos de <i>Input</i>	75
4.4.2	Colunas de Terreno.....	76
4.5	Discussão dos Resultados.....	83
 Capítulo 5: Vulnerabilidade Sísmica do Edificado		87
5.1	Introdução.....	87
5.2	Caracterização do Edificado.....	88
5.2.1	Frequências Próprias.....	90
5.2.2	Classificação do Edificado.....	92

5.2.3 Zonamento.....	96
5.3 Curvas de Vulnerabilidade Sísmica.....	99
5.3.1 Método Risk-UE.....	99
5.3.2 Método Vulneralp.....	104
5.3.3 Comparação dos Resultados Obtidos pelos dois Métodos.....	106
5.4 Curvas de Fragilidade.....	108
Capítulo 6: Cenários de Danos	113
6.1 Introdução.....	113
6.2 Sismos de Cenário.....	113
6.3 Estimativa dos Cenários de Danos Cenários	115
6.3.1 Cenário Sísmico 1.....	117
6.3.2 Cenário Sísmico 2.....	120
Capítulo 7: Conclusões.....	125
7.1 Discussão dos resultados.....	125
7.2 Considerações finais.....	128
Referências Bibliográficas.....	131
Anexo A.....	145
Anexo B.....	149
Anexo C.....	171

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Períodos de retorno.....	14
Tabela 2.2: Diferentes metodologias em função da escala de aplicabilidade e dos recursos possíveis (adaptado de <i>Combescure et al., 2005</i>).....	23
Tabela 2.3: Tipologias Risk-UE com os respectivos índices de vulnerabilidade.....	25
Tabela 2.4: Factores que afectam a vulnerabilidade em edifícios de alvenaria (Risk-UE, 2004).....	27
Tabela 2.5: Factores que afectam a vulnerabilidade em edifícios de betão (Risk-UE, 2004).....	28
Tabela 2.6: Peso e índices de vulnerabilidade de cada parâmetro estrutural para o método Vulneralp.....	30
Tabela 3.1: Principais sismos históricos, de origem tectónica, que afectaram a ilha de S. Miguel...38	
Tabela 3.2: Principais sismos históricos, de origem vulcânica (crises sísmicas), que afectaram a Ilha de São Miguel.....	40
Tabela 3.3: Resultados do processo de remoção de réplicas e precursoros no catálogo SIVISA.....	46
Tabela 3.4: Magnitudes mínimas a partir da qual temos uma distribuição de Poisson no catálogo CSRA.....	51
Tabela 3.5: Magnitudes máximas consideradas em cada zona.....	54
Tabela 3.6: Parâmetros de cada zona de geração.....	56
Tabela 3.7: Valores de PGA (cm/s^2) em Ponta Delgada para rocha pela lei de Ambraseys et al. (1996)	59
Tabela 3.8: Valores de PGA (cm/s^2) em Ponta Delgada para rocha pela lei de Boore et al. (1997, 2005)	60
Tabela 3.9: Valores de PGA (cm/s^2) para terreno duro em Ponta Delgada pela lei de Ambraseys et al. (1996)	60
Tabela 3.10: Valores de PGA (cm/s^2) para terreno duro em Ponta Delgada pela lei de Boore et al. (1997, 2005).....	61
Tabela 4.1: Exemplo perfil geológico interpretativo - Perfil 2.....	69
Tabela 4.2: Coluna de terreno sugerida para Ponta Delgada (<i>adaptado de Malheiro & Nunes, 2007</i>).....	70
Tabela 4.3: Classificação geotécnica dos terrenos no Arquipélago dos Açores (Forjaz <i>et. al.</i> , 2001).....	71
Tabela 4.4: Características das fontes escolhidas para os movimentos de <i>input</i>	76
Tabela 4.5: Características dos materiais encontrados em Ponta Delgada	77
Tabela 4.6: Coluna de terreno tipo 1.....	79
Tabela 4.7: Coluna de terreno tipo 2.....	80

Tabela 4.8: Coluna de terreno tipo 3.....	81
Tabela 4.9: Coluna de terreno tipo 4.....	80
Tabela 4.10: Perfil 3 (Anexo Nacional do EC8, 2010).....	85
Tabela 5.1: Materiais de construção dos edifícios em cada zona (tipologia).....	98
Tabela 5.2: Número de pisos dos edifícios em cada zona.....	98
Tabela 5.3: Datas de construção dos edifícios em cada zona.....	98
Tabela 5.4: Índices de vulnerabilidade para os edifícios em estudo em função da sua tipologia....	100
Tabela 5.5: Factores que afectam a vulnerabilidade e respectivos índices (V_m).....	101
Tabela 5.6: Peso e índices de vulnerabilidade para as diferentes datas de construção (método Vulneralp).....	105
Tabela A.1: Tipos de terreno segundo a classificação do (EC8, 2001)	145
Tabela A.2: Terrenos dos Açores. Perfil 1 (Anexo Nacional do EC8, 2010)	146
Tabela A.3: Terrenos dos Açores. Perfil 2 (Anexo Nacional do EC8, 2010)	146
Tabela A.4: Perfil 3 (Anexo Nacional do EC8, 2010)	146
Tabela A.5: Terrenos dos Açores. Perfil 4 (Anexo Nacional do EC8, 2010)	147
Tabela A.6: Terrenos dos Açores. Perfil 5 (Anexo Nacional do EC8, 2010)	147
Tabela A.7: Velocidades médias de propagação das ondas de corte nos perfis estratigráficos tipo considerados para os terrenos dos Açores (Anexo Nacional do EC8, 2010)	148
Tabela A.8: Correspondência, para efeito de definição da configuração do espectro de resposta, entre os perfis estratigráficos dos Açores e os tipos de terrenos da tabela A.1.....	148

Lista de Figuras

Figura 1.1: Localização da cidade de Ponta Delgada e dos vulcões da ilha de S. Miguel.....	2
Figura 1.2: Esquema do trabalho desenvolvido para o estudo do risco sísmico da cidade de Ponta Delgada	3
Figura 2.1: (a) Curva de histerese: determinação do módulo de corte secante G_{sec} e módulo de corte tangente G_{tan} ; (b) curva de redução do módulo (<i>adaptado de Kramer, 1996</i>).....	21
Figura 3.1: Enquadramento tectónico do Arquipélago dos Açores. CMA- Crista Média Atlântica; FG- Falha da Glória. (<i>adaptado de Lourenço et al., 1998</i>).....	34
Figura 3.2: Unidades geomorfológicas da ilha de S. Miguel. A – Vulcão das Sete Cidades. B – Região dos Picos. C – Vulcão do Fogo. D – Planalto da Achada das Furnas. E – Vulcão das Furnas. F – Vulcão da Povoação. G – Região do Nordeste e da Tronqueira. H – Planalto Setentrional. (<i>Adaptado de Zbyszewsky, 1961</i>).....	35
Figura 3.3: Batimetria ao largo de S. Miguel. BJC- Banco D. João de Castro. FHS- Fossa de Hironelle Sul. BM -Banco do Mónaco. BGN- Banco Grande Norte. FP- Fossa da Povoação. ● - Ponta Delgada. (<i>Adaptado de Lourenço, et al., 1998</i>).....	36
Figura 3.4: Sismicidade histórica de origem tectónica (<i>adaptado de CVARG, 2011</i>).....	37
Figura 3.5: Erupções históricas (<i>adaptado de CVARG, 2011</i>).....	39
Figura 3.6: Catálogo sísmico do SIVISA restringido à área em estudo. (a) Antes da remoção de réplicas e precursoros. (b) Depois da remoção de réplicas e precursoros.....	45
Figura 3.7: Número acumulado de eventos para o catálogo SIVISA antes (a tracejado) e depois (a preto) da remoção de réplicas e precursoros.....	46
Figura 3.8: Catálogo sísmico CSRA restringido à área em estudo. (a) Antes da remoção de réplicas e precursoros. (b) Depois da remoção de réplicas e precursoros.....	48
Figura 3.9: Número acumulado de eventos para o catálogo CSRA antes (tracejado) e depois (preto) da remoção de réplicas e precursoros.....	49
Figura 3.10: Número acumulado de eventos para o catálogo CSRA representado para os períodos de 1930 a 1999, 1930 a 1989, de 1963 a 1989 e, de 1989 a 1999.....	50
Figura 3.11: Gráficos do catálogo de trabalho; (a) Número acumulado de sismos em função do tempo; (b) número acumulado de sismos em função da magnitude (quadrados) com a respectiva magnitude de completude, M_c . Os triângulos representam o número de sismos em função da magnitude.....	52
Figura 3.12: Curvas do número acumulado de sismos em função da magnitude do catálogo de trabalho com a respectiva magnitude de completude, M_c para os períodos entre 1963 a 1989 e entre 1989 a 2008/3 (quadrados). Número de sismos em função da magnitude (triângulos).....	52
Figura 3.13: Distribuição da sismicidade do catálogo de trabalho com as respectivas zonas de selecção (traço preto) e de geração (traço tracejado). ● Ponta Delgada.....	54
Figura 3.14: Número de sismos acumulado anualmente em função da magnitude para dois períodos	

distintos do catálogo (a ponteadado) e respectivas curvas de G-R (a cheio)	55
Figura 3.15: Aceleração espectral (SA) em rocha, calculada para Ponta Delgada usando o efeito integrado de todas as zonas de geração. Lei de Ambraseys et al. (1996) a cheio; lei de Boore et al. (1997, 2005) a ponteadado.....	62
Figura 3.16: Aceleração espectral (SA) em terreno duro, calculada para Ponta Delgada usando o efeito integrado de todas as zonas de geração. Lei de Ambraseys et al. (1996) a cheio; lei de Boore et al. (1997, 2005) a ponteadado.....	62
Figura 3.17: Comparação da resposta de aceleração obtida para Ponta Delgada com os espectros de resposta recomendados pelo Anexo Nacional do EC8.....	63
Figura 4.1: Carta da geologia superficial de Ponta Delgada (1: 10 000). O traço a vermelho é o limite da zona onde foi realizada a cartografia geológica (de Queiroz <i>et al.</i> , 2007).....	67
Figura 4.2: Localização dos perfis geológicos interpretativos e das sondagens geotécnicas (apresentados sobre a cartografia da litologia).....	68
Figura 4.3: Exemplo de uma curva H/V	73
Figura 4.4: Localização dos pontos de registo de vibrações ambientais, com os valores das frequências de pico, sobre a cartografia da litologia.....	74
Figura 4.5: Curvas H/V obtidas nos pontos 84, 188 e 189 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.....	79
Figura 4.6: Curvas H/V obtidas nos pontos 85, 108, 190 e 194 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.....	80
Figura 4.7: Curvas H/V obtidas nos pontos 177, 178 e 191 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.....	81
Figura 4.8: Curvas H/V obtidas nos pontos 118, 117, 115 e 122 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.....	82
Figura 4.9: Curvas H/V obtidas nos pontos 21, 22, 23, 25, 26 e 18.....	83
Figura 4.10: Zonamento dos terrenos para Ponta Delgada segundo a classificação expressa no EC8, Anexo Nacional.....	84
Figura 5.1: Edifícios da zona urbana de Ponta Delgada.....	88
Figura 5.2: Edifícios construídos na zona urbana de Ponta Delgada durante o século XX, (dados de Censos, 2001).....	89
Figura 5.3: Tipologia dos edifícios da zona urbana de Ponta Delgada (dados de Censos 2001).....	90
Figura 5.4: Frequência natural (longitudinal e transversal) dos edifícios de Ponta Delgada em função do número de pisos para as tipologias de betão e de alvenaria.....	91
Figura 5.5: Resultados do inquérito feito à população para o estudo da vulnerabilidade sísmica do edificado da cidade de Ponta Delgada.....	94
Figura 5.6: Classificação do edificado em Ponta Delgada. Edifícios de: A- alvenaria de 1 a 2 pisos; B- alvenaria de 2 a 3 pisos; C- betão com enchimento de alvenaria com 2 pisos; D- betão com 4 ou mais pisos. E- Edifícios históricos.....	96

Figura 5.7: Edifícios do centro urbano de Ponta Delgada. ● Zona 1- edifícios de alvenaria com 2 a 3 pisos; ● Zona 2- edifícios de alvenaria com 1 a 2 pisos; ● Zona 3 - edifícios de betão com 4 ou mais pisos; ● Zona 4 - edifícios de betão com 2 pisos.....	97
Figura 5.8: Curvas de “vulnerabilidade” sísmica média para as diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada, calculadas pelo método Risk-UE.....	102
Figura 5.9: Curvas de vulnerabilidade sísmica para cada tipologia (betão, alvenaria e alvenaria de pedra) nas diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada calculadas pelo método Risk-UE.....	103
Figura 5.10: Curvas de “vulnerabilidade” sísmica média para as diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada, calculadas pelo método Vulneralp.....	105
Figura 5.11: Curvas de vulnerabilidade sísmica para as tipologias de alvenaria e de betão das diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada calculadas pelo método Vulneralp.....	106
Figura 5.12: Diferença entre o grau de danos médio determinado pelos métodos Vulneralp e Risk-UE ($\mu_{DVulneralp} - \mu_{DRisk-UE}$), para diferentes intensidades e para as tipologias de betão e alvenaria da cidade de Ponta Delgada.....	107
Figura 5.13: Curvas de fragilidade para as diferentes tipologias (método Risk-UE).....	108
Figura 5.14: Probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos para uma intensidade sísmica de VIII _{EMS-98} para as três tipologias em estudo (método Risk-UE).....	109
Figura 5.15: Curvas de fragilidade para as diferentes tipologias (método Vulneralp).....	110
Figura 5.16: Probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos para uma intensidade sísmica de VIII EMS-98 para as duas tipologias em estudo (método Vulneralp).....	111
Figura 6.1: Carta de densidade do edificado. Número de edifícios por hectare em cada subsecção estatística.....	116
Figura 6.2: Cenário sísmico 1. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 3. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.....	118
Figura 6.3: Cenário sísmico 1. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 4. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.....	119
Figura 6.4: Cenário sísmico 2. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 3. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp	121
Figura 6.5: Cenário sísmico 2. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 4. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.....	122
Figura B.1: Localização dos pontos de registo de vibrações ambientais, com a respectiva numeração, sobre a cartografia das diferentes litologias.....	149
Figura B.2: Curva H/V para os diferentes pontos de registo de vibrações ambientais.....	150

Lista de Símbolos

A_0	Amplitude do pico da curva H/V
a, b	Parâmetros da lei de Gutenberg & Richter
C_u	Resistência ao corte não drenada do terreno
D_K	Grau de danos
E	Energia
f_0	Frequência natural do terreno
f_{teo}	Frequência teórica
f_{obs}	Frequência observada
F_{ij}	Função transferência
G	Módulo de corte
$G_{máx}$	Módulo de corte máximo
G_{sec}	Módulo de corte secante
G_{tan}	Módulo de corte tangente
I	Intensidade macrossísmica
IV	Índice de vulnerabilidade
IV^*	Índice médio da vulnerabilidade
\overline{IV}	Índice da vulnerabilidade total
M, m	Magnitude
m_0	Valor mínimo da magnitude
$m_{máx}$	Valor máximo da magnitude
M_c	Magnitude de completude
M_L	Magnitude local
M_S	Magnitude das ondas S
M_W	Magnitude de momento
P	Probabilidade
r	Distância do sítio à fonte
t	Período de tempo
T	Período de vibração
Tr	Período de retorno

u	Deslocamento
V_m	Factor que pode alterar a vulnerabilidade
V_S	Velocidade das ondas S
V_{S30}	“Velocidade média” das ondas S nos 30 m superficiais
W	Peso
Y	Parâmetro de movimento do terreno
α, β	Parâmetros da lei de Gutenberg e Richter
Γ	Função gama
γ	Deformação
γ_c	Amplitude de deformação de corte
ε	Parâmetro que define o intervalo de confiança desejado
ξ	Amortecimento
λ	Taxa média anual de ocorrência de sismos
λ_m	Frequência anual de sismos com uma magnitude igual ou superior a m
μ_D	Grau de danos médio
σ_{\log}	Desvio padrão da distribuição log-normal
τ	Tensão
τ_c	Amplitude da tensão de corte
χ^2	Qui- quadrado

Abreviaturas

CIVISA	Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores
CSRA	Catálogo Sísmico da Região dos Açores
C_u	Coesão não drenada
CVARG	Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos
EC8	Eurocódigo 8
EMS-98	European Macroseismic Scale
FCT	Fundação para a Ciência e a Tecnologia
FDC	Função Densidade de Probabilidade Cumulativa
FDP	Função Densidade de Probabilidade
gdl	graus de liberdade
G-R	Gutenberg & Richter
IM	Instituto de Meteorologia
INE	Instituto Nacional de Estatística
LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
MM-58	Escala de Mercalli Modificada
N_{SPT}	Número de pancadas do ensaio de penetração dinâmica
PGA	Peak Ground Acceleration (aceleração de pico)
PGV	Peak Ground Velocity (velocidade de pico)
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis (análise probabilista da perigosidade sísmica)
PDHA	Deterministic Seismic Hazard Analysis (análise determinista da perigosidade sísmica)
RSA	Regulamento de Segurança e Acções para estruturas de edifícios e pontes
SA	Spectral Acceleration (aceleração de pico)
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SIVISA	Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores
SRHE	Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos
SV	Spectral Velocity (velocidade espectral)
UA	Universidade dos Açores
UG	Unidades Geotécnicas

Capítulo 1: Introdução

1.1. Enquadramento e Objectivos

O Arquipélago dos Açores, localizado perto da junção tripla dos Açores onde se encontram as Placas Norte Americana, Eurasiática e Africana, é caracterizado por uma intensa actividade sísmica e vulcânica que se manifesta pela ocorrência de alguns sismos fortes e de várias crises sísmicas. Desde o séc. XV fizeram-se sentir sismos destruidores que produziram elevados danos humanos e materiais. A ocorrência recente de sismos destruidores, em 1980 e 1998, puseram em evidência a vulnerabilidade sísmica desta região, tanto em termos estruturais, como económicos e sociais.

Ponta Delgada, capital do arquipélago, localiza-se na costa sul da ilha de S. Miguel (figura 1.1) e, apesar de não ser a aglomeração que mais tem sofrido a acção de sismos, a sua importância política, económica e social é indiscutível, pelo que merece um estudo de perigosidade e risco sísmico adequado. De acordo com os Censos 2001, residem cerca de 240000 pessoas no Arquipélago dos Açores, encontrando-se mais de metade da população na ilha de S. Miguel. Esta ilha é a maior do arquipélago, com um comprimento máximo de 65 km e uma largura de cerca de 16 km, ocupando uma área aproximada de 746 km². Ponta Delgada, que abrange uma área de cerca de 10 km², é a cidade do arquipélago com maior número de habitantes, cerca de 20000 (Censos, 2001).

Ter um bom conhecimento das características e da vulnerabilidade dos edifícios da cidade, bem como um bom conhecimento do terreno onde estes estão construídos, permitirá aos governantes e pessoal competente preparar a cidade e a

sua população para enfrentar um sismo futuro que possa causar danos ao sistema urbano. Desta forma, o desenvolvimento de cenários sísmicos para a cidade de Ponta Delgada pode contribuir, de uma forma muito importante, para a preparação da prevenção e definição das acções a implementar para minimizar os efeitos de um sismo futuro.

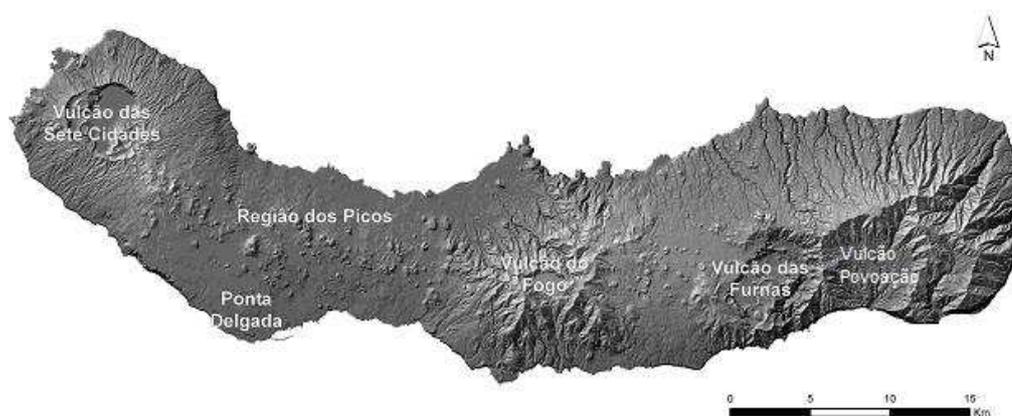


Figura 1.1: Localização da cidade de Ponta Delgada e dos vulcões da ilha de S. Miguel.

Com o objectivo de contribuir para a minimização de danos nas cidades de Ponta Delgada, Horta e Angra do Heroísmo, na ocorrência de sismos futuros, foi desenvolvido o projecto de investigação COMICO – Contribuição para a Minimização do Risco Sísmico nas Cidades de Ponta Delgada, Angra do Heroísmo e Horta - POCI/ CTE-GIN/ 57759/ 2004, financiado pela FCT e co-financiado pelo FEDER.

No âmbito deste projecto desenvolveu-se o trabalho apresentado nesta dissertação, o qual consistiu na realização de um conjunto de estudos, que se apresentam esquematizados na figura 1.2. Estes estudos permitiram a elaboração de cenários de danos, tomando em consideração o comportamento dos terrenos e do edificado.

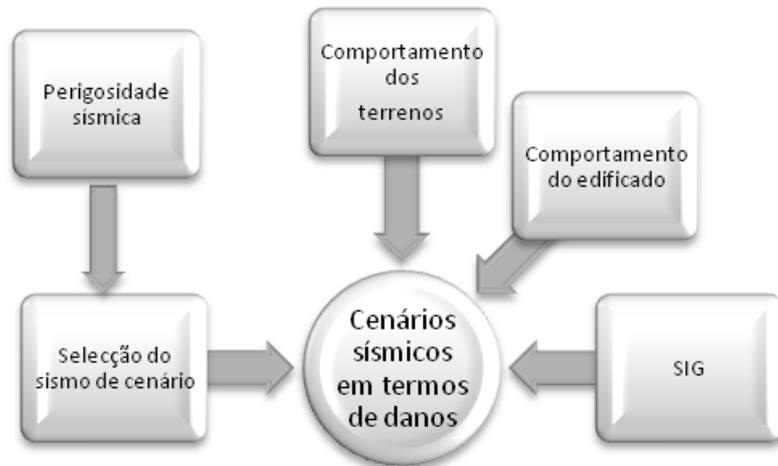


Figura 1.2: Esquema do trabalho desenvolvido para o estudo do risco sísmico da cidade de Ponta Delgada.

A um nível mais específico de objectivos do trabalho, foi necessário desenvolver as seguintes tarefas:

- Análise da sismicidade histórica e instrumental da região, o que permitiu identificar as zonas sismogénicas mais importantes e realizar uma avaliação probabilista da perigosidade sísmica.
- Estudo do comportamento do terreno através da análise de medidas de vibrações ambientais e de modelação matemática da sua resposta sísmica que, juntamente com o estudo da geologia superficial e da análise de sondagens geotécnicas, permitiu a caracterização dos terrenos existentes.
- Classificação do edificado presente na cidade, através da identificação das tipologias e idades dos edifícios, e estimativa da sua vulnerabilidade sísmica.
- Integração de toda a informação, obtida e recolhida, num Sistema de Informação Geográfica (SIG).

-
- Elaboração de cenários sísmicos para a cidade de Ponta Delgada, tomando em consideração as fontes sísmicas mais importantes com potencial para produzirem sismos capazes de afectar a cidade de um modo importante.

1.2. Organização da dissertação

Este trabalho divide-se em sete capítulos que correspondem a cada etapa de um conjunto de estudos necessários para realizar a estimativa de risco sísmico na cidade de Ponta Delgada, através da elaboração de cenários de danos.

A metodologia utilizada para o estudo de cenários sísmicos na cidade de Ponta Delgada é apresentada no Capítulo 2. Nesse capítulo apresenta-se uma metodologia que segue um pouco de perto a desenvolvida no projecto Risk-UE (Risk-UE, 2004) no que respeita aos problemas da estimativa da perigosidade sísmica, dos efeitos de sítio, e da vulnerabilidade sísmica do edificado corrente, assim como outras metodologias utilizadas durante o trabalho como por exemplo em relação à estimativa de H/V e da vulnerabilidade sísmica do edificado corrente.

O capítulo 3 apresenta a avaliação probabilista da perigosidade sísmica para Ponta Delgada. Para tal foi realizada uma análise da tectónica e da sismicidade da região, e foi preparado um catálogo de trabalho a partir da análise dos catálogos sísmicos disponíveis. Foram caracterizadas as zonas de geração sísmica e seleccionaram-se as leis de atenuação a utilizar. Os resultados são apresentados em termos de aceleração de pico (PGA) e de aceleração espectral (SA) para determinadas frequências, de forma a obter valores gerais de referência em rocha e terreno duro para a cidade.

A caracterização geológica e geotécnica dos terrenos e a quantificação da sua resposta face a acções sísmicas foi feita no capítulo 4. Neste capítulo é apresentada a geologia superficial de Ponta Delgada, bem como um estudo das frequências de pico

realizado através da determinação das razões espectrais H/V (Nakamura, 1989), obtidas a partir da análise de vibrações ambientais, permitindo identificar os diferentes tipos de terreno existentes na cidade. A análise 1D da resposta do terreno foi feita para cada coluna-tipo identificada e, por último, efectuou-se o zonamento dos terrenos de Ponta Delgada.

No capítulo 5 apresenta-se o estudo elaborado para avaliar o comportamento sísmico do edificado da zona urbana de Ponta Delgada, começando por identificar e classificar as diferentes tipologias existentes. O zonamento do edificado foi realizado tendo em conta o estudo que foi efectuado através de uma abordagem mais generalizada e não edifício a edifício. As curvas de vulnerabilidade sísmica para cada tipologia são apresentadas usando dois métodos diferentes, Risk-UE (nível I) e Vulneralp. Finalmente apresentam-se as curvas de fragilidade obtidas pela aplicação de ambos os métodos.

Os dois cenários sísmicos para cidade de Ponta Delgada, no capítulo 6, relatam os danos causados no edificado. Foram elaborados tendo em conta a análise da vulnerabilidade sísmica feita no capítulo 5 e por isso são apresentados em termos de intensidade EMS-98, e onde os graus de danos são classificados em cinco níveis desde danos ligeiros (nível 1) até à situação de colapso ou colapso iminente (nível 5).

Finaliza-se esta dissertação com o capítulo 7, onde se expõem as conclusões e as considerações finais do trabalho.

Capítulo 2: Metodologia

2.1 Introdução

A metodologia utilizada para o estudo de cenários sísmicos na cidade de Ponta Delgada segue de perto a metodologia desenvolvida no projecto europeu Risk-UE (Risk-UE, 2004), particularmente o módulo que aborda os problemas da aquisição, recolha, compilação e armazenamento de informação, e estimativa da perigosidade sísmica e o módulo referente à vulnerabilidade sísmica do edificado corrente.

O projecto envolveu um total de 10 organizações científicas e técnicas com o objectivo de desenvolver e aplicar metodologias de forma homogénea para o estudo da perigosidade sísmica, avaliações da vulnerabilidade e do risco em áreas urbanas, tendo sido aplicado/ testado em 7 cidades europeias. Desenvolveu-se um conjunto de metodologias para a criação de cenários sísmicos, concentrando-se nas características particulares das cidades europeias, tomando em consideração edifícios recentes, edifícios históricos e infra-estruturas, bem como a sua organização funcional e social, sempre sem esquecer a sua vulnerabilidade sísmica. Não estão abrangidos no âmbito deste trabalho a análise dos edifícios históricos, das infra-estruturas e equipamentos, motivo pelo qual não serão apresentadas aqui as respectivas metodologias.

É de notar que a metodologia aplicada neste trabalho foi condicionada pela quantidade e qualidade dos dados e das informações de *input* disponíveis como, por exemplo, a definição da geologia superficial, a caracterização dos terrenos, e a caracterização e classificação do edificado, pelo que tiveram de se realizar aproximações e introduzir algumas simplificações.

2.2 Metodologias para o Cálculo da Perigosidade

A análise da perigosidade sísmica num determinado sítio, envolve uma estimativa quantitativa da perigosidade do movimento do terreno nesse mesmo sítio. A perigosidade sísmica pode ser analisada deterministicamente quando é assumido um cenário sísmico particular, ou probabilisticamente quando são consideradas explicitamente as incertezas associadas ao tamanho dos sismos, à localização, e ao período de ocorrência.

2.2.1 Análise Determinista

A análise determinista da perigosidade sísmica (PDHA) envolve o desenvolvimento de um cenário sísmico particular sobre o qual é baseada a perigosidade do movimento do solo. O cenário consiste na ocorrência de um sismo de determinada magnitude gerado numa determinada fonte. Em geral, estas técnicas aplicam-se à determinação da perigosidade sísmica em sítios específicos. São direccionadas para os estudos de segurança de estruturas, em particular de estruturas especiais como centrais térmicas e nucleares, depósitos de gás, barragens, etc. Esta análise da perigosidade sísmica pode ser descrita como um processo de quatro passos (Kramer, 1996):

(1º) Identificar as fontes sísmicas.

(2º) Selecção do parâmetro distância (fonte-sítio) para cada fonte sísmica.

(3º) Selecção do sismo de referência, descrito em termos de tamanho e distância ao local em estudo.

(4º) A perigosidade no local em estudo é definida em termos de um ou mais parâmetros do movimento do solo produzidos no sítio pelo sismo de referência. Estes parâmetros são calculados através da lei de atenuação (ou relação predictiva).

Na metodologia Risk-UE, o ponto mais importante na análise determinista é que seja consistente com a sismicidade histórica da cidade em estudo. Assim o sismo de referência deve ser o maior sismo real que afectou a cidade e é rejeitada a “migração” de epicentros para zonas escolhidas por critérios sismotectónicos (apesar da maioria das localizações epicentrais de sismos históricos ser controversa). Ou seja, a análise determinista considerada válida é uma análise sem zonamento sismogénico.

Neste trabalho o estudo da perigosidade sísmica foi realizado apenas através de uma abordagem probabilística.

2.2.2 Análise Probabilista

A análise probabilista da perigosidade sísmica (PSHA) permite identificar, quantificar e combinar as incertezas associadas ao tamanho, localização, frequência e efeitos dos sismos de uma forma racional de modo a fornecer um cenário o mais completo possível da perigosidade. Para se realizar uma análise deste tipo é necessário efectuar os seguintes passos (Kramer, 1996):

(1º) Identificar as fontes sísmicas.

(2º) Caracterizar a sismicidade em cada uma das fontes, isto é, estabelecer o modelo de ocorrência de sismos.

(3º) Definir ou seleccionar as leis de atenuação.

(4º) Calcular as probabilidades de excedência de um ou mais parâmetros característicos do movimento do terreno no local em estudo.

Na metodologia utilizada são impostos alguns requisitos e objectivos para o estudo probabilista da perigosidade sísmica, ou seja:

- Entende-se que a avaliação probabilística da perigosidade sísmica é uma representação do movimento do solo numa área urbana que descreve a

severidade dos movimentos esperados para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, correspondendo a um período do retorno de 475 anos, em consistência com a maioria das normas anti-sísmicas mais recentes.

- Tal representação deve ser obtida usando uma ferramenta computacional que incorpore e actualize o método clássico de Cornell (1968) para análise probabilista da perigosidade sísmica. Os elementos de *input* para realizar esta análise devem incluir:
 - Um modelo regional de fontes sismogénicas, cujos sismos sejam capazes de afectar a zona urbana de interesse. A actividade sísmica de cada zona deve ser quantificada, em termos de taxa de actividade e magnitude máxima, através da análise de um ou mais catálogos sísmicos adequados e com base nos modelos sismotectónicos disponíveis.
 - Leis de atenuação (i.e., relações predictivas) para o(s) parâmetro(s) do movimento do solo seleccionado(s).
- Os parâmetros do movimento do solo devem ser descritos pela aceleração de pico (PGA) e pela aceleração espectral (SA) vs período de vibração.

Dos modelos probabilistas existentes, o modelo estabelecido inicialmente por Cornell (1968) e desenvolvido posteriormente por McGuire (1976) é dos mais utilizados em todo o mundo. Este método, que se designa habitualmente por método Cornell-McGuire, mantém-se no essencial até aos dias de hoje.

O modelo de Cornell-McGuire é baseado no teorema da probabilidade total, em que a probabilidade de excedência de um parâmetro Y no local em estudo, é a soma das contribuições de todas as N zonas sismogénicas em consideração.

Dado um parâmetro de movimento do terreno Y , a frequência anual λ_{y^*} com que Y ultrapassará um valor específico y^* , é dada pela expressão:

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^N v_i \iint P[Y > y^* | m, r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr \quad (2.1)$$

onde

i , índice correspondente a cada uma das zonas de geração consideradas;

N , número de zonas a considerar;

$v_i = \exp(\alpha_i - \beta_i m_0)$, frequência anual de sismos que ocorrem na zona i com uma magnitude superior ou igual a m_0 (α e β são parâmetros da lei de Gutenberg e Richter, ver mais adiante; equação 2.3);

$f_{M_i}(m)$, função densidade de probabilidade para a ocorrência de um sismo de magnitude m na zona i ;

$f_{R_i}(r)$, função densidade de probabilidade para a ocorrência de um sismo à distância r com origem na zona i ;

$P[Y > y^* | m, r]$, probabilidade de um sismo de magnitude m , à distância r do sítio, gerar no terreno um movimento superior a y^* . Esta probabilidade é calculada a partir da lei de atenuação.

Há já alguns anos que estão disponíveis algumas ferramentas computacionais implementando o método de Cornell-McGuire. Neste trabalho foi utilizado o programa SEISRISKIII (Bender & Perkins, 1987) para a avaliação probabilista da perigosidade sísmica na cidade de Ponta Delgada.

O programa SEISRISKIII efectua o cálculo probabilista decompondo cada região fonte em pequenos elementos, cada um dos quais com uma probabilidade de gerar um sismo normalmente distribuído, com um determinado desvio padrão, permitindo assim que a sismicidade varie suavemente nas fronteiras de cada zona. Para cada elemento, e para cada valor do parâmetro do terreno, são calculadas as

freqüências anuais de ocorrência e acumuladas, obtendo-se no final a função λ_{y^*} para um conjunto discreto de valores do movimento do terreno.

Cada zona é definida por um polígono para o qual é necessário estimar a taxa média anual de excedência da magnitude m , λ_m , ou seja a freqüência anual de sismos com uma magnitude igual ou superior a m . Esta distribuição é dada pela lei de Gutenberg e Richter (Gutenberg & Richter, 1944), G-R, e que tem sido aplicada quase universalmente:

$$\log(\lambda_m) = a - bm \quad (2.2)$$

onde, 10^a é a média anual do número de sismos com magnitude maior ou igual a zero, e b descreve a relação entre o número de sismos de grandes e pequenas magnitudes (*b-value*). A lei de G-R, também pode ser expressa do seguinte modo:

$$\lambda_m = 10^{a-bm} = \exp(\alpha - \beta m) \quad (2.3)$$

onde $\alpha = 2.303 a$ e $\beta = 2.303 b$.

A taxa anual de excedência para cada zona é calculada a partir da sismicidade observada em cada zona. Como a lei de G-R cobre um leque de magnitudes não limitado é necessário truncá-la entre um valor mínimo da magnitude m_0 , e um valor máximo $m_{máx}$ que estará relacionado com as dimensões e a tectónica da zona sismogénica, ou com valores máximos da sismicidade instrumental e histórica observados. Assim a equação (2.3) toma a forma:

$$\lambda_m = v \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{máx} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{máx} - m_0)]} \quad m_0 \leq m \leq m_{máx} \quad (2.4)$$

onde $v = \exp(\alpha - \beta m_0)$.

A distribuição da probabilidade da magnitude para a lei de G-R truncada pode ser expressa em termos da função distribuição cumulativa:

$$F_M(m) = P[M < m/m_0 \leq m \leq m_{m\acute{a}x}] = \frac{1 - \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{m\acute{a}x} - m_0)]} \quad (2.5)$$

ou em termos da função densidade de probabilidade:

$$f_M(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{m\acute{a}x} - m_0)]} \quad (2.6)$$

No método Cornell-McGuire admite-se que a geração de sismos segue uma distribuição de Poisson, ou seja, cada evento sísmico é independente de qualquer outro evento. Deste modo, se λ for a taxa média anual de ocorrência de sismos que fazem exceder o movimento do terreno do valor y então a probabilidade P que este evento ocorra pelo menos uma vez durante o intervalo de tempo t vem dada por:

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{ou} \quad P = 1 - e^{-t/T_R} \quad (2.7)$$

sendo $T_R = \frac{1}{\lambda}$ o período de retorno. Na prática, os resultados da perigosidade sísmica são habitualmente apresentados para diferentes períodos de retorno.

A escolha da probabilidade de excedência P e do período de tempo a considerar, t , deve ser efectuada tendo em conta o tipo de aplicação dos resultados obtidos.

Fixar P e t corresponde a fixar o período de retorno T_R :

$$T_R = -\frac{t}{\ln(1 - P)} \quad (2.8)$$

Na tabela 2.1 estão os vários períodos de retorno que serão considerados neste estudo:

Tabela 2.1: Períodos de retorno

Intervalo de tempo (t) (anos)	Probabilidade de excedência (P)	Período de Retorno (T_R) (anos)
50	10%	475
100	10%	950
200	10%	~1900
400	10%	~3800

Para a construção de edifícios o período de retorno a ter em conta depende da classe de importância dos edifícios a construir. O valor de referência em Portugal para os edifícios correntes (de classe II) é de 10% de probabilidade de excedência para um período de tempo de 50 anos, ou seja, um período de retorno de 475 anos (EC8, 2010).

2.2.3 Leis de atenuação

A estimativa dos parâmetros do movimento do solo produzido por um sismo gerado nas zonas sismogénicas consideradas é feita usando uma lei de atenuação apropriada que relaciona o movimento do solo com a magnitude, a distância fonte-sítio e uma medida de dispersão do modelo. Esta lei de atenuação pode também depender de outros parâmetros como, por exemplo, o tipo de solo ou o tipo de mecanismo na fonte. Habitualmente a lei de atenuação é representada da seguinte forma:

$$\log(Y) = f(m, r, \dots) + \varepsilon \sigma_{\log Y} \quad (2.9)$$

Onde m é a magnitude na fonte, r é a distância do sítio à fonte e $\sigma_{\log Y}$ é o desvio padrão da distribuição log-normal para o parâmetro do movimento do solo Y . O parâmetro ε define o intervalo de confiança desejado.

Estas leis são obtidas de um modo empírico, através da análise de dados instrumentais registados em determinadas regiões e têm sido testadas em diversas regiões do globo. Como resultado verifica-se que a sua aplicação é mais bem

sucedida em zonas/ áreas com condições semelhantes às das regiões onde foram compilados os dados reais através das quais foram derivadas. As leis de atenuação mais utilizadas na Europa são:

- Sabetta & Pugliese (1996), baseada exclusivamente em registos sísmicos italianos num intervalo de distâncias entre 0 a 100 km, com magnitudes M_S ou M_L entre 4.6-6.8. Usa uma classificação simples do terreno e permite uma resposta em velocidade espectral (SV) ($\xi=5\%$, $T=0.04$ s a 4 s), fornecendo também valores de velocidade de pico (PGV) e de aceleração de pico (PGA).
- Boore (Boore *et al.*, 1997, 2005) baseada em registos sísmicos da América do Norte, válida para magnitudes M_w entre 5.2 e 7.4, e distâncias até 118 km. Os efeitos do terreno são descritos como uma função de V_{S30} (“*velocidade média*” das ondas de corte nos 30 m superficiais). Especifica três tipos de mecanismos focais e permite resposta em termos de aceleração de pico (PGA) e de aceleração espectral (SA) ($\xi=5\%$, $T=0.1$ s a 2 s).
- Ambraseys (Ambraseys *et al.*, 1996), baseada em dados europeus, válida para magnitudes M_S entre 4.0 e 7.5, e distâncias até 200 km. Fornece os resultados em aceleração de pico (PGA) e em aceleração espectral (SA) ($\xi=5\%$, $T=0.1$ s a 2 s). Usa uma classificação do terreno de quatro classes, desde rocha até terreno muito brando, quase todas coincidentes com a classificação dos terrenos apresentada no Eurocódigo 8 (EC8, 2010).

De forma a satisfazer os requisitos impostos pela maioria das áreas urbanas envolvidas no projecto Risk-UE, contendo diferentes níveis de sismicidade e de enquadramentos sismotectónicos, esta metodologia sugere a aplicação da lei de Ambraseys (Ambraseys *et al.*, 1996), devido a esta ser baseada em dados europeus, não fazer distinção no tipo de mecanismo da fonte sísmica, usar uma classificação simples do solo e abranger uma vasta gama de distâncias e magnitudes.

2.3 Efeitos de Sítio

A influência das condições do terreno, ou efeitos de sítio, constitui uma parte importante na avaliação da perigosidade e do risco sísmico, especialmente em áreas com depósitos de terreno brando que amplificam bastante o sinal sísmico em determinadas frequências. Existem muitos exemplos de sismos com consequências catastróficas como, por exemplo, os sismos México (1985), Loma Prieta (1989), Kobe (1995) e Christchurch (2011) que nos mostram a importância de considerar os efeitos do terreno em estudos de risco sísmico e de desenvolver consequentes estratégias de mitigação desse mesmo risco.

Há diversos modos e níveis de estimar os efeitos de sítio, quer através da classificação do tipo de terreno (geralmente a classificação regulamentar), quer directamente através da análise de registos sísmicos observados, ou mesmo através da utilização e análise de medidas de vibrações ambientais (determinação da razão espectral H/V).

Na metodologia Risk-UE as avaliações simplificadas da resposta sísmica obtidas através de leis de atenuação são consideradas pouco adequadas em presença de depósitos de terreno brando. De facto a utilização apenas dos dados de geologia representa um nível baixo da investigação, e deverá ser desenvolvido um estudo mais específico, em particular em zonas com maior densidade populacional. Deste modo é recomendado uma avaliação mais pormenorizada, usando um zonamento geotécnico adequado, em função da extensão do cenário a estudar, da qualidade e quantidade dos dados disponíveis e da existência ou não de estudos anteriores. Se houver uma incidência significativa de depósitos brandos na área em estudo deverá também ser levada a cabo uma análise 1D ou 2D da resposta dos terrenos.

2.3.1 Zonamento Geotécnico

A proposta apresentada na metodologia Risk-UE para um bom zonamento geotécnico assume que está disponível um mapa geológico da zona urbana a estudar e propõe que se inicie com uma recolha do maior número possível de informação do subsolo, investigações geofísicas e testes laboratoriais, especialmente furos geotécnicos com profundidades na ordem das dezenas de metros, que cheguem até ao substrato rochoso, isto é, a formações com velocidade das ondas S, V_S , igual ou superior a 800 m/s.

Depois de seleccionado e analisado, o material recolhido deverá ser classificado em unidades geotécnicas (UG) que serão definidas por perfis de terreno consistentes com as características geológicas. Cada UG deverá ser caracterizada por um intervalo de valores representativo de V_S e, adicionalmente, por valores de N_{SPT} e C_u (resultados dos testes de resistência de penetração e de coesão não drenada, respectivamente).

Por fim, devem-se desenhar colunas de terreno representativas, ao longo da área urbana, baseadas na análise de dados de sondagens e de outros dados geofísicos. As colunas de terreno devem descrever as unidades geotécnicas destacando os valores V_S e, se possível, atingir em profundidade o substrato rochoso. Ao longo de cada coluna será calculada a “*velocidade média*” das ondas S nos 30 m superficiais (V_{S30}), que é definida de acordo com a seguinte equação:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^K \frac{h_i}{V_i}} \quad (2.10)$$

onde: h_i = espessura da camada i ; V_i = velocidade da camada i ; o somatório deverá ir até 30 m de profundidade.

Esta “*velocidade média*”, V_{S30} , depende das velocidades e espessuras de cada camada existentes nos primeiros 30 m do solo e permite uma classificação dos solos segundo o EC8 (ver anexo A).

Este nível de pesquisa mais elaborado é considerado “alta tecnologia” e é muito difícil de implementar em locais onde não há disponibilidade ou não se conhecem este tipo de dados sendo necessário recorrer às técnicas mais simplificadas.

O método de análise das razões espectrais H/V foi desenvolvido por Nakamura (1989, 1996, 2000), e permite caracterizar as frequências dominantes das formações superficiais de um modo simples. Este método usa uma técnica experimental simples, rápida e de baixo custo, para avaliar as características dos depósitos superficiais e é de grande utilidade em zonas de baixa sismicidade, sendo frequentemente utilizado em estudos de microzonagem sísmica por todo o mundo. Baseia-se na análise da razão entre os espectros das componentes horizontais e o espectro da componente vertical (designada, simplesmente, por H/V) dos registos de vibrações ambientais. Nakamura define a razão H/V como uma pseudo-função de transferência que caracteriza o comportamento dinâmico da camada superficial do solo.

A principal recomendação em estudos de microzonagem é o mapeamento do período/frequência fundamental dos terrenos para ajudar a constranger os modelos geológicos e geotécnicos. A razão H/V é também muito útil para calibrar a resposta do terreno em locais específicos. Convém realçar que a aplicação desta técnica não é suficiente para caracterizar a complexidade dos efeitos de sítio e, em particular, para estimar o valor absoluto da amplificação sísmica. Embora este método já tenha dado provas de que é bastante útil para a estimativa da frequência dos terrenos, a aquisição e análise dos dados deve ser feita com precaução e seguir as recomendações de Sesame (2004).

2.3.2 Análise Unidimensional da Resposta do Terreno

A avaliação da resposta do terreno é feita sobre um modelo simples do subsolo, devido à complexidade que um modelo mais realista acarreta. Um modelo unidimensional (1D) assume uma homogeneidade horizontal, variando apenas verticalmente, permitindo assim uma análise do contraste de impedância entre as camadas mais superficiais assentes numa base rochosa.

A análise 1D da resposta do terreno consiste em avaliar o comportamento sísmico de uma coluna de terreno, com uma determinada litologia definida desde o substrato rochoso até à superfície. É introduzida então uma excitação sísmica na base, e observa-se o movimento à superfície. O resultado poderá ser expresso em termos da função de transferência da coluna de terreno. Esta análise é feita “idealmente”:

- Usando colunas em número suficiente e que atinjam o substrato rochoso local ou formações com $V_S \geq 800$ m/s. Em particular, se aplicável, associar aos tipos de terreno do EC8.
- Definindo uma malha de pontos para as análises 1D que deverá ter um espaçamento entre 0.5 km a 2.0 km.
- Utilizar, como excitação sísmica, um conjunto de 5 acelerogramas reais registados em rocha e em ambientes tectónicos e distâncias comparáveis à área de estudo.

Em alternativa poderá ser feito um zonamento baseado nos efeitos locais, e nas zonas com comportamentos semelhantes, sendo caracterizadas por uma função de transferência e um factor de amplificação da aceleração de pico. A validação poderá envolver a confirmação dos factores de amplificação espectrais. Recorda-se que a análise 1D da resposta do terreno é justificada na presença de topografia plana e de perfis com camadas horizontais.

O *software* utilizado neste trabalho para a modelação unidimensional do comportamento do solo foi o *software* comercial ProShake (EduPro Civil Systems,

Inc.) que utiliza o mesmo procedimento computacional que a versão original do SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972). Este programa calcula a resposta de uma coluna com várias camadas a um determinado movimento de *input* imposto no substrato rochoso.

A base teórica da análise utilizada no ProShake está descrita em Kramer (1996) tal como a dedução da função transferência, F_{ij} , que descreve a amplitude do deslocamento u de uma camada i para uma camada j e que toma a forma:

$$F_{ij}(w) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{a_i(w) + b_i(w)}{a_j(w) + b_j(w)} \quad (2.11)$$

Onde a e b são as amplitudes do movimento (para cima e para baixo, respectivamente) relativas às amplitudes na camada 1 (mais superficial).

A resposta de um terreno a uma carga cíclica simétrica, como a carga sísmica, é determinada principalmente pelas características do módulo de corte, G , e do amortecimento, ξ , exibindo uma relação tensão- deformação histerética, como se mostra na figura 2.1(a).

A inclinação da curva de histerese depende da rigidez do terreno, que pode ser descrito em qualquer ponto durante um processo de carga pelo módulo de corte tangente, G_{\tan} . Obviamente que G_{\tan} varia ao longo do ciclo de carga, mas o valor médio em todo o ciclo pode ser dado, aproximadamente, pelo módulo de corte secante:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.12)$$

onde τ_c é a amplitude da tensão de corte e γ_c a amplitude da deformação de corte. Deste modo G_{sec} , é determinado pelos pontos extremos da curva de histerese. A área dentro desta curva é uma medida da dissipação de energia que pode ser descrita através do amortecimento ξ :

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_s} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{loop}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (2.13)$$

Onde E_D é a energia dissipada, E_s a energia de deformação máxima e A_{loop} a área do *loop*.

O ProShake realiza o cálculo no domínio das frequências e, por isso, o problema do comportamento não linear e inelástico do terreno, que requer um tratamento directamente no domínio temporal, é resolvido com uma aproximação linear usando directamente o módulo de corte secante e o amortecimento para descrever o comportamento do terreno.

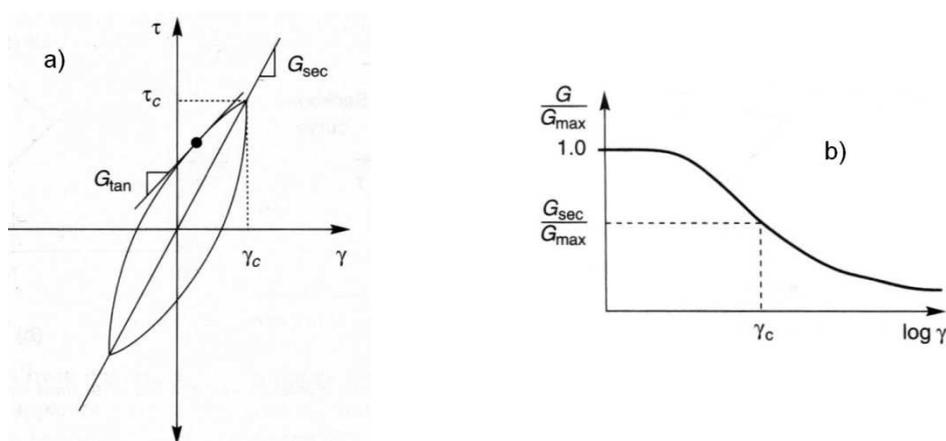


Figura 2.1: (a) Curva de histerese: determinação do módulo de corte secante G_{sec} e módulo de corte tangente G_{tan} ; (b) curva de redução do módulo. (*adaptado de Kramer, 1996.*)

A relação entre o módulo de corte secante e a amplitude da deformação de corte pode ser caracterizada através da curva de redução do módulo, figura 2.1(b). A curva, cuja ordenada é a razão do módulo ($= G/G_{máx}$) e abcissa o logaritmo da deformação ($= \log \gamma$) foi estabelecida para vários tipos de terreno por diferentes autores (por exemplo: Seed & Idriss, 1970; Schabel *et al.*, 1972; Seed *et al.*, 1984; Sun *et al.*, 1988; Vudetic & Dobry, 1991; Ishibashi & Zang, 1993). Esta curva pode

ser escolhida, entre as várias disponíveis no ProShake, dependendo do tipo de terreno, acontecendo o mesmo para as curvas de amortecimento que relacionam o amortecimento e a deformação de corte.

2.4 Metodologias para o Cálculo de Vulnerabilidades

A vulnerabilidade sísmica de um edifício está relacionada com a resistência que o edifício apresenta face a uma solicitação sísmica de determinada amplitude. A resposta dinâmica de uma estrutura à vibração do terreno é muito complexa, dependendo de vários parâmetros que podem, ou não, estar relacionados entre si e que são difíceis, e alguns impossíveis, de estimar. Estes factores, tais como a representação exacta do movimento do terreno, a extensão da estrutura que será excitada pelo movimento sísmico, a resistência dos materiais constituintes da estrutura, a qualidade da construção, as condições dos elementos estruturais individuais e da estrutura inteira, a interacção entre elementos estruturais e não estruturais, a carga no edifício actual na altura do sismo, e tantos outros, podem ser estimados, mas nunca calculados com precisão. Consequentemente, a vulnerabilidade poderá variar dentro de determinados níveis da confiança.

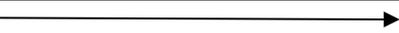
Os primeiros métodos para a avaliação da vulnerabilidade sísmica foram inicialmente desenvolvidos em regiões de alto risco sísmico, como os Estados Unidos (FEMA, 1988, 1992; HAZUS, 1999), Japão (Otani, 2000), Turquia (e.g., Ergunay & Gulkan, 1991) ou Itália (Benedetti & Petrini, 1984; GNDT, 1993, Seismocare, 1998; Faccioli *et al.*, 1999; Dolce *et al.*, 2003). Mais recentemente, o projecto europeu Risk-UE (Risk-UE, 2004) seleccionou sete cidades Europeias onde foi alcançado consensualmente um método de avaliação da vulnerabilidade sísmica. Todos estes métodos foram desenvolvidos em países caracterizados por uma forte actividade sísmica justificando o uso de meios de pesquisa bastante detalhados.

Sem dúvida que a avaliação mais pertinente da vulnerabilidade de um edifício consiste em caracterizar completamente a sua estrutura, conhecendo cada parâmetro estrutural e identificando o melhor possível os materiais que a constituem, reproduzindo ao longo do tempo os deslocamentos e tensões produzidos por um movimento sísmico em todos os pontos da estrutura (Combescure *et al.*, 2005). Este nível de avaliação bastante precisa de diagnóstico sísmico edifício a edifício não é possível de aplicar a uma grande escala.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica a grande escala depende da extensão da área de aplicabilidade (país, região, cidade), do número de edifícios a analisar, e do financiamento e tempo disponíveis. A tabela 2.2 mostra diferentes métodos para a estimativa da vulnerabilidade sísmica em função da escala de aplicabilidade e dos recursos necessários.

Os métodos de análise global, têm habitualmente como objectivo classificar os edifícios dentro de uma determinada tipologia pré definida para a qual se estima a vulnerabilidade sísmica de forma estatística.

Tabela 2.2: Diferentes metodologias em função da escala de aplicabilidade e dos recursos possíveis (*adaptado de Combescure et al., 2005*)

	Aumento dos meios necessários 				
Escala de Análise	Centenas de edifícios		Alguns edifícios	Edifícios individuais	
Métodos	Vulnerabilidade EMS-98	Índice de vulnerabilidade	Parecer de peritos	Cálculos analíticos	Análise numérica (modelação)
Aplicação	Cidade – Bairro - Quarteirão – Parques imobiliários - Edifícios estratégicos				
Meios humanos	Sem formação – Estudantes		Técnicos	Engenheiros	

2.4.1 Método Risk-UE

No método Risk-UE, são usadas duas aproximações para a avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado.

- A primeira aproximação, referida como nível I, é uma aproximação empírica. É baseada no facto de certas classes de edifícios que partilham o mesmo tipo de modelos estruturais e de carga tenderem a experimentar o mesmo tipo de danos durante um sismo. E assim as relações da vulnerabilidade (curvas de vulnerabilidade e de fragilidade) são definidas para cada uma dessas classes de edifícios.
- A segunda aproximação, referida como nível II, é uma estimativa analítica dos danos estruturais. É baseada em estudos analíticos das estruturas, através de análises das histórias temporais ou através de métodos simplificados usando o espectro de capacidade para avaliar os danos.

Ambos os níveis de avaliação da vulnerabilidade para edifícios correntes utilizam uma tabela de tipologias do edificado, definida de acordo com as características dos edifícios comuns encontrados em várias cidades europeias. Esta tabela (tabela 2.3) compreende um total 23 classes de edifícios agrupados pelo tipo de estrutura e materiais de construção, incluindo os diferentes tipos de alvenaria, betão, aço e edifícios em madeira.

Tabela 2.3: Tipologias Risk-UE com os respectivos índices de vulnerabilidade

Tipologia RISK-UE			Valores representativos de IV				
			IV _{min}	IV ⁻	IV [*]	IV ⁺	IV _{max}
ALVENARIA	M1	Paredes em alvenaria de pedra					
	M1.1	Pedra rolada ou não aparelhada	0.620	0.810	0.873	0.980	1.020
	M1.2	Pedra aparelhada	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M1.3	Pedra de cantaria	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
	M2	Adobe	0.620	0.687	0.840	0.980	1.020
	M3	Paredes em alvenaria não armada					
	M3.1	Pavimento de madeira	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M3.2	Abobadas em alvenaria	0.460	0.650	0.776	0.953	1.020
	M3.3	Pavimento c/ vigas metálicas e alvenaria	0.460	0.527	0.704	0.830	1.020
	M3.4	Pavimento de betão armado	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
	M4	Paredes em alvenaria armada	0.140	0.330	0.451	0.633	0.700
M5	Construção em alvenaria reforçada	0.300	0.490	0.694	0.953	1.020	
BETÃO ARMADO	RC1	Sistema de pilares e vigas	-0.020	0.047	0.442	0.800	1.020
	RC2	Paredes interiores em betão	-0.020	0.047	0.386	0.670	0.860
	RC3	Sistema de pilares e vigas com paredes de enchimento em alvenaria não armada					
	RC3.1	Estrutura regular com paredes de enchimento	-0.020	0.007	0.402	0.760	0.980
	RC3.2	Estrutura irregular ou enchimento irregular ou horizontalidade flexível.	0.060	0.127	0.522	0.880	1.020
	RC4	Estrutura mista (pórticos e paredes em betão)	-0.020	0.047	0.386	0.670	0.860
	RC5	Paredes em betão pré - fabricado	0.140	0.207	0.384	0.510	0.700
RC6	Estrutura em betão pré - fabricado com paredes interiores em betão	0.300	0.367	0.544	0.670	0.860	
AÇO	S1	Sistema de pilares e vigas em aço	-0.020	0.047	0.363	0.640	0.860
	S2	Estrutura em aço c/ vigas reforçadas	-0.020	0.047	0.287	0.480	0.700
	S3	Sistema de pilares e vigas em aço c/ paredes de enchimento em alvenaria não armada	0.140	0.330	0.484	0.640	0.860
	S4	Sistema de pilares e vigas em aço c/ paredes interiores em betão, betonado no local	-0.020	0.047	0.224	0.350	0.540
	S5	Sistema c/ componentes em aço e betão armado	-0.020	0.257	0.402	0.720	1.020
MADEIRA	W	Estrutura em Madeira	0.140	0.207	0.447	0.640	0.860

2.4.1.1 Nível I

O nível I deste método estima o valor de um índice de vulnerabilidade para um dado edifício (ou conjunto de edifícios) que é função, não só da tipologia do edifício, mas também de diferentes factores susceptíveis de modificar o seu comportamento. Os valores representativos do índice de vulnerabilidade para as diferentes tipologias apresentam-se na tabela 2.3, onde se indica:

-
- IV^* , um valor médio que representa o factor que quantifica o comportamento sísmico do edifício. É o valor mais provável para o índice de vulnerabilidade IV . IV varia em torno de 0 e 1, sendo 1 o valor representativo dos edifícios mais vulneráveis e 0 os menos vulneráveis.
 - IV^- e IV^+ , limites dos valores plausíveis para o índice de vulnerabilidade IV ;
 - IV^{\min} e IV^{\max} , valores máximos e mínimos aceitáveis. Variam entre -0.02 e 1.02.

O factor (ΔV_m) que modifica o índice médio da vulnerabilidade (V_I^*) pode ser estimado para um único edifício somando todos os factores V_m que poderão alterar a sua vulnerabilidade:

$$\Delta V_m = \Sigma V_m \quad (2.14)$$

Ou para um conjunto de edifícios pertencentes a uma determinada categoria:

$$\Delta V_m = \Sigma r_k V_{m,k} \quad (2.15)$$

onde r_k é o rácio de edifícios caracterizados pelo factor k , com um factor $V_{m,k}$. Os valores de V_m para os edifícios de alvenaria e betão encontram-se na tabela 2.4 e 2.5 respectivamente.

Deste modo, o índice de vulnerabilidade total (\overline{IV}) é dado pela soma do índice de vulnerabilidade médio (IV^*) referente à tipologia do edifício, do índice de vulnerabilidade obtido pelo somatório dos factores que poderão alterar essa vulnerabilidade (ΔV_m) e ainda de um índice regional (ΔV_R) que poderá ser introduzido caso haja, a nível regional, edifícios com características de qualidade particular, ou seja:

$$\overline{IV} = IV^* + \Delta V_m + \Delta V_R \quad (2.16)$$

A partir deste índice de vulnerabilidade total é possível definir as curvas de vulnerabilidade para um dado edifício, ou para um conjunto de edifícios, que representam o grau de danos médio em função da intensidade macrossísmica expressa na escala EMS-98 (Grünthal, 1998). As curvas são obtidas através da seguinte expressão:

$$\mu_D = 2,5 \left[1 + \tanh \frac{I_{EMS98} + 6,25 \overline{IV} - 13,1}{2,3} \right] \quad (2.17)$$

Onde μ_D é o grau de danos médio, I é o valor da intensidade (EMS-98) e \overline{IV} é o índice de vulnerabilidade total.

Tabela 2.4: Factores que afectam a vulnerabilidade em edifícios de alvenaria (Risk-UE, 2004)

Factores de vulnerabilidade	Parâmetros	V _m
Estado de conservação	Bom	-0,04
	Mau	+0,04
Nº de pisos	1 ou 2	-0,02
	3, 4 ou 5	+0,02
	6 ou mais	+0,06
Sistema estrutural	Espessura da parede	Entre -0.04 e +0.04
	Distância entre paredes	
	Conexão entre paredes	
	Conexão horizontal	
Obras	Demolição de paredes	+0.04
Irregularidade em planta		+0,04
Irregularidade vertical	...	+0,02
Aumento do nº de pisos	...	+0.04
Telhado	Peso+carga+conexões	+0.04
Obras de “retrofitting”	...	Entre -0.08 e +0.08
Interações entre edifícios: posição	Meio	-0,04
	Esquina	+0,04
	Ponta	+0,06
Interações entre edifícios: elevação	Pisos desencontrados	+0.02
	Edifícios de diferentes alturas	Entre -0.04 e +0.04
Fundações	Fundações de diferentes níveis	+0.04
Terreno	Declive	0,02
	Ravina	+0,04

Tabela 2.5: Factores que afectam a vulnerabilidade em edifícios de betão (Risk-UE, 2004)

Factores de vulnerabilidade	Parâmetros	V _m (código baixo)	V _m (código médio)	V _m (código alto)
Código		+0,16	0	-0.16
Estado de conservação	Mau	+0,04	+0,02	0
Nº de pisos	1 ou 2	-0,04	-0,04	-0,04
	3, 4 ou 5	0	0	0
	6 ou mais	+0.08	+0.06	+0.04
Irregularidade em planta	(forma para RC)	+0.04	+0.02	0
	Protuberâncias	0.02	0.01	0
Irregularidade vertical	...	+0.04	+0.02	0
Pilares curtos		+0.02	+0.01	0
Janelas em arco		+0,04	+0.02	0
Edifícios agregados	Juntas sísmicas insuficientes	+0,04	0	0
Fundações	Vigas	-0,04	0	0
	Vigas ligadas	0	0	0
	Sapatas isoladas	+0,04	0	0
Terreno	Declive	+0.02	+0.02	+0.02
	Ravina	+0.04	+0.04	+0.04

Os danos observados nas estruturas são avaliados segundo diferentes graus que variam entre o nível 0 (sem danos) até ao nível 5 (destruição). Os estragos mais significativos, quer a nível de perdas humanas quer ao nível das estruturas, ocorrem para os graus 4 e 5. É então necessário calcular a probabilidade de se atingirem esses diferentes graus. As curvas de vulnerabilidade obtidas relacionam a solicitação sísmica expressa em termos da intensidade EMS-98, com um índice de estragos médio (μ_D). Isto permite definir uma função densidade de probabilidade (FDP) e uma função densidade de probabilidade cumulativa (FDC), correspondentes aos diferentes graus de destruição através de uma distribuição beta, do seguinte modo:

$$\text{FDP: } p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(s)}{\Gamma(q) * \Gamma(s-q)} \frac{(x-a)^{q-1} (b-x)^{s-q-1}}{(b-a)^{s-1}} \quad (a \leq x < b) \quad (2.18)$$

$$\text{FDC: } P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.19)$$

Com $a = 0$; $b = 6$; $s = 8$, $x =$ grau de dano; Γ é a função gama e

$$q = s (0,007\mu_D^3 - 0,052\mu_D^2 + 0,2875\mu_D)$$

A probabilidade associada ao grau de danos k e $k+1$ ($k=0, 1, 2, 3, 4, 5$) é usada para calcular a função densidade de probabilidade:

$$p_k = P_{\beta}(k+1) - P_{\beta}(k) \quad (2.20)$$

A probabilidade de uma determinada tipologia atingir, ou ultrapassar, um certo grau de danos (D_K) para uma determinada intensidade macrossísmica é dada por:

$$P(D \geq D_K) = 1 - P_{\beta}(k) \quad (2.21)$$

2.4.2 Método Vulneralp

Este método foi desenvolvido para a cidade de Grenoble, em França, por Guéguen *et al.* (2007), baseia-se no método GNDT italiano (GNDT, 1993), e requer apenas parâmetros estruturais fáceis de identificar:

- Tipo de material de construção (alvenaria ou betão)
- Localização dos edifícios e fundações (inclinação do terreno; rocha ou sedimentos)
- Idade/ ano de construção
- Cobertura (terraço ou telhado inclinado)
- Regularidade em planta
- Regularidade vertical
- Posição no quarteirão (canto, isolado, ponta, ou ao meio)

Os índices de vulnerabilidade, IV_i , para cada parâmetro estrutural i encontram-se na tabela 2.6 onde se indica um valor médio (IV^*) e os valores máximos e mínimos aceitáveis sendo imposto a cada parâmetro um determinado peso W .

Tabela 2.6: Peso e índices de vulnerabilidade de cada parâmetro estrutural para o método Vulneralp

Data de construção $W=2.5$	Antes 1935			Entre 1935 e 1983			Entre 1983 e 2000			Depois de 2000		
	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$
Alvenaria	45	25	15	45	25	15	25	15	5	25	15	5
RC	25	25	25	25	15	5	15	5	0	5	2,5	0
Localização do edifício e fundações $W=0.75$	Rocha s/ inclinação			Sedimento s/ inclinação			Rocha c/ inclinação			Sedimento c/ inclinação		
	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$
Alvenaria	0	0	0	5	5	5	45	15	5	45	25	5
RC	0	0	0	5	5	5	15	10	5	15	10	5
Localização da estrutura	Canto			Isolado			Ponta			Meio		
Alvenaria		1.5			1			1.3			1	
RC		1			1			1			1	
Telhado $W=0.5$	Sem inclinação			Com inclinação								
	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$						
Alvenaria	15	7.5	0	45	25	15						
RC	0	0	0	45	20	0						
Regularidade em planta $W=0.5$	Regular			Irregular								
	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$						
Alvenaria	5	2.5	0	45	25	25						
RC	5	2.5	0	15	15	10						
Regularidade na vertical $W=1.0$	Regular			Irregular								
	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$	$IV^{máx}$	IV^*	$IV^{mín}$						
Alvenaria	25	15	0	45	25	5						
RC	10	5	0	15	10	5						

O índice da vulnerabilidade total, \overline{IV} , é calculado através da seguinte expressão:

$$\overline{IV} = \sum_{i=1}^n IV_i W_i \quad (2.22)$$

onde W_i é o peso de cada parâmetro estrutural i .

Este método permite também obter as curvas de vulnerabilidade, através da expressão:

$$\mu_D = 0,5 + 0,45 \arctan (0,55 (I_{EMS98} - 10,2 + 0,05 \overline{IV})) \quad (2.23)$$

onde I_{EMS98} é o valor da intensidade, e μ_D é o grau de danos médio.

Capítulo 3: Estimativa da Perigosidade Sísmica

3.1 Introdução

A estimativa da perigosidade sísmica para Ponta Delgada, revelou-se uma tarefa muito delicada, devido ao facto de se possuir uma informação sísmica muito incompleta para Arquipélago dos Açores. A sismicidade histórica data apenas de meados do séc. XV, e a sismicidade instrumental só começou a ser verdadeiramente desenvolvida a partir de 1980. O alargamento da rede sísmica na década de 90, originou um acréscimo de informação mas que no seu conjunto, se apresenta muito heterogénea.

Apesar destas condicionantes decidiu-se realizar um estudo probabilista para a zona urbana de Ponta Delgada com o objectivo de estimar a probabilidade de ocorrência de um sismo forte. Os resultados serão apresentados em termos de aceleração de pico (PGA) e aceleração espectral (SA) de forma.

De acordo com os procedimentos necessários para se realizar uma análise deste tipo, a metodologia utilizada para este estudo probabilista da perigosidade sísmica para Ponta Delgada consistiu nos seguintes passos:

- (1) Enquadramento sismotectónico da Ilha de S. Miguel e área envolvente.
- (2) Análise da sismicidade histórica e instrumental desta região.
- (3) Análise dos catálogos sísmicos disponibilizados, limpeza de réplicas e precursores e construção do catálogo de trabalho.
- (4) Selecção das zonas de geração sísmica e caracterização dos seus parâmetros.

(5) Selecção da lei de atenuação.

(6) Calculo dos valores de PGA e de SA.

3.2 Enquadramento Sismotectónico da Região

A cidade de Ponta Delgada está localizada em S. Miguel, a maior das nove ilhas do Arquipélago dos Açores. Este arquipélago localiza-se junto da junção tripla de três placas litosféricas: Eurasiática, Africana e Norte Americana, e é o resultado da actividade vulcânica associada a esta junção tripla (figura 3.1). As ilhas estão alinhadas na direcção WNW-ESE, atravessando obliquamente o *rift* da Crista média com latitudes compreendidas entre 36° e 40° N e longitudes entre 24° e 32° W (Madeira & Ribeiro 1990). Devido a esta localização particular é a região portuguesa com maior actividade sísmica, apresentando, também, uma actividade vulcânica.

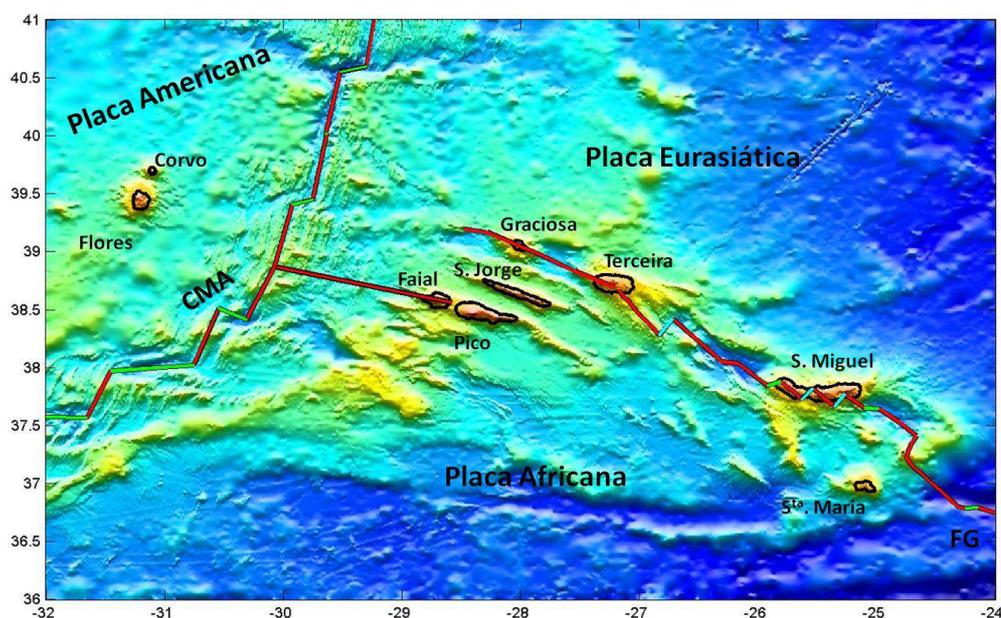


Figura 3.1: Enquadramento tectónico do Arquipélago dos Açores. CMA- Crista Média Atlântica; FG- Falha da Glória. (adaptado de Lourenço et al., 1998).

3.2.1 Ilha de S. Miguel

A ilha de S. Miguel é a maior do arquipélago com um comprimento máximo de 65 km e uma largura de cerca de 16 km, ocupando uma área de aproximadamente 746 km². As expressões geomorfológicas mais importantes estão representadas na figura 3.2, com destaque para os quatro grandes edifícios vulcânicos: Povoação, Furnas, Fogo e Sete cidades, os dois últimos ligados por um sector com vulcanismo fissural na denominada Região dos Picos (Madeira, 1998), onde se encontra edificada a cidade de Ponta Delgada. O sistema Vulcânico Fissural do Congro, localizado no Planalto da Achada das Furnas, apesar de ser o sistema vulcânico activo de S. Miguel que manifesta a mais reduzida actividade eruptiva recente, é nele que se desenvolvem com maior frequência importantes crises sísmicas, de natureza tectónica e vulcânica.

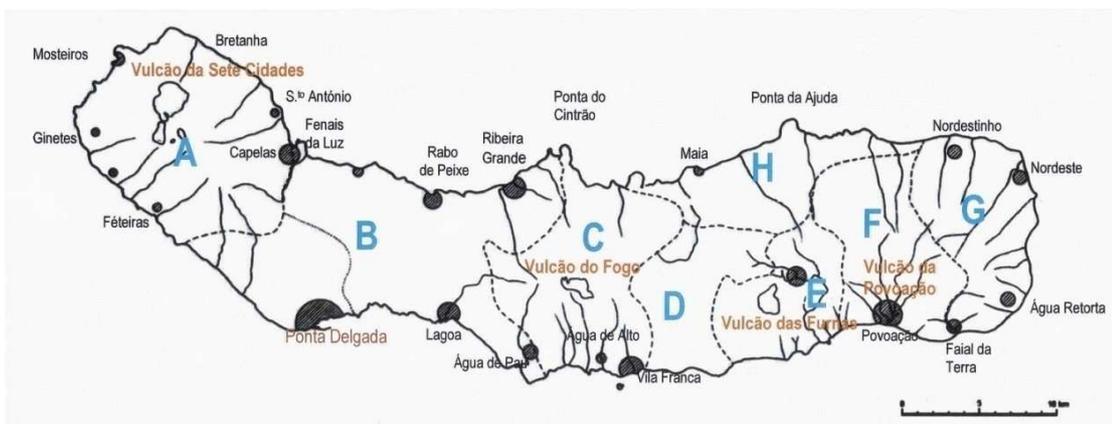


Figura 3.2: Unidades geomorfológicas da ilha de S. Miguel. **A** – Vulcão das Sete Cidades. **B** - Região dos Picos. **C** – Vulcão do Fogo. **D** – Planalto da Achada das Furnas. **E** – Vulcão das Furnas. **F** – Vulcão da Povoação. **G** – Região do Nordeste e da Tronqueira. **H** – Planalto Setentrional. (Adaptado de Zbyszewsky, 1961).

Ao largo de S. Miguel (ver figura 3.3) a partir do extremo oeste da ilha estende-se para SSE uma crista submarina sobre a qual se localiza o **Banco do Mónaco (BM)**. A vertente oeste desta crista encontra-se no prolongamento do bordo da **Fossa de Hirondele Sul (FHS)**. O bordo oriental é menos íngreme e

orienta-se segundo a direcção N-S. No extremo ocidental da fossa de Hironnelle Sul encontra-se o aparelho vulcânico designado por **Banco D. João de Castro (BJC)**. A **Fossa da Povoação (FP)**, localizada a sueste desta ilha, apresenta forma aproximadamente rectangular alongada na direcção N50°W. Do lado sudoeste da bacia existe um relevo aproximadamente circular (certamente um vulcão submarino), o **Banco Grande Norte (BGN)** com 1500 m da altura, cujo cume se encontra à profundidade de 117 m (Madeira, 1998).

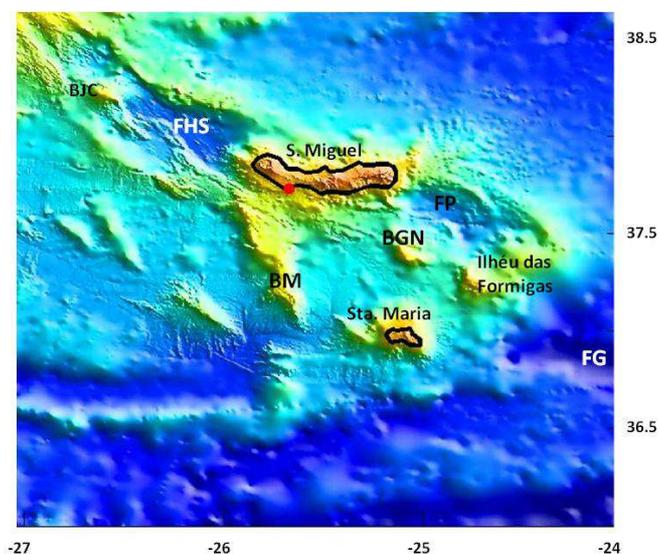


Figura 3.3: Batimetria ao largo de S. Miguel. BJC- Banco D. João de Castro. FHS- Fossa de Hironnelle Sul. BM -Banco do Mónaco. BGN- Banco Grande Norte. FP- Fossa da Povoação. • - Ponta Delgada. (Adaptado de Lourenço et al., 1998).

3.3 Sismicidade em S. Miguel

A ilha de S. Miguel apresenta elevada actividade sísmica. A análise da bibliografia existente permite verificar que a actividade sísmica de origem tectónica, frequente na região dos Açores e, em particular, em S. Miguel, é caracterizada por eventos de pequena magnitude que, geralmente, são sentidos com baixa intensidade. Além da ocorrência de sismos “isolados”, ocorrem muitas das vezes crises sísmicas onde se destacam os sismos que atingem intensidades mais elevadas. A par da actividade tectónica, a manifestação de fenómenos vulcânicos

não tem sido rara nos últimos cinco séculos. Algumas destas erupções foram acompanhadas por importante actividade sísmica, suficientemente forte para causar danos económicos avultados.

3.3.1 Sismicidade Histórica

A sismicidade histórica no Arquipélago dos Açores data apenas de meados do séc. XV, altura em que foram povoadas estas ilhas, nomeadamente a ilha de S. Miguel que terá sido povoada em 1439. Dos vários sismos históricos de natureza tectónica, descritos por vários autores, (Frutoso, 1522-1591; Chagas, 1576-16??; Alverne, 1629-1726; Cordeiro, 1641-1722; Maldonado, 1644-1711, *in* Silveira, 2002), os que provocaram maior destruição na ilha de S. Miguel ocorreram nos séculos XVI, XIX e XX destacando-se os sismos de **1522**, **1591**, **1852**, **1932**, **1935** e o de **1952** devido aos prejuízos consideráveis que produziram (figura 3.4). De realçar que, para estes sismos, existe suficiente informação susceptível de permitir um estudo macrossísmico.

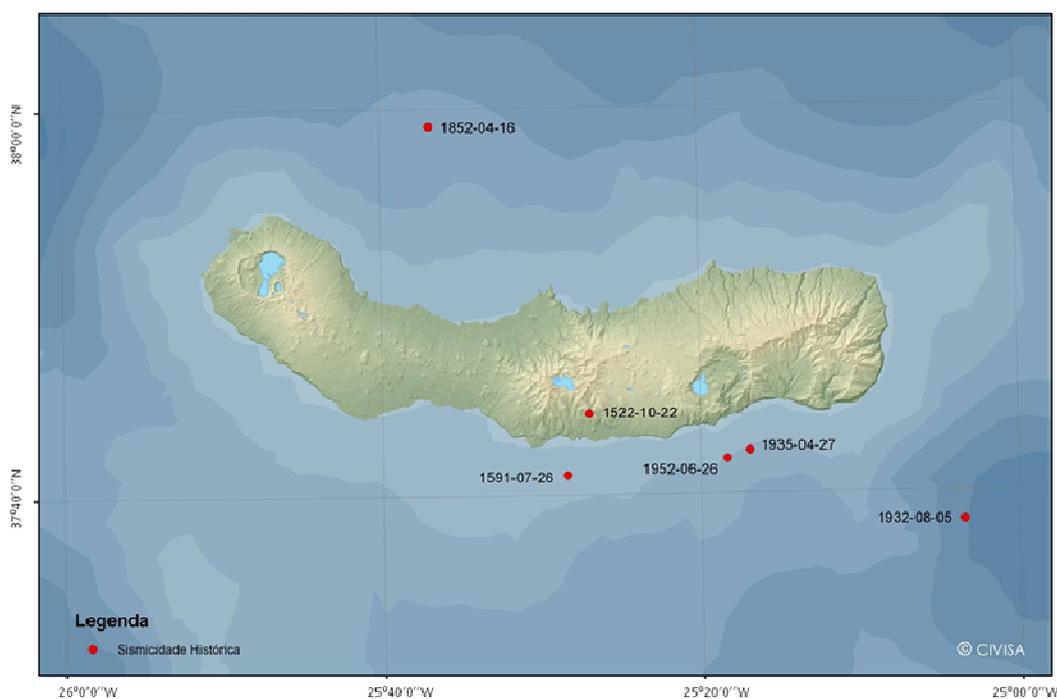


Figura 3.4: Sismicidade histórica de origem tectónica (*adaptado de CVARG, 2011*).

Na tabela 3.1 apresenta-se uma síntese da informação recolhida sobre os danos causados na ilha e, em particular, na cidade de Ponta Delgada, e as respectivas intensidades máximas na escala europeia macrossísmica EMS-98 atribuídas por Silveira (2002, 2003).

Tabela 3.1: Principais sismos históricos, de origem tectónica, que afectaram a ilha de S. Miguel

Data	Intensidade máx. (EMS-98)	Zona mais afectada	Consequências na zona mais afectada	Intensidade em P. D. (EMS-98)	Estragos em Ponta Delgada
1522 -10-22	X	Vila Franca do Campo, então capital da ilha.	Cerca de 5000 mortes. Grandes destruições.	VIII	Caíram muitas casas e a igreja.
1591 -07-26	VIII	Vila Franca do Campo e Água de Pau.	Muitas mortes. Réplicas até dia 12.	-	Não há informação.
1852 -04-16	VIII	Ribeira Grande seguido de Ponta Delgada.	Ruína de casas, igrejas e muros de caminhos e propriedades. 9 mortos. Muitos feridos graves. Sentido em dois navios.	VII	Estragos avultados. Fendas na maioria dos edifícios. Queda de elementos não estruturais, em casas e edifícios públicos (igrejas). Nas zonas nascente e poente foi menos sentido.
1932 -08-05	VIII	Água Retorta e Lomba do Cavaleiro.	Vários feridos. Grandes destruições.	V	Danos ligeiros. Queda de calça e algumas quedas de pedras.
1935 -04-27	IX	Povoação.	1 morto. Grandes destruições.	V	Apenas algumas fendas e pequenos desmoronamentos
1952 -06-26	VII	Vila Franca do Campo e Povoação.	Grandes destruições.	IV	População alarmada sem registo de danos.

Paralelamente à actividade sísmica de origem tectónica, as crises sísmicas de origem vulcânica têm sido uma constante na ilha ao longo dos tempos.

A actividade vulcânica observada na região dos Açores tem-se centrado, predominantemente, ao longo do *rift* da Terceira. Desde o início do povoamento das ilhas (século XV), foram registadas pelo menos 28 erupções vulcânicas, 15 das quais em terra e 13 no mar.

Em particular, a ilha de S. Miguel foi palco de diversas erupções assinaladas na figura 3.5, que foram acompanhadas por uma grande actividade sísmica destacando-se os eventos de maior intensidade.

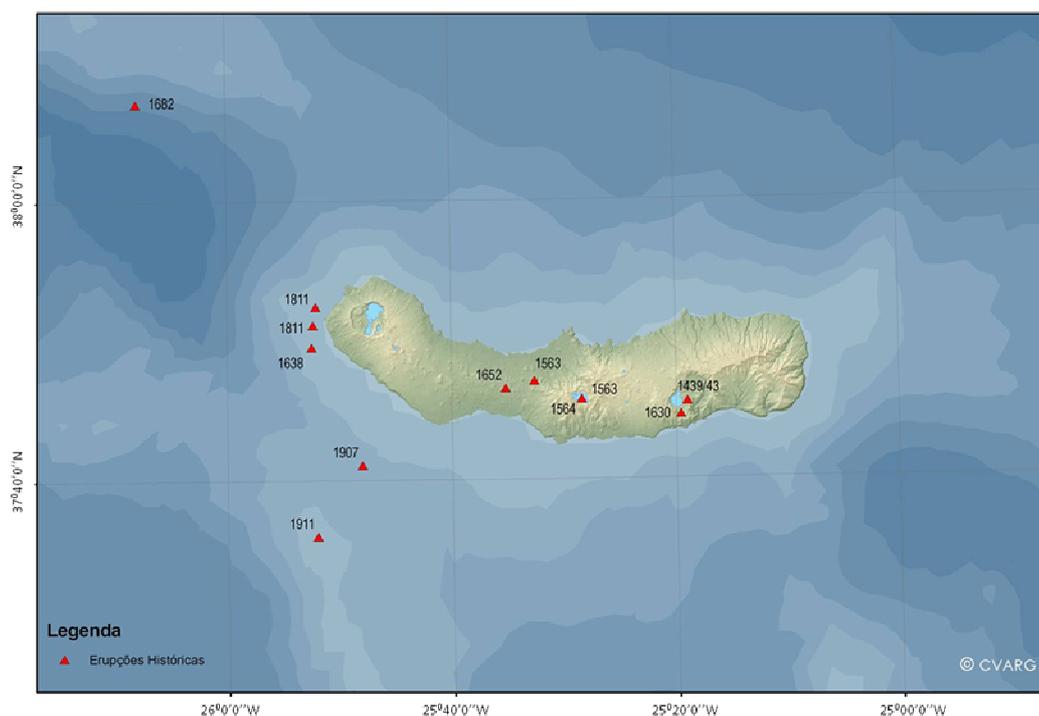


Figura 3.5: Erupções históricas (*adaptado de CVARG, 2011*).

Na tabela 3.2 apresentam-se os principais sismos históricos associados a fenómenos vulcânicos. Os quatro eventos apresentados estiveram associados a erupções vulcânicas, mais concretamente às erupções do Vulcão do Fogo e do Pico Queimado (1563), do Vulcão das Furnas (1630), do Pico do Paio (1652) e às erupções submarinas de Fevereiro e Junho de 1811 junto à costa da Ferraria.

Tabela 3.2: Principais sismos históricos, de origem vulcânica (crises sísmicas), que afectaram a Ilha de São Miguel

Período	Intensidade máx. (EMS-98)	Intensidade em P. D. (EMS-98)	Fenómeno vulcânico	Consequências	Consequências em Ponta Delgada
22 Junho a 04 Julho 1563	X	V	Erupção na caldeira do Fogo e Pico Queimado	Destruição de muitas habitações e muitos desalojados, principalmente em Ribeira Grande. Grande destruição na zona leste da ilha.	Sentidos alguns abalos sem prejuízos. Consequências indirectas: Queda de cinza, fome e sede na cidade.
02 Set. a 08 Set. 1630	VIII	VII	Erupção na caldeira das Furnas	~200 mortos. Destruição severa em, Furnas, Ponta Graça e Ribeira Quente.	Sentidos alguns tremores de terra durante algumas horas. Grande pânico na população. Os sinos tocaram com veemência. Consequências indirectas: Queda de cinza, atingindo 5 dedos de altura.
10 Out. a 19 Out. 1652	VIII	V	Erupção no Pico do Paio	As cinzas fizeram sentir-se na costa Sul. Colapso de casas em santa Cruz.	Sismo fortemente sentido, alvoraçando a população. Sem danos. Consequências indirectas: Queda de cinza
13 Junho a 22 Junho 1811	IX	V	Erupções no flanco NW do vulcão das Sete Cidades, no mar junto à costa da Ferraria	Formação de uma nova ilha que a erosão fez desaparecer (Sabrina). Muitas casas destruídas em Mosteiros, Ginetes e Candelária.	32 sismos sentidos em poucas horas. Consequências indirectas: nuvens de cinza que se depositaram nos edifícios.

3.3.2 Sismicidade Instrumental

A sismicidade instrumental no Arquipélago dos Açores teve início em 1902 com a instalação das primeiras estações sismográficas por parte do Serviço Meteorológico Nacional (SMN) nas cidades de Ponta Delgada (S. Miguel) e Horta (Faial); apenas em 1932 foi instalada a estação de Angra de Heroísmo (Terceira) (Nunes *et al.*, 1992, 1999; Senos *et al.*, 1997). Estas três estações constituíram a rede de monitorização sísmica dos Açores até 1980, ano em que ocorreu o mais forte abalo registado nos últimos 100 anos: o sismo de 1 de Janeiro de 1980, $M=7.2$

(Nunes *et al.*, 1999). Após este sismo foram instaladas na região estações sismológicas no âmbito de Projecto Geotérmico dos Açores, que mais tarde vieram a integrar a RUVS (Rede Universitária de Vigilância Sismo Vulcânica) sendo, ao mesmo tempo, instaladas outras estações que ampliaram a rede gerida pelo Instituto de Meteorologia (IM).

De 1980 a 1997, estas duas redes funcionaram independentemente (Senos *et al.*, 1997). A partir de 1980, pôde considerar-se que a informação sísmica instrumental fornecida por estas redes é satisfatória (Madeira, 1998), porém, a não integração dos dados obtidos por ambas as redes penalizou a qualidade dos mesmos. Desde 1997 até 2007, em consequência do protocolo de cooperação entre o IM e a Universidade dos Açores, foi o SIVISA (Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores) que geriu uma rede constituída por 50 estações sismográficas analógicas e digitais, distribuídas por redes locais, regionais e nacionais. Actualmente, as duas redes regionais são geridas independentemente, uma pelo IM e outra pelo CVARG (Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos) da Universidade dos Açores.

A ilha de S. Miguel apresenta elevada sismicidade na sua parte central, onde se desenvolvem os sistemas vulcano-tectónicos do Fogo, Congro e Furnas. Embora menos frequentemente, também se tem registado alguma sismicidade no maciço das Sete Cidades. Tais zonas contrastam com o observado no Sistema Fissural dos Picos e na região do Nordeste, onde a sismicidade é residual. Os sismos de maior magnitude têm-se localizado no mar, nas estruturas submarinas que marcam a existência do *rift* da Terceira. Neste contexto, assumem especial significado a Fossa de Hironnelle, a oeste, e o segmento que se estende desde o sul da ilha até aos ilhéus das Formigas, ao longo de uma direcção geral NW-SE.

Nos últimos 30 anos, os dois sismos sentidos com maior intensidade na ilha de S. Miguel ocorreram em 1988 e atingiram o grau VI-VII (MM-56) (CVARG, 2011): o sismo de 16 de Outubro com magnitude local (M_L) de 5.1 que se localizou

a cerca de 23 km a SSW da Povoação e o sismo de 21 de Novembro, com epicentro a NW dos Mosteiros e $M_L = 5,8$ (magnitudes retiradas de Nunes *et al.*, 2004).

3.4 Catálogo Sísmico Regional

O catálogo sísmico é um elemento fundamental em análises de sismicidade, sismotectónica, perigosidade sísmica e risco sísmico. No caso da perigosidade sísmica, é com base nele que são quantificadas as grandezas estatísticas de cada zona, nomeadamente a taxa anual de ocorrência de sismos, a magnitude máxima, e os parâmetros da lei de Gutenberg & Richter (G-R). Para tal é essencial examinar primeiro a sua heterogeneidade espacial e temporal, tal como a sua completude. Como se sabe os catálogos são produzidos através da análise dos registos observados nas redes de monitorização sísmica. Essas redes podem ter sofrido alterações no espaço e no tempo, e as práticas e procedimentos operacionais de análise de registos sísmicos têm evoluído ao longo do tempo.

A frequente ocorrência de crises sísmicas, de origem tectónica ou vulcânica, tem como consequência uma aglomeração de eventos sísmicos no espaço e no tempo, o que é indesejável no cálculo probabilístico da perigosidade sísmica e que, por isso, deve ser eliminada.

Utilizou-se o algoritmo proposto por Gardner & Knopoff (1974), para retirar as réplicas e precursores do catálogo sísmico com os limites impostos de ocorrência no espaço e no tempo, propostos pelos mesmos autores. O objectivo deste procedimento, onde se remove as réplicas e precursores do catálogo sísmico, é o de obter uma sequência temporal de sismos que obedeça à distribuição de Poisson. A eficácia do método adoptado pode ser avaliada, comparando a distribuição temporal de eventos (frequência observada) com a que seria de esperar para um processo de Poisson (frequência teórica). Para este efeito usamos o teste do χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{clas}} \frac{(f_{i,obs} - f_{i,teo})^2}{f_{i,teo}} \quad (3.1)$$

onde f_{obs} se refere à frequência observada e f_{teo} à frequência teórica.

O número de graus de liberdade é dado por $gdl=n-1-k$, e é definido como o número $n-1$ de observações independentes (número de classes) da amostra menos o número k dos parâmetros populacionais que devem ser estimados. Note-se que se subtrai 1 de n pois sendo conhecidas $(n-1)$ frequências teóricas a remanescente pode ser determinada por diferença.

Se para um determinado gdl o χ^2 obtido pela expressão (3.1) for inferior ao valor χ^2 na distribuição qui-quadrado para um intervalo de confiança de 95%, ou seja $[\chi^2 < \chi^2(95\%)]$, considera-se que o catálogo obedece a uma distribuição de Poisson.

Para a avaliação da perigosidade sísmica em Ponta Delgada foram analisados dois catálogos sísmicos:

- o catálogo do SIVISA cedido pelo Instituto de Meteorologia (IM) que compreende a sismicidade instrumental entre 1997 e 2008;
- e o Catálogo Sísmico da Região dos Açores (CSRA), versão 1.0 (1858-1999) de Nunes *et al.* (2004).

3.4.1 Catálogo do SIVISA

O catálogo do SIVISA refere-se apenas à sismicidade instrumental e abarca o período de 1997/01/ 02 a 2008/03/ 02 com um total de 66312 eventos localizados e não localizados.

Além da sismicidade natural, este catálogo apresenta também eventos de origem explosiva, e eventos sem magnitude calculada. Estes eventos foram todos eliminados, pois não devem ser utilizados no estudo da perigosidade sísmica.

Devido à localização da cidade de Ponta Delgada e tomando em consideração a distribuição espacial dos epicentros restringiu-se a área de trabalho à zona entre as latitudes 36.5° N e 39.0° N e entre as longitudes 27.5° W e 23.0° W. Obteve-se assim um catálogo com um total de 19644 eventos com a distribuição espacial ilustrada na figura 3.6a).

Usando o processo de limpeza do catálogo de Gardner & Knopoff (1974) referido anteriormente, foram identificadas 9518 réplicas e 7790 sismos precursores, resultando, no final, 2336 eventos principais.

Fazendo uma análise dos eventos de maior magnitude, verificou-se que o evento de 7 de Abril de 2007 que ocorreu ilhéu das Formigas tinha sido identificado pelo método de Gardner & Knopoff (1974) como uma réplica do evento, na mesma zona, de 5 de Abril de 2007, e por isso removido do catálogo. Estes dois eventos, ambos com magnitude local de 5.5, foram alvo de estudo por Buforn *et al.* (2009), sendo considerados dois eventos principais. Por este motivo decidiu-se incluir o evento de 7 de Abril de 2007 no catálogo limpo do SIVIVA ficando este com 2337 eventos principais (figura 3.6b).

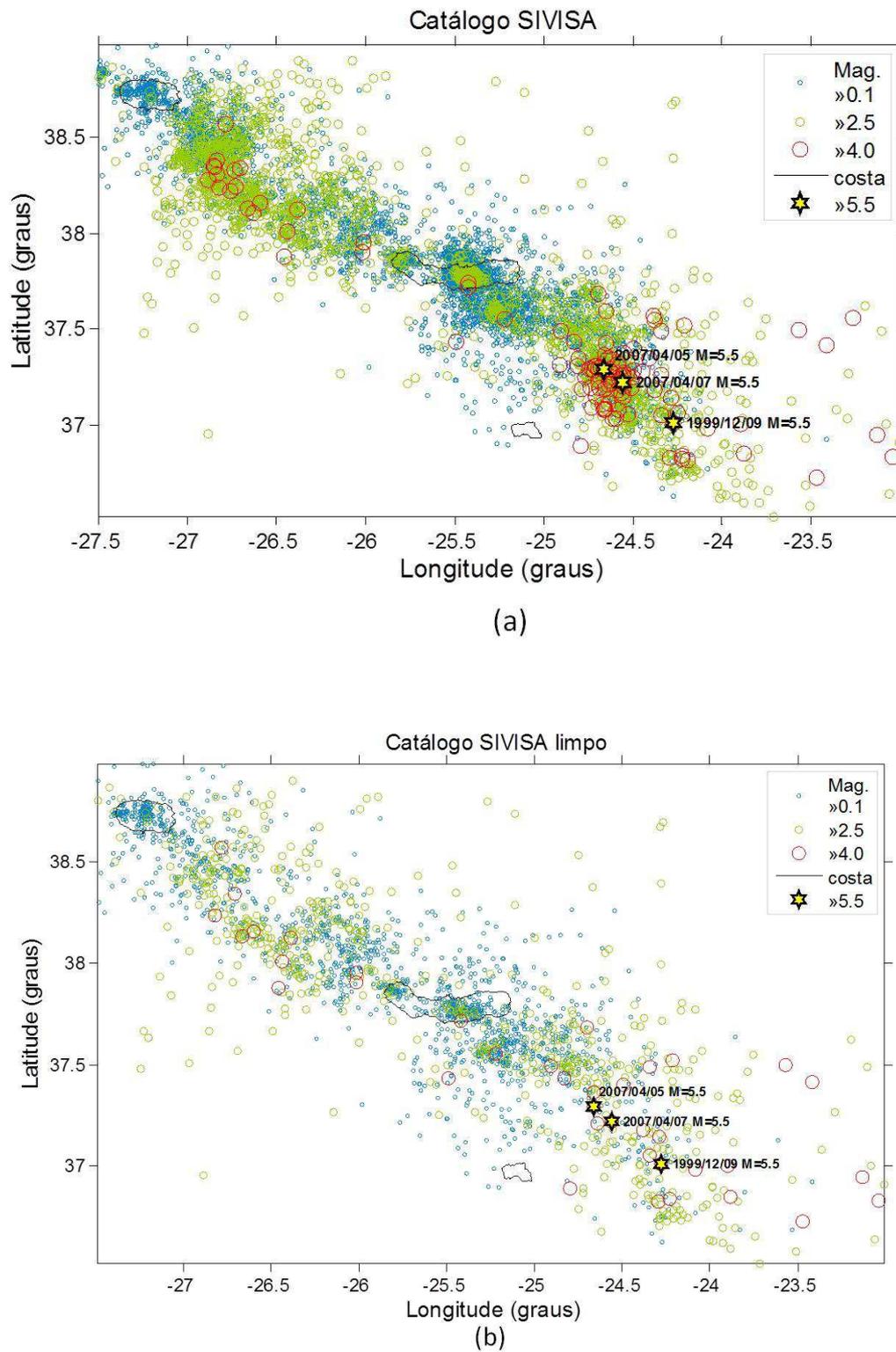


Figura 3.6: Catálogo sísmico do SIVISA restringido à área em estudo. (a) Antes da remoção de réplicas e precursoros. (b) Depois da remoção de réplicas e precursoros.

No gráfico da figura 3.7 está representado o número acumulado de eventos ao longo do tempo para o catálogo SIVISA antes e depois da remoção de réplicas e precursores.

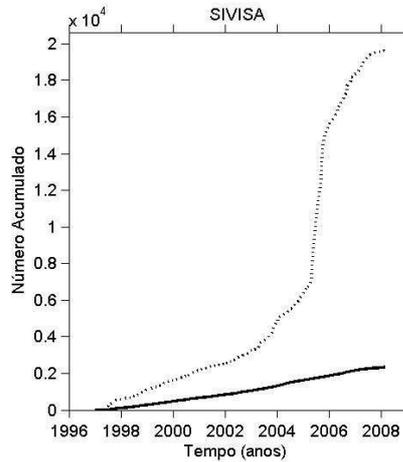


Figura 3.7: Número acumulado de eventos para o catálogo SIVISA antes (a tracejado) e depois (a preto) da remoção de réplicas e precursores.

O teste do χ^2 foi realizado contando o número de eventos em cada intervalo de 10 dias, e depois calculada a frequência dos intervalos com 0 eventos, 1 evento, ..., até 7 ou mais. A partir da amostra calculou-se também os respectivos parâmetros ideais da distribuição de Poisson. Comparou-se o valor do χ^2 com o esperado para um intervalo de confiança de 95% para o mesmo grau de liberdade, ou seja, $gdl = n - 2$. Os resultados obtidos antes e depois da remoção de réplicas e precursores para uma magnitude mínima de 2.5 encontram-se sintetizados na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resultados do processo de remoção de réplicas e precursores no catálogo SIVISA

	Magnitude mínima	χ^2	$\chi^2(95\%)$
Antes	2.5	341.84	11.11
Depois	2.5	6.19	9.49

Como se pode observar o procedimento de remoção de réplicas e precursores utilizado foi eficaz, $\chi^2 < \chi^2(95\%)$, obtendo-se no final um catálogo com eventos independentes para uma magnitude igual ou superior a 2.5.

3.4.2 Catálogo CSRA

O “Catálogo Sísmico da Região dos Açores, CSRA – versão 1.0”, da autoria de Nunes *et al.* (2004), contém informação sísmológica sobre o arquipélago dos Açores, para o período 1850-1998. Este catálogo resulta de um trabalho de pesquisa e compilação em acervos históricos, artigos de divulgação, periódicos e em publicações diversas, incluindo boletins, anuários e catálogos sísmicos, estes últimos disponibilizando informação para o século XX. Após 1947, as principais fontes de informação do “CSRA” são o Anuário Sismológico Nacional e os boletins sísmicos publicados pelo Serviço Meteorológico Nacional/ Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica/ Instituto de Meteorologia, pela Universidade dos Açores e pelo SIVISA. No período 1970-1998, o “CSRA” evidencia algumas lacunas, resultantes da inexistência ou da inacessibilidade de dados sísmicos publicados. Algumas destas lacunas estão associadas a crises sísmicas, com elevado número de eventos registados na rede sismográfica dos Açores os quais não estão, na sua totalidade, analisados (Nunes *et al.*, 2004).

Deste catálogo, foram seleccionados apenas os eventos localizados, compreendendo um total de 9214 eventos entre 1915/07/11 e 1998/12/31. A restrição à área de trabalho, já referida anteriormente, assim como a eliminação dos sismos sem magnitude atribuída reduziu o número total de sismos a 4318, entre 1930/10/21 e 1998/10/24, figura 3.8a).

O processo de limpeza deste catálogo foi semelhante ao feito no catálogo do SIVISA. Foram assim identificadas 2354 réplicas e 675 sismos precursores, resultando 1289 eventos principais (figura 3.8b).

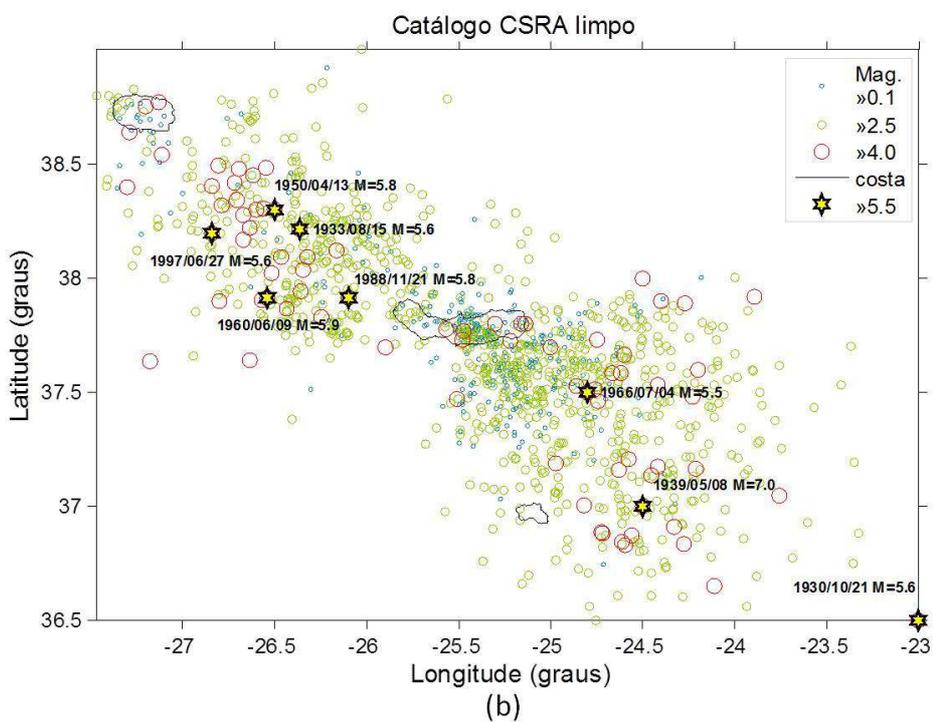
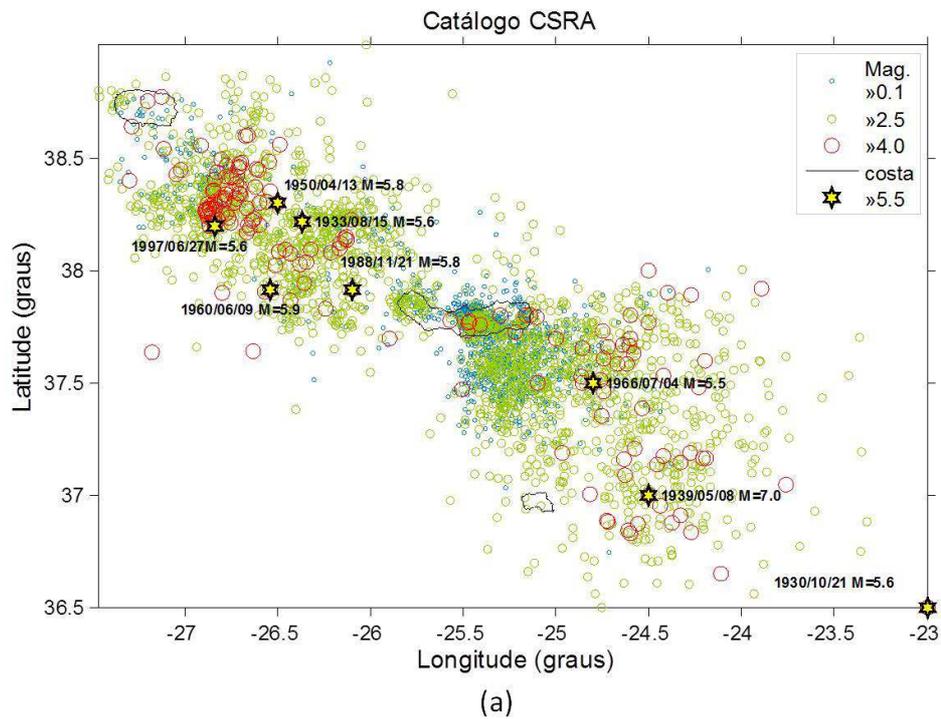


Figura 3.8: Catálogo sísmico CSRA restringido à área em estudo. (a) Antes da remoção de réplicas e precursoros. (b) Depois da remoção de réplicas e precursoros.

No gráfico da figura 3.9 está representado o número acumulado de eventos ao longo do tempo para o catálogo CSRA antes e depois da remoção de réplicas e precursoros.

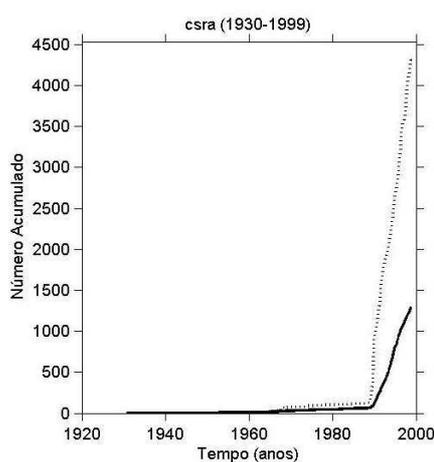


Figura 3.9: Número acumulado de eventos para o catálogo CSRA antes (tracejado) e depois (preto) da remoção de réplicas e precursoros.

Como se pode observar o carácter não uniforme e heterogéneo deste catálogo é bastante evidente e por isso foi necessário fazer uma análise mais detalhada na distribuição temporal dos eventos. O catálogo foi analisado para diferentes períodos temporais de modo a se identificarem as datas em que este sofreu as alterações mais significativas. Através dos gráficos da figura 3.10, é possível constatar que o catálogo CSRA sofreu duas alterações significativas entre 1930 e 1999: a primeira por volta de 1963 e a segunda, mais evidente, em 1989. Estas alterações evidenciam-se pelo aumento significativo do número de sismos devido provavelmente a melhorias na identificação (localização e magnitude) dos eventos sísmicos.

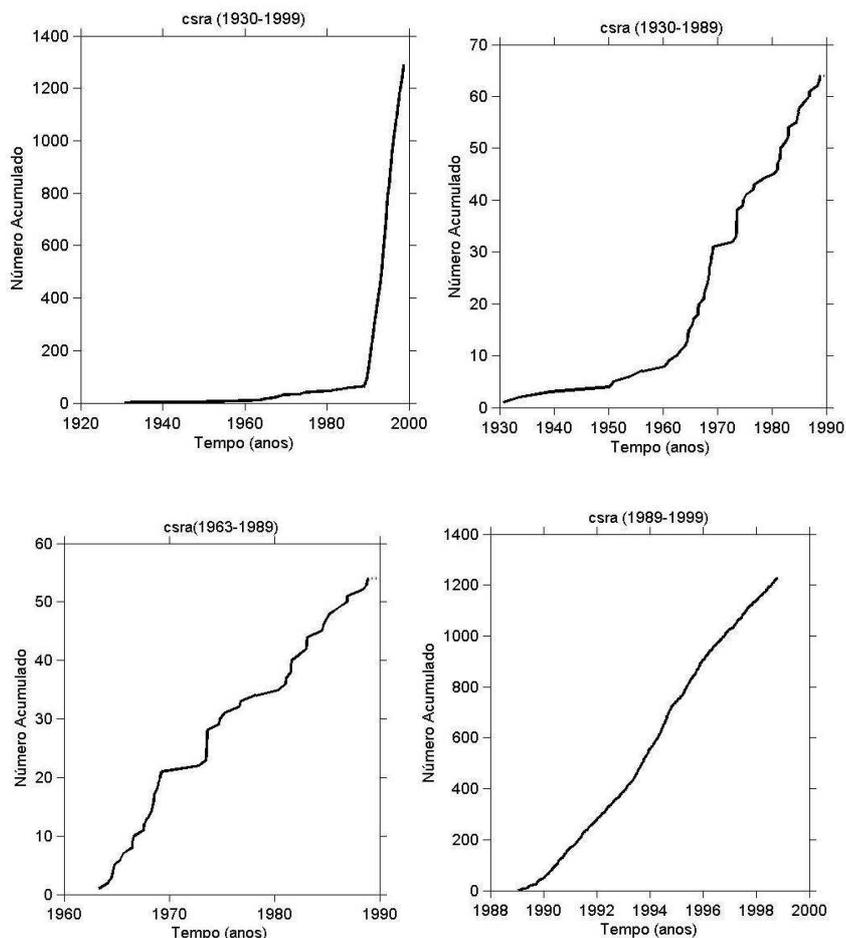


Figura 3.10: Número acumulado de eventos para o catálogo CSRA representado para os períodos de 1930 a 1999, 1930 a 1989, de 1963 a 1989 e, de 1989 a 1999.

As alterações no número de sismos registado durante o período de tempo do catálogo foram tidas em conta para a análise do processo de remoção de réplicas e precursores. Para verificar se este segue um processo de Poisson ou não, efectuou-se uma análise utilizando o método do χ^2 , tal como foi feito no catálogo do SIVISA, embora para diferentes intervalos temporais. As magnitudes mínimas a partir da qual temos uma distribuição de Poisson, para os respectivos intervalos de tempo, encontram-se esquematizadas na tabela 3.4

Tabela3.4: Magnitudes mínimas a partir da qual temos uma distribuição de Poisson no catálogo CSRA

Intervalo temporal	Magnitude mínima
1930-1998	5.0
1963-1998	3.5
1989-1998	3.1

Como seria de esperar, para os períodos mais recentes é menor a magnitude mínima a partir da qual temos uma distribuição de Poisson.

3.4.3 Catálogo de Trabalho

O catálogo de trabalho foi construído através da junção dos dois catálogos anteriores depois de tratados, dando preferência ao do SIVISA no período comum. O catálogo foi considerado apenas a partir do ano de 1963, devido ao reduzido número de sismos até essa data, e constringido para magnitudes superiores ou iguais a 2.5, tendo em conta que abaixo desse valor não há qualquer interesse para estudos de risco sísmico. Assim, este catálogo abarca um período entre 1963/05/15 a 2008/02/04 com 1382 sismos em toda a área já referida anteriormente. A magnitude máxima registada neste catálogo é de 5.8.

Foi analisada também a qualidade do catálogo de trabalho, em relação à sua magnitude de completude, M_c , que é definida como a magnitude mais baixa a partir da qual todos os sismos foram detectados no tempo e no espaço (Chouliaras, 2009), ou seja, a partir da qual o catálogo se considera completo. Os gráficos representados na figura 3.11, obtidos através do programa ZMAP (Wiemer & Malone, 2001), mostram o número acumulado de sismos em função do tempo (figura 3.11a) e da magnitude (figura 3.11b), com a respectiva M_c calculada de forma automática usando o princípio da máxima curvatura, obtendo-se o valor $M_c = 2.5$.

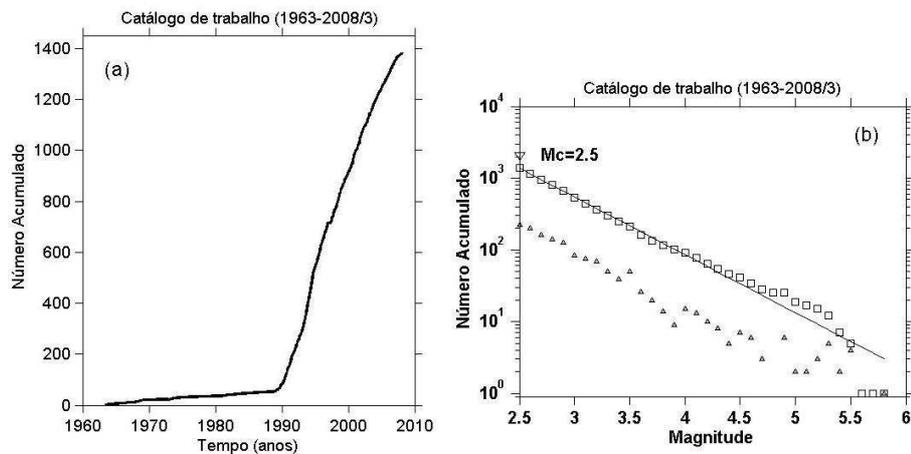


Figura 3.11: Gráficos do catálogo de trabalho; (a) Número acumulado de sismos em função do tempo; (b) número acumulado de sismos em função da magnitude (quadrados) com a respectiva magnitude de completude, M_c . Os triângulos representam o número de sismos em função da magnitude.

Devido à alteração tão acentuada do número de sismos a partir de 1989, foi realizada uma análise da M_c em dois períodos distintos (figura 3.12), onde se pode constatar que o catálogo antes de 1989 só está completo para magnitudes superiores a 4.6, o que leva a concluir que o resultado para uma M_c de 2.5 para todo o catálogo foi totalmente influenciado pelos dados após esta data, facto que foi tido em conta nas análises posteriores.

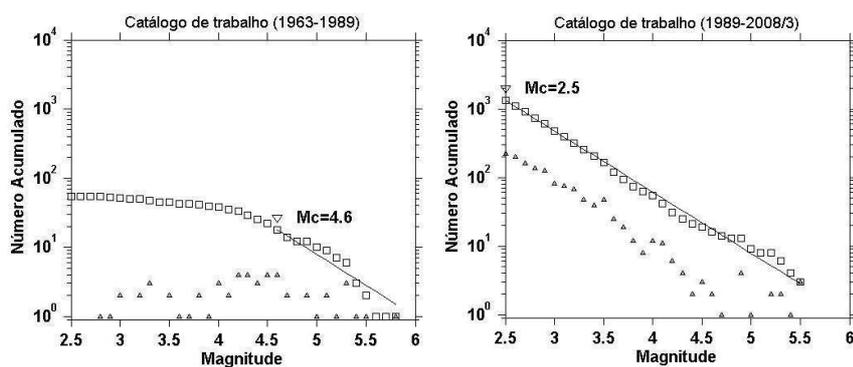


Figura 3.12: Curvas do número acumulado de sismos em função da magnitude do catálogo de trabalho com a respectiva magnitude de completude, M_c para os períodos entre 1963 a 1989 e entre 1989 a 2008/3 (quadrados). Número de sismos em função da magnitude (triângulos).

3.5 Zonas de Geração

Tendo em conta a distribuição espacial da sismicidade instrumental, assim como a tectónica da região, foi possível considerar para este estudo quatro zonas de geração sísmica (figura 3.13):

Zona 1: Ilha de S. Miguel;

Zona 2: Fossa de Hironnelle e Banco D. João de Castro;

Zona 3: Fossa da Povoação e Formigas;

Zona 4: Falha da Glória.

Apesar da ilha de S. Miguel apresentar uma elevada sismicidade na sua parte central (associada aos sistemas vulcano-tectónicos do Fogo, Congro e Furnas) e também, embora menos frequente, no extremo oeste da ilha (associada ao vulcão das Sete Cidades) a zona de geração 1 foi definida abrangendo toda a ilha como uma única zona de geração. Esta escolha foi feita devido ao reduzido número de sismos do catálogo, que impossibilita os cálculos dos parâmetros da sismicidade para diferentes zonas de geração dentro da ilha. As zonas de geração 2, 3 e 4 estão associadas às respectivas estruturas tectónicas descritas anteriormente.

Também devido ao reduzido número de sismos do catálogo, foi necessário definir dentro de cada zona um polígono de selecção (mais abrangente) para a caracterização da sismicidade (delimitando a sismicidade inerente a cada zona) e, um polígono de geração mais restrito, (delimitando a região fonte) que será decomposto em pequenos elementos com uma probabilidade normalmente distribuída de gerar um sismo (figura 3.13).

Atendendo à sismicidade instrumental e histórica da região, e considerando o potencial de cada zona de geração, as magnitudes máximas consideradas para cada zona são apresentadas na tabela 3.5. Em todas as zonas atribui-se a magnitude máxima ligeiramente acima da magnitude máxima dos catálogos. A magnitude de

8.5 escolhida para a zona 4 foi devida principalmente ao potencial sismogénico da falha da Glória, tendo em conta o sismo de 1939 de magnitude 7.0 com epicentro na extremidade oriental da falha da Glória (dentro da zona 4) e o sismo de 1941 de magnitude 8.2 que embora tenha ocorrido fora da zona 4, poderia ter tido repercussões no extremo ocidental da falha.

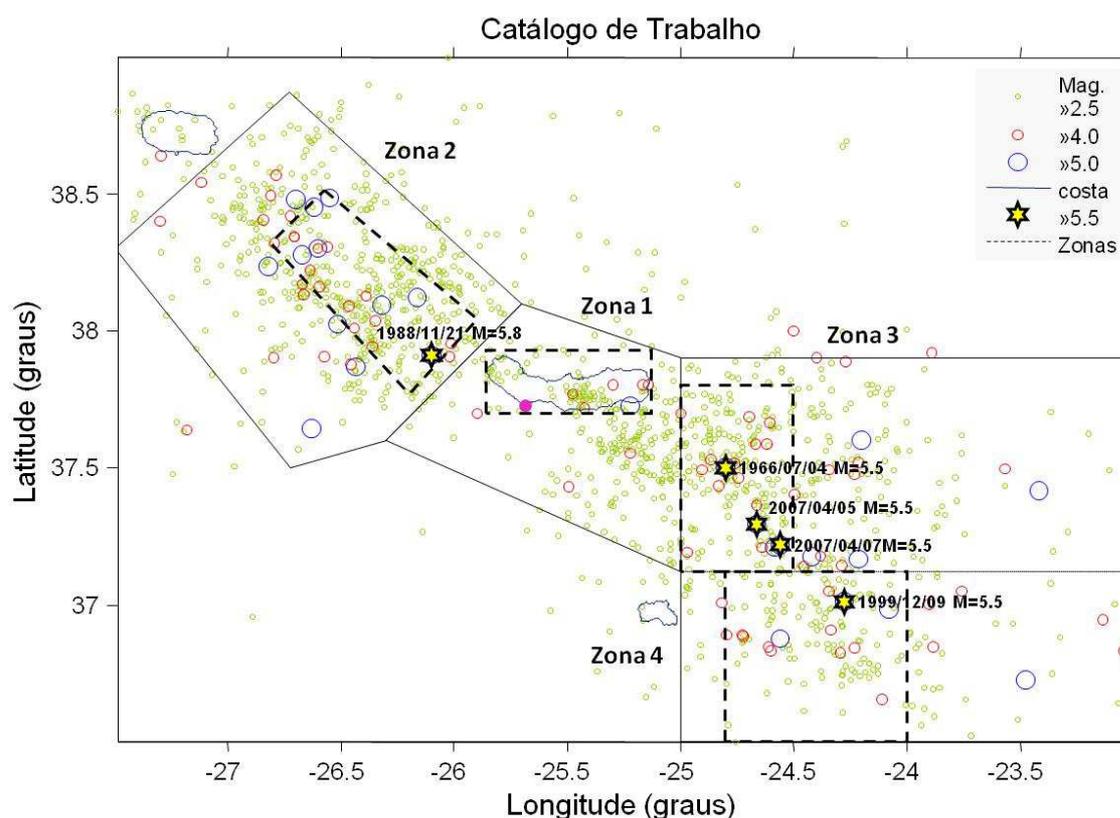


Figura 3.13: Distribuição da sismicidade do catálogo de trabalho com as respectivas zonas de selecção (traço preto) e de geração (traço tracejado). ● Ponta Delgada.

Tabela 3.5: Magnitudes máximas consideradas em cada zona

Zona	1	2	3	4
Magnitude máxima	6.0	6.5	7.0	8.5

Para cada zona, foram representadas as curvas do número acumulado de sismos anualmente em função da magnitude, de onde se pôde calcular o valor de M_c , e os valores dos parâmetros da lei de G-R, a e b -value. Foram representadas duas curvas, uma para o catálogo a partir de 1963 e outra para o catálogo a partir de 1989, de forma a poder compará-las, visto estar posto em questão a completude do catálogo de trabalho entre 1963 e 1989 (figura 3.14).

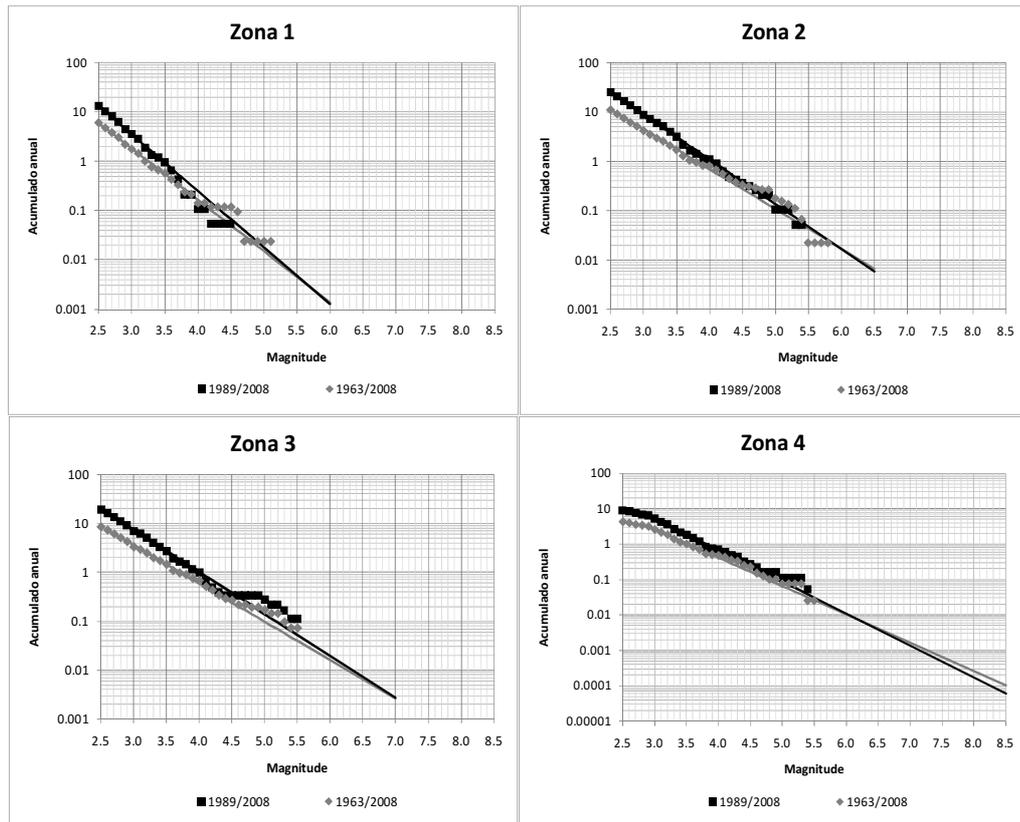


Figura 3.14: Número de sismos acumulado anualmente em função da magnitude para dois períodos distintos do catálogo (a ponteados) e respectivas curvas de G-R (a cheio).

É de notar a alteração apresentada na tendência da curva do número de sismos acumulado anualmente em função da magnitude na zona 1 entre as magnitudes 4.0 e 5.0 e na zona 3 entre as magnitudes 4.5 e 5.0. Esta alteração deve ser causada pela ausência de registo de sismos daquelas magnitudes nas respectivas zonas e não devida a erros em procedimentos operacionais de análise de registos sísmicos visto que o catálogo de trabalho para toda a área de estudo não apresenta tais alterações.

Como podemos observar na figura 3.14 as zonas 1, 2 e 3 mostram-nos que o catálogo a partir de 1989 tem uma distribuição anual de sismos dada pela lei de G-B superior à apresentada no catálogo a partir de 1963. Na zona 4, apesar de o número de sismos anual ser superior para o catálogo a partir de 1989 para magnitudes inferiores a 6.5, a distribuição anual de sismos de maior magnitude é superior para o catálogo a partir de 1963. Deste modo foi usado o catálogo a partir de 1989 para as zonas 1, 2 e 3, visto que o número anual de sismos dado pela lei de G-R é superior aos do catálogo desde 1963 para todas as magnitudes. Para a zona mais distante, a zona 4, foi usado o catálogo a partir de 1963, tendo em conta que este apresenta um maior número anual de sismos de maior magnitude. A tabela 3.6 resume os parâmetros obtidos em cada zona estando a sombreado os valores usados no cálculo da perigosidade sísmica de Ponta Delgada.

Tabela 3.6: Parâmetros de cada zona de geração

ZONAS	Ano min.	Ano max.	anos	Nº sismos	Mc	b	a (anual)
1 (cat. 1963/2008)	1965	2007	42.3	253	2.5	1.040+/-0.07	3.38
1 (cat. 1989/2008)	1989	2007	18.7	244	2.2	1.150+/-0.07	4.00
2 (cat. 1963/2008)	1963	2008	44.7	497	2.5	0.805+/-0.04	3.06
2 (cat. 1989/2008)	1989	2008	19.0	476	2.5	0.905+/-0.04	3.66
3 (cat. 1963/2008)	1966	2007	40.8	350	2.6	0.782+/-0.05	2.90
3 (cat. 1989/2008)	1989	2007	18.1	340	2.6	0.858+/-0.05	3.44
4 (cat. 1963/2008)	1967	2008	40.1	170	2.9	0.799+/-0.07	2.81
4 (cat. 1989/2008)	1989	2008	18.4	164	2.9	0.896+/-0.08	3.41

3.6 Resultados

Os valores da aceleração de pico (PGA) e da aceleração espectral (SA) aqui estimados para cidade de Ponta Delgada foram obtidos utilizando o programa

SEISRISKIII (Bender & Perkins, 1987) que incorpora o modelo de Cornell-McGuire, como já referido no capítulo 2. Para tal é necessário utilizar uma lei de atenuação adequada à região em estudo. A ausência de um número significativo de registos instrumentais, principalmente nas maiores magnitudes na região dos Açores impede, até ao momento, o estabelecimento de uma lei de atenuação específica para esta região (Carvalho *et al.*, 2001). Após a análise de diversas leis de atenuação publicadas seleccionaram-se duas: a lei de Ambraseys *et al.* (1996) por ser a que possuía um domínio de aplicação mais adequado a este estudo e a lei de Boore *et al.* (1997, 2005) que se mostrou a mais adequada para o cálculo de PGAs na região dos Açores no estudo feito por Carvalho *et al.*, (2001). Assim é possível comparar os resultados obtidos por ambas e discutir qual será a que melhor se adequa.

A lei de Ambraseys *et al.* (1996), baseada em dados europeus, apresenta as vantagens de não fazer distinção entre os tipos de mecanismo da fonte, possuir uma classificação simples dos diferentes tipos de terreno e abranger uma vasta gama de distâncias (0 – 200 km) e de magnitudes (4.0 – 7.5).

A lei de Ambraseys *et al.* (1996) para a PGA em rocha tem a seguinte forma:

$$\log(PGA) = -1.39 + 0.266M_s - 0.922\log(r) + \sigma p \quad (3.2)$$

e para terrenos duros ou macios:

$$\log(PGA) = -1.48 + 0.266M_s - 0.922\log(r) + 0.117S_A + 0.124S_s + \sigma p \quad (3.3)$$

($S_A = 1$ e $S_s = 0$ para solo duro; $S_A = 0$ e $S_s = 1$ para solo macio)

O valor de PGA vem expresso em g. M_s é a magnitude das ondas S. A distância r é calculada em km assumindo uma profundidade da fonte h_0 de 3.5 km, $r^2 = d^2 + h_0^2$, sendo d a distância superficial mais curta à fonte. O desvio padrão (σ) igual a 0.25 e $p=0$ para valores médios e igual a 1 para um percentil de 84% do intervalo de confiança.

A mesma lei para a aceleração espectral (SA) toma a forma:

$$\log(SA) = C1 + C2M_s + C4\log(r) + Ca.Sa + Cs.Ss + \sigma p \quad (3.4)$$

Com:

- Sa, Ss , parâmetros do tipo de terreno ($Sa = Ss = 0$ para rocha; $Sa = 1$ e $Ss = 0$ para solo duro; e $Sa = 0$ e $Ss = 1$ para solo macio).
- σ , desvio padrão do $\log(SA)$.
- Amortecimento = 5%.
- $C1, C2, C4, Ca, Cs, h_0$ e σ dependem do período e encontram-se tabelados na bibliografia.

A lei de Boore *et al.* (1997, 2005) baseada em dados norte americanos, faz distinção entre os tipos de mecanismo da fonte, a classificação do terreno é feita pelo valor de V_{S30} e abrange a gama de distâncias (0 – 118 km) e de magnitudes (5.2 – 7.4). Quer para PGA ou para SA tem a seguinte forma:

$$\ln(Y) = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln r + b_V \ln \frac{V_{S30}}{V_A} + \sigma_{\ln Y} \quad (3.5)$$

Com:

- M_w , magnitude momento.
- $r^2 = d^2 + h_0^2$, distância em km.
- Amortecimento = 5%.
- $b_1 = b_{ISS}$ mecanismo de desligamento; $b_1 = b_{IRS}$ mecanismo falha inversa; $b_1 = b_{IALL}$ mecanismo não especificado.
- $\sigma_{\ln Y}$, desvio padrão do $\ln(Y)$.
- $b_1, b_2, b_3, b_5, b_V, V_A, h_0$ e $\sigma_{\ln Y}$ dependem do período (T) e encontram-se tabelados na bibliografia.
- Para PGA, fazer $T=0$.
- O valor de PGA e SA vem expresso em g.

Ambas as leis encontram-se definidas para um conjunto de 46 períodos, distribuídos de forma aproximadamente logarítmica entre 0.10 s e 2.00 s, cobrindo assim os períodos de maior interesse para este estudo da perigosidade sísmica.

Neste estudo, vamos estender a validade destas leis e considerar as duas leis válidas até uma magnitude máxima de 8.5, pois é a magnitude máxima que se considerou para a zona 4. As magnitudes M_s e M_w foram consideradas idênticas às magnitudes usadas no catálogo de trabalho (magnitude local ou equivalente) cuja magnitude máxima é de 5.8. Esta aproximação é válida até uma magnitude próxima de 7.0 (Kanamori, 1983). Os cálculos foram feitos para rocha e terreno duro, por serem os tipos de terreno mais representativos da cidade. Além disso, no capítulo seguinte é avaliado o efeito do terreno que poderá, se necessário, ser introduzido posteriormente.

3.6.1 Aceleração de Pico (PGA)

Tendo em conta as distâncias das principais zonas sismogénicas à cidade de Ponta Delgada e as dimensões da mesma, decidiu-se calcular a perigosidade apenas para um ponto no centro da cidade de coordenadas (Longitude -25.669; Latitude 37.742). Os valores de PGA em rocha determinados para cada uma das leis de atenuação referidas e considerando as quatro zonas de geração descritas anteriormente, tal como o seu efeito integrado, apresentam-se nas tabelas 3.7 e 3.8. para os 4 períodos de retorno considerados:

Tabela 3.7: Valores de PGA (cm/s^2) em Ponta Delgada para rocha pela lei de Ambraseys *et al.*, (1996)

Zona	P. R. 475a	P.R. 950a	P.R. ~1900a	P.R. ~3800a
1 (S. Miguel)	184.2	224.4	265.6	307.7
2 (Bacia de Hironelle e Banco D. João de Castro)	57.8	64.7	72.5	79.4
3 (Bacia da Povoação e Formigas)	49.0	54.9	60.8	67.6
4 (Falha da Glória)	31.4	37.2	45.1	53.9
Todas	184.2	224.6	265.7	308.0

Tabela 3.8: Valores de PGA (cm/s^2) em Ponta Delgada para rocha pela lei de Boore et al. (1997, 2005)

Zona	P. R. 475a	P.R. 950a	P.R. ~1900a	P.R. ~3800a
1 (S. Miguel)	175.4	214.6	255.8	300.9
2 (Bacia de Hironnelle e Banco D. João de Castro)	95.1	109.8	124.5	141.1
3 (Bacia da Povoação e Formigas)	82.3	95.1	108.8	123.5
4 (Falha da Glória)	50.0	59.8	71.5	84.3
Todas	178.4	215.6	256.8	300.9

Observando os resultados de PGA obtidos para rocha com cada uma das leis de atenuação, verifica-se que são muitos próximos para a zona 1, havendo uma maior diferença nas zonas 2, 3 e 4 onde os valores obtidos com a lei de Boore *et al.* (1997, 2005) são superiores. O efeito global é dominado pela zona 1 ou seja pela sismicidade registada na ilha de S. Miguel, sendo a contribuição das restantes zonas muito pequena.

Os valores de PGA obtidos para terreno duro, usando ambas as leis de atenuação e considerando igualmente as quatro zonas de geração, tal como o seu efeito integrado, apresentam-se nas tabelas 3.9 e 3.10, para os 4 períodos de retorno considerados:

Tabela 3.9: Valores de PGA (cm/s^2) para terreno duro em Ponta Delgada pela lei de Ambraseys *et al.* (1996)

Zona	P. R. 475a	P.R. 950a	P.R. ~1900a	P.R. ~3800a
1 (S. Miguel)	197.0	240.1	283.2	327.3
2 (Bacia de Hironnelle e Banco D. João de Castro)	61.7	69.6	77.4	84.3
3 (Bacia da Povoação e Formigas)	51.9	58.8	65.7	72.5
4 (Falha da Glória)	33.3	40.2	49.0	57.8
Todas	197.2	240.0	283.3	327.5

Tabela 3.10: Valores de PGA (cm/s^2) para terreno duro em Ponta Delgada pela lei de Boore *et al.* (1997, 2005)

Zona	P. R. 475a	P.R. 950a	P.R. ~1900a	P.R. ~3800a
1 (S. Miguel)	199.9	244.0	292.0	343.0
2 (Bacia de Hironnelle e Banco D. João de Castro)	105.8	122.5	140.1	159.7
3 (Bacia da Povoação e Formigas)	93.1	107.8	123.5	140.1
4 (Falha da Glória)	55.9	67.6	80.4	96.0
Todas	202.9	246.0	293.0	344.0

Como se verifica, também para terreno duro o efeito global é dominado pela sismicidade registada na ilha de S. Miguel. Contudo pode observar-se que o efeito das restantes zonas torna-se um pouco mais significativo com a lei de Boore *et al.* (1997, 2005) para ambos os terrenos. Os resultados obtidos usando as duas leis de atenuação escolhidas são bastante aproximados, havendo uma diferença mais acentuada nos valores de PGA para rocha.

3.6.2 Aceleração Espectral (SA)

A aceleração espectral (SA) obtida (com amortecimento de 5%), quer para rocha quer para terreno duro, para o mesmo ponto no centro da cidade e para os mesmos períodos de retorno considerados anteriormente estão representados graficamente nas figuras 3.15. e 3.16 que ilustram o efeito conjugado de todas as zonas de geração.

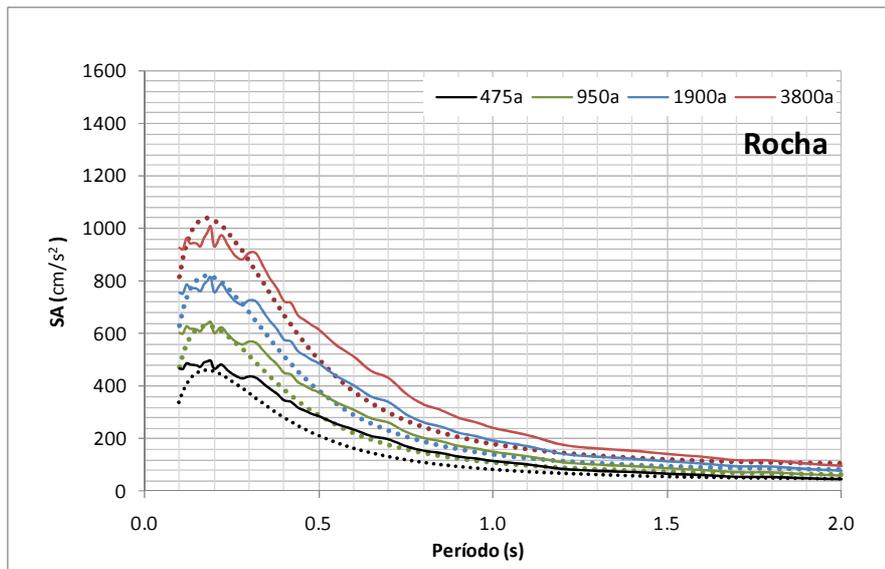


Figura 3.15: Aceleração espectral (SA) em rocha, calculada para Ponta Delgada usando o efeito integrado de todas as zonas de geração. Lei de Ambraseys *et al.* (1996) a cheio; lei de Boore *et al.* (1997, 2005) a ponteadado.

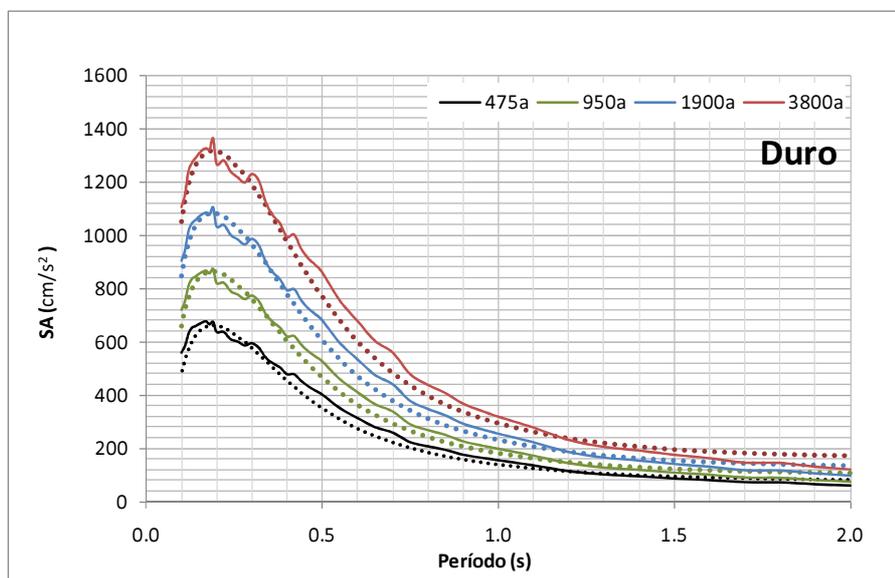


Figura 3.16: Aceleração espectral (SA) em terreno duro, calculada para Ponta Delgada usando o efeito integrado de todas as zonas de geração. Lei de Ambraseys *et al.* (1996) a cheio; lei de Boore *et al.* (1997, 2005) a ponteadado.

Também os resultados em termos de aceleração espectral obtidos com as duas leis de atenuação consideradas são bastantes próximos, principalmente para terreno duro. Contudo, para rocha e entre os períodos 0.3 e 0.8 os valores obtidos com a lei de Ambraseys *et al.* (1996) são cerca de 100 cm/s^2 superiores aos obtidos com a lei de Boore *et al.* (1997, 2005).

Os resultados obtidos associados a um período de retorno de 475 anos foram comparados com os valores espectrais recomendados pelo Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (EC8, 2010) para o arquipélago dos Açores (ação sísmica tipo II) para edifícios comuns (classe de importância II) para 5% de amortecimento (ver figura 3.17). É de notar que a referência a rocha e terreno duro referido até aqui corresponde, segundo a classificação do EC8 a terrenos do tipo A e B respectivamente.

Verifica-se assim que os valores espectrais obtidos encontram-se abaixo dos valores espectrais recomendados, sendo a diferença para rocha cerca de 100 cm/s^2 e para terreno duro de 50 cm/s^2 .

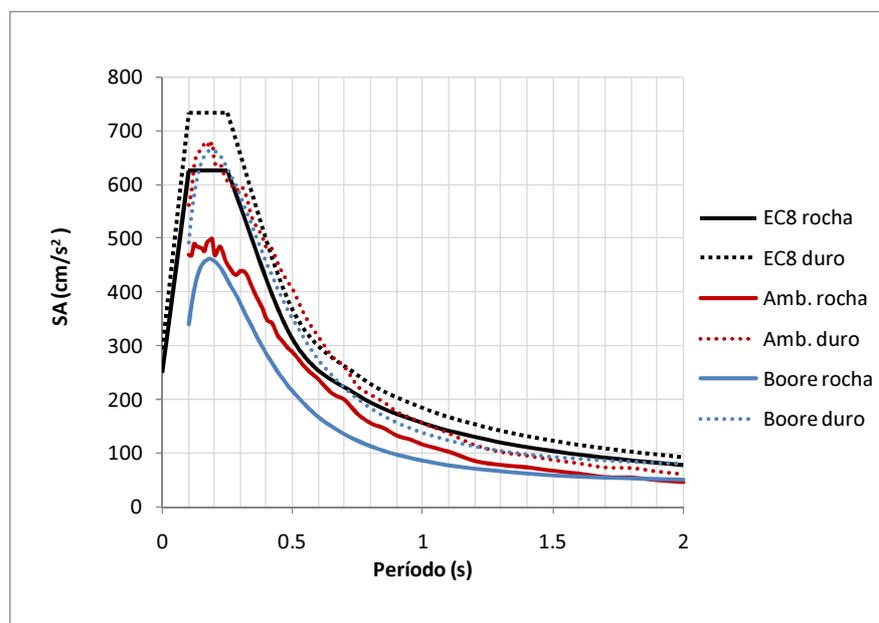


Figura 3.17: Comparação da resposta de aceleração obtida para Ponta Delgada com os espectros de resposta recomendados pelo Anexo Nacional do EC8.

Capítulo 4: Caracterização dos Terrenos de Ponta Delgada

4.1. Introdução

A caracterização geológica e geotécnica dos terrenos numa zona urbana e a quantificação da sua resposta face a uma acção sísmica é um parâmetro fundamental para a construção de cenários de danos fiáveis.

A pesquisa feita sobre informação da geologia superficial de Ponta Delgada revelou que a informação geológica e geotécnica existente é muito escassa. Recentemente, no âmbito do projecto COMICO onde se inseriu este trabalho foi desenvolvida uma carta da geologia de Ponta Delgada na escala 1:10 000, permitindo caracterizar com mais detalhe a geologia superficial da cidade. Contudo, convém realçar os trabalhos publicados por Ferreira (2000), Forjaz *et al.* (2001) e Malheiro & Nunes (2007), bem como a carta geológica 1: 50 000 da ilha de S. Miguel (Zbyszewski *et al.*, 1958, 1959; Zbyszewski 1961). Todos estes trabalhos referem a geologia da cidade de Ponta Delgada embora com um carácter mais geral (isto é, com pouco detalhe).

Devido ao seu enquadramento geológico, a cidade apresenta uma litologia bastante heterogénea, facto que dificulta bastante a realização de um possível zonamento geotécnico.

Neste contexto o estudo da caracterização dos terrenos da zona urbana de Ponta Delgada foi conseguido através de:

(1) Um zonamento baseado,

- na informação geológica e geotécnica disponível;
- na análise das frequências de pico das razões espectrais H/V.

(2) Uma análise 1D da resposta de cada tipo de terreno identificado no zonamento.

Convém aqui salientar que o estudo dos terrenos de Ponta Delgada foi elaborado antes da publicação do Anexo Nacional da Norma Portuguesa NP EN 1998-1 do EC8 (2010), pelo que se farão no final deste capítulo algumas considerações de forma a estabelecer uma comparação com os tipos de terrenos apresentados no EC8 (2010).

4.2. Caracterização Geológica e Geotécnica

Ponta Delgada encontra-se edificada numa região da ilha de S. Miguel (Região dos Picos) que é marcada pela existência de inúmeras escoadas lávicas e cones de escórias, para além de depósitos pomíticos expelidos pelos vulcões do Fogo e das Sete Cidades. Esses depósitos pomíticos encontram-se intercalados e a cobrir grande parte dos materiais vulcânicos gerados na Região dos Picos e apresentam espessuras muito variáveis (Queiroz *et al.*, 2007).

A carta geológica de Ponta Delgada na escala 1: 10 000, desenvolvida no âmbito do projecto COMICO, veio suprimir a falta de alguma informação detalhada sobre a geologia da cidade, figura 4.1.

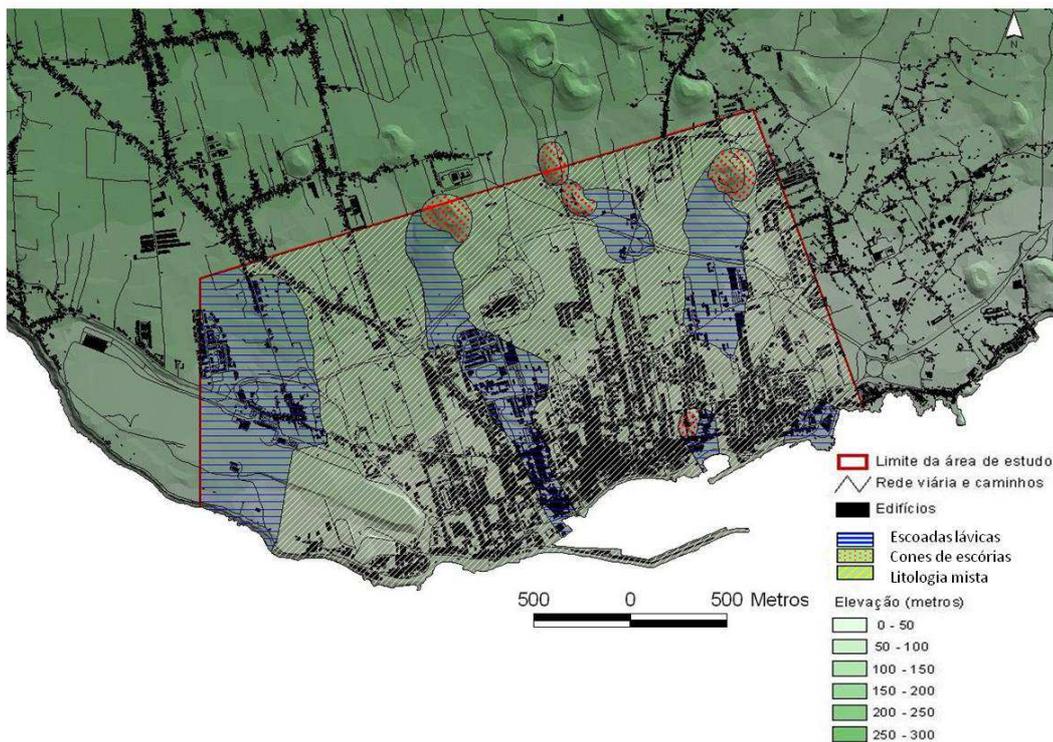


Figura 4.1: Carta da geologia superficial de Ponta Delgada (1: 10 000). O traço a vermelho é o limite da zona onde foi realizada a cartografia geológica (de Queiroz *et al.*, 2007).

Nesta carta podem distinguir-se três unidades litológicas: (1) cones de escórias: engloba todos os edifícios vulcânicos monogenéticos basálticos presentes na área de estudo; (2) escoadas lávicas: áreas em que as escoadas lávicas se encontram aflorantes e/ou em que a espessura do material pomítico subjacente é pouco significativa; e, (3) litologia mista: onde a intercalação de escoadas lávicas e depósitos pomíticos e/ou solos de cobertura ocorre em proporções semelhantes. A análise da figura 4.1 permite constatar que a maior parte da cidade de Ponta Delgada está edificada sobre zonas com litologia mista.

Para efectuar uma interpretação mais cuidada da geologia superficial, foram cedidos pela Universidade dos Açores (UA) 15 perfis geológicos interpretativos unidimensionais e 13 grupos de sondagens geotécnicas, realizadas pelo LREC (Laboratório Regional de Engenharia Civil). A localização destes perfis e sondagens encontra-se ilustrada na figura 4.2.

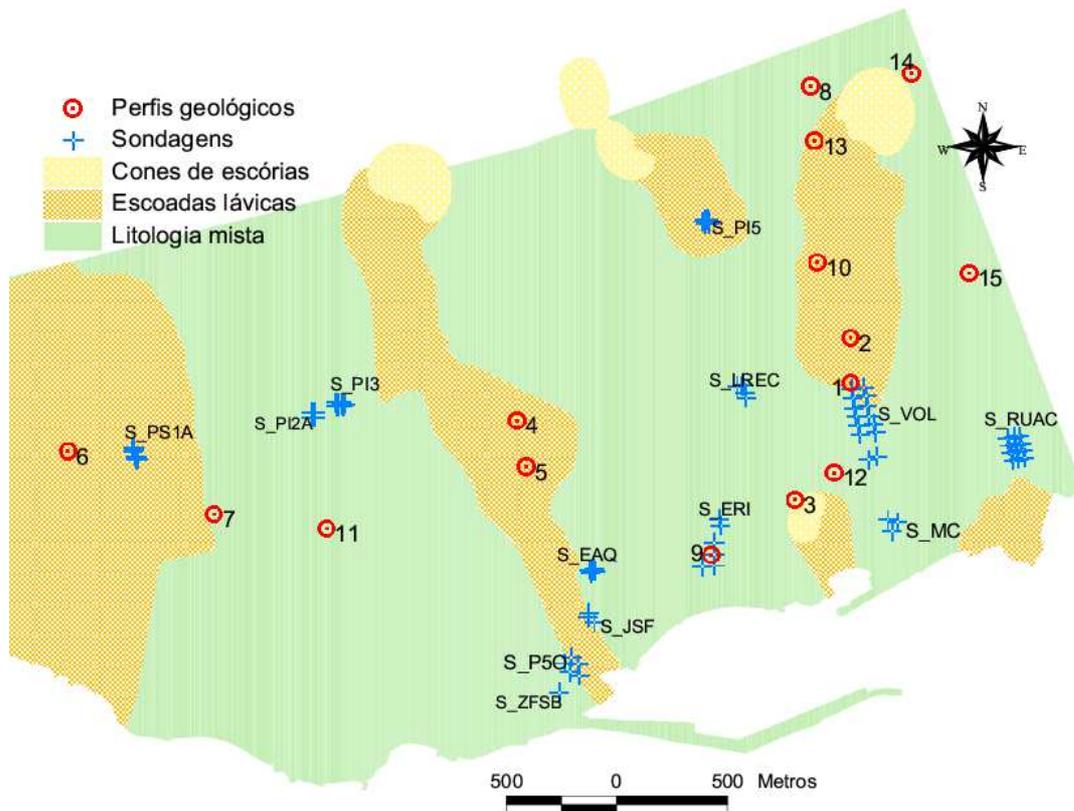


Figura 4.2: Localização dos perfis geológicos interpretativos e das sondagens geotécnicas (apresentados sobre a cartografia da litologia).

De todos os perfis geológicos interpretativos e sondagens disponibilizados, apenas um pequeno número atinge profundidades máximas de 12-15 m. Todos os outros têm profundidades inferiores, facto que dificultou bastante a caracterização das formações superficiais, obrigando a extrapolar as suas propriedades físicas até 30 metros de profundidade, para se poder classificar os terrenos de acordo com o EC8.

A maioria dos perfis e sondagens apresenta intercalações de *clinker* e escoadas basálticas encontrando-se, em muitos casos, uma ou duas camadas de material brando entre estas formações. Apesar desta consistência entre si, as camadas apresentam variadíssimas espessuras, mostrando a grande heterogeneidade dos terrenos de Ponta Delgada, podendo-se encontrar, por exemplo, sondagens com

uma camada de terreno pomítico com 6 m de espessura junto a outra sondagem onde essa camada nem sequer existe. Na tabela 4.1 está representado, a título de exemplo, o perfil geológico interpretativo 2 (ver localização na figura 4.2), onde podemos observar uma típica intercalação de depósitos pomíticos à superfície, cobrindo as escoadas basálticas.

Tabela 4.1: Exemplo perfil geológico interpretativo - Perfil 2

Espessura (m)	Descrição
0.10	Depósito de escórias basálticas
0.98	Depósito de cinzas com pedra pomes
0.10	Depósito de escórias basálticas
0.48	Depósito de cinzas com pedra pomes
2.00	Escoada basáltica sem <i>clinker</i>
0.99	Depósito de cinzas com pedra pomes
0.13	Depósito de escórias basálticas
0.46	Depósito de cinzas com pedra pomes
1.80	Escoada basáltica com <i>clinker</i> de base e de topo
0.30	Depósito de pedra pomes com cinzas
0.19	Depósito de escórias basálticas, com solo no topo.
1.34	Depósito de cinzas com pedra pomes
> 0.10	<i>Clinker</i> basáltico

Pode verificar-se que, de um modo geral, a informação contida nos perfis interpretativos e nas sondagens cedidos para este estudo está de acordo com a coluna de terreno genérica sugerida por Malheiro & Nunes (2007), para as camadas superficiais da cidade de Ponta Delgada, tabela 4.2.

Tabela 4.2: Coluna de terreno sugerida para Ponta Delgada (*adaptado de Malheiro & Nunes 2007*)

Espessura Média (m)	Descrição
0.4 - 0.6	Solo de cobertura
0.0 - 3.0	Solo pomítico castanho por vezes com intercalações piroclásticos basálticos, habitualmente de grão fino
1.0 - 3.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basaltos
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 1.0	<i>Lapilli</i> ou cinzas vulcânicas
1.0 - 2.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basaltos
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basaltos
0.0 - 1.0	<i>Clinker</i>

Como se pode observar na tabela 4.2, a coluna de terreno é composta por uma camada superficial de material mais brando seguido de intercalações de clinker e basalto, e onde se pode encontrar uma camada de material brando (*Lapilli* ou cinzas vulcânicas) entre estes.

A tabela 4.3 apresenta a classificação geotécnica proposta por Forjaz *et al.* (2001) para os terrenos dos Açores, de forma a ser comparada em termos genéricos com as classificações preconizadas nos novos regulamentos para definição da acção sísmica, designadamente do EC8 (2010). As camadas sugeridas anteriormente enquadram-se nos grupos I e III da classificação geotécnica proposta por estes autores.

Tabela 4.3: Classificação geotécnica dos terrenos no Arquipélago dos Açores (Forjaz *et. al.*, 2001)

Grupo	Subgrupo	Descrição
Duro (I)	I a	Escoadas lávicas traquíticas <i>s.l.</i> (incluindo domos)
	I b	Escoadas lávicas basálticas <i>s.l.</i>
	I c	Ignimbritos soldados
	I d	Tufos surtseianos (hialoclastitos)
Intermédio (II)	II a	Ignimbritos não soldados e <i>lahars</i>
	II b	Depósitos de vertente, aluviões e areias de praia
Brando (III)	III a	Pedra pomes e materiais pomíticos indiferenciados
	III b	Escórias Basálticas <i>s.l.</i> (“bagacina”)

4.3. Registos de Vibrações Ambientais

A utilização de registos de vibrações ambientais para caracterizar o comportamento sísmico do terreno e consequente estimativa de efeitos de sítio, em particular para a estimativa da frequência natural dos terrenos, tem sido uma técnica de microzonagem realizada em muitas cidades. Para uma análise desta natureza é necessário definir uma malha de pontos de registo, ao longo da zona urbana a estudar, e analisar a frequência de pico das razões espectrais H/V podendo, posteriormente, ser feito um zonamento de acordo com os valores observados de frequências de pico.

4.3.1 Aquisição

O trabalho de campo de aquisição de registos de vibrações ambientais em vários pontos da cidade de Ponta Delgada foi realizado durante uma campanha experimental, em Junho de 2005, no âmbito do projecto COMICO (Silvestre *et al.*, 2006).

Foram seleccionados 243 pontos distribuídos pelas ruas das freguesias de São Pedro, S. Sebastião (Matriz), São José e Santa Clara, com um espaçamento aproximado de 200 m, tendo-se densificado um pouco a malha na parte central da cidade (~100 m). Os registos foram maioritariamente obtidos de Segunda a Domingo, durante o dia. Efectuaram-se, no entanto, algumas medições durante a noite em ruas de grande movimento. O equipamento utilizado na aquisição dos dados foi composto por 4 estações sísmicas, duas Cityshark e duas Marslite, equipadas com sismómetros Lennartz de 1Hz de 3 componentes. A duração de cada registo foi de 15 minutos e utilizaram-se as taxas de amostragem de 100 Hz (estações Cityshark) e 62,5 Hz (estações Marslite).

4.3.2 Análise

Estes dados foram primeiramente analisados por Silvestre *et al.* (2006), utilizando o software JSesame desenvolvido no projecto europeu Sesame (Sesame, 2003). No âmbito deste trabalho, realizou-se a reanálise destes dados utilizando usando o *software* Geopsy (Geopsy, 2008), desenvolvido mais recentemente.

Numa primeira fase seleccionam-se, manual e/ou automaticamente (utilizando um algoritmo anti-trigger STA/LTA), as janelas mais estáveis para realizar a análise das vibrações ambientais. De seguida, e utilizando apenas as janelas seleccionadas, calcularam-se os espectros de amplitude de Fourier das três componentes que, depois de alisados através da função de Konno & Ohmachi (1998), se utilizam para calcular as razões H/V, onde H é a média quadrática das componentes horizontais. A razão H/V final é a média de todas as H/V determinadas para cada janela, apresentando-se também o respectivo desvio padrão, figura 4.3.

A frequência natural do terreno (f_0) corresponde ao pico da curva H/V, sendo o valor mais fiável quanto maior é a definição do pico. Quanto à amplitude do pico (A_0), não pode ser associada directamente a nenhuma informação, embora possa ser um indicador do contraste de impedância sísmica dum determinado local: sabe-se

que grandes valores da amplitude do pico estão associados a grandes contrastes de velocidade de propagação das ondas transversais (Sesame, 2004).

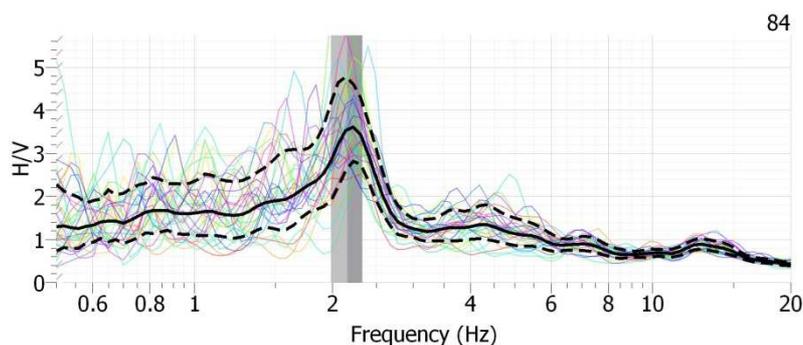


Figura 4.3: Exemplo de uma curva H/V.

Numa segunda fase foi feita a análise e interpretação das curvas H/V de forma a encontrar a frequência natural do terreno nos vários sítios, pois nem sempre existem picos claros, ou únicos, ou de origem natural ou curvas credíveis. Esta tarefa foi bastante trabalhosa e nem sempre se conseguiu obter valores conclusivos sem a ajuda de informação geotécnica ou geológica adicional. Devido à má qualidade de alguns dados, influenciados não só pelas próprias características das camadas superficiais como também pelas condições de aquisição experimental, consideraram-se válidos aos registos obtidos em 230 pontos (a localização de cada um dos registos e as respectivas curvas H/V encontram-se no anexo B).

Analisando todas as curvas H/V, decidiu-se agrupá-las em 5 conjuntos, tendo em conta a forma da curva e o valor da frequência de pico. A figura 4.4 mostra a distribuição dos valores de frequências de pico, já agrupadas, sobre a litologia da área em estudo.

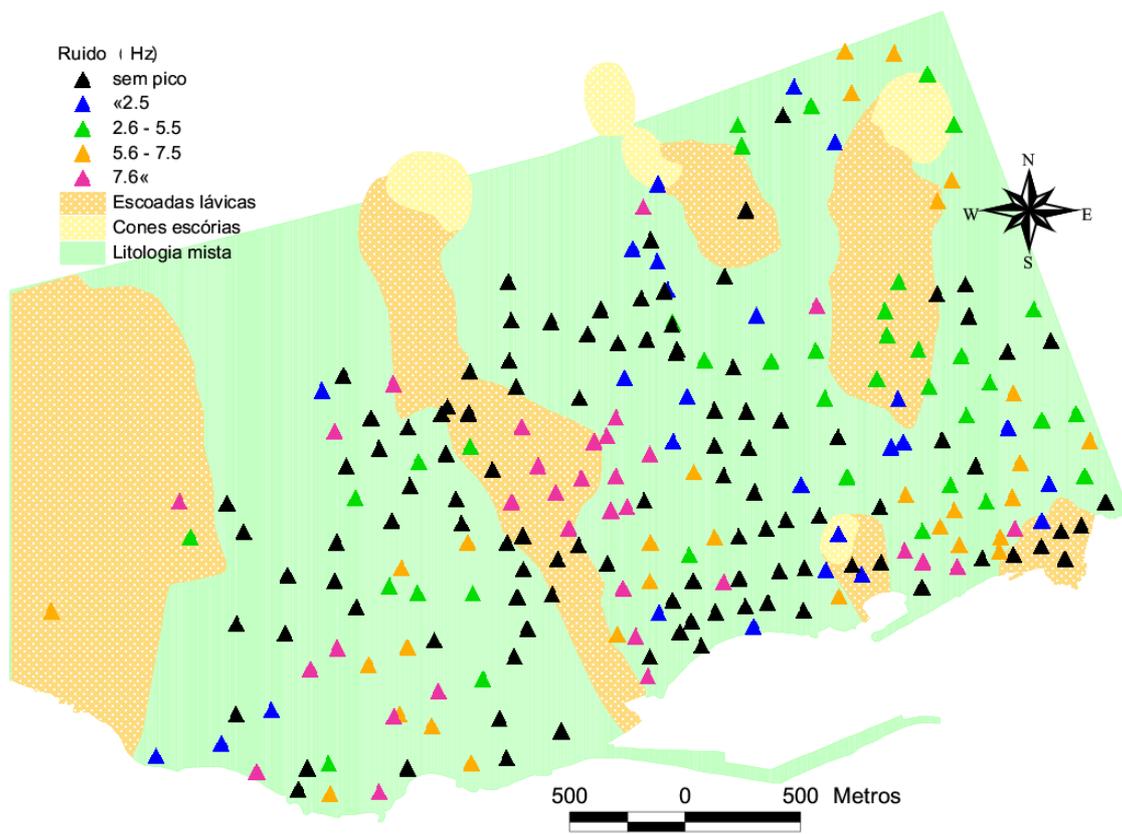


Figura 4.4: Localização dos pontos de registo de vibrações ambientais, com os valores das frequências de pico, sobre a cartografia da litologia.

Pode observar-se que na maior parte da zona central da cidade as curvas H/V não apresentam nenhum pico de frequência, com excepção da área bem definida onde as frequências de pico são superiores a 7.6 Hz. Na zona leste há uma predominância dos valores entre 2.6 Hz e 5.5 Hz. Apesar de surgirem pequenas zonas homogéneas a distribuição das frequências de pico por toda a cidade apresenta-se bastante heterogénea o que reflecte a heterogeneidade dos terrenos de Ponta Delgada.

4.4. Análise Unidimensional da Resposta dos Terrenos

A avaliação da resposta dos terrenos foi feita recorrendo ao programa comercial ProShake que permite estimar as funções de transferência de uma coluna de terreno a um determinado movimento de *input*. Simula a resposta não linear do terreno e baseia-se na aproximação linear equivalente (Schnabel *et al.*, 1972).

Utilizaram-se acelerogramas sintéticos em virtude de não existirem registos de movimentos fortes na cidade de Ponta Delgada. Devido ao reduzido número de perfis geológicos interpretativos e à falta de informação abaixo dos 15 m, as colunas de terreno utilizadas para o cálculo das funções de transferência foram estimadas em profundidade até aos 30 m, tendo sido calibradas através das curvas H/V, para os respectivos intervalos de frequência de pico.

4.4.1 Movimentos de *Input*

De acordo com o comportamento não linear do terreno, espera-se que a amplificação do movimento produzida pelo efeito do terreno não seja exactamente proporcional à amplitude do movimento sísmico de *input*. Por outro lado, se o sismo ocorrer a uma distância maior, a maior parte do conteúdo energético encontra-se nas frequências mais baixas. A amplificação máxima verifica-se quando o sismo tiver um conteúdo espectral próximo da frequência própria do terreno.

Foram pesquisadas algumas bases de dados acelerométricos (PEER Strong Motion Database; ESD European Strong Motion Database), mas não se encontrou nenhum registo que obedecesse às condições de magnitude e distância epicentral pretendidas, e que tivesse sido registado num ambiente geológico semelhante ao dos Açores. Por este motivo optou-se por utilizar acelerogramas sintéticos usando um modelo estocástico que gera acelerogramas não estacionários no domínio do tempo desenvolvido por Pousse *et al.* (2006) com base no modelo de Sabetta & Pugliese (1996) e na análise dos registos acelerográficos da rede japonesa K-net. Esta rede

consiste em cerca de mil acelerómetros de três componentes, cada um devidamente localizado e com uma caracterização geotécnica do sítio bastante completa, permitindo aos autores alcançar um modelo que reproduz razoavelmente bem os efeitos da magnitude, distância à fonte e condições do sítio (terreno). A partir do conhecimento destes três parâmetros, o modelo simula a variabilidade observada em dados reais, e calcula acelerogramas sintéticos com um conteúdo de frequências reais que podem ser integrados para obter registos em velocidade e em deslocamento.

Para a geração dos acelerogramas sintéticos e tendo em conta a distribuição da sismicidade histórica e instrumental na ilha de S. Miguel, foram considerados três fontes distintas possíveis, estando uma das fontes considerada no mar (fonte mais afastada) e duas em terra (fontes próximas). Os parâmetros destas fontes estão esquematizados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Características das fontes escolhidas para os movimentos de *input*

Fonte	Magnitude	Distância (km)	Zona sismogénica
1	6.5	33	<i>Offshore</i> (p. ex., sul do Congro, Banco Grande Norte, Bacia Hironnelle Sul)
2	6.0	22	Região do Congro
3	5.5	15	Região das Sete Cidades

4.4.2 Colunas de Terreno

As colunas do terreno representativas das condições geológicas e geotécnicas de Ponta Delgada foram construídas com base na informação sobre a litologia de cada camada, retirada dos perfis geológicos interpretativos e das sondagens

disponíveis. Cada coluna de terreno é constituída por um determinado número de camadas assente num substrato rochoso.

Para cada camada é necessário indicar a sua espessura, a velocidade de propagação das ondas S (ou o módulo de corte máximo), o peso específico e o modelo de comportamento do terreno em termos de variação do amortecimento com a deformação (curvas de amortecimento), e da razão entre o módulo de corte e o módulo de corte máximo em função da deformação (curva de redução do módulo).

Os valores de velocidade das ondas S (V_S) e o peso específico de cada material encontram-se na tabela 4.5, e foram estimados com base na informação apresentada em Malheiro & Nunes (2007).

Tabela 4.5: Características dos materiais encontrados em Ponta Delgada

Material	Peso específico (kN/m^3)	V_S (m/s)
Material pomítico e depósitos piroclásticos	~ 11.0	220-550
Escoadas basálticas	~ 25.0	1000-3000
Clinker	~18.0	300-1000

Para as camadas de material pomítico adoptou-se como modelo de comportamento do terreno as curvas de redução do módulo e do amortecimento, para um índice de plasticidade igual a zero, desenvolvidas por Vucetic & Dobry (1991). Para as camadas de clinker e basalto foram usadas as curvas de redução do módulo e do amortecimento para rocha incluídas no programa Proshake por Schnabel *et al.* (1972).

Foram construídas quatro colunas representativas de 4 tipos de terreno com base, principalmente, nos materiais e espessuras das sondagens S_VOL e S_MC , e

dos perfis¹ 2, 4 e 5 (ver figura 4.2). Esta escolha deveu-se ao facto destas sondagens e perfis se localizarem onde há predominância de valores de frequência de pico específicos e que caracterizam os quatro tipos de terreno.

A resposta sísmica de cada coluna de terreno foi calculada, para os três movimentos de *input* seleccionados, obtendo-se as respectivas funções de transferência. Essas funções de transferência foram posteriormente comparadas, com as curvas H/V calculadas para o mesmo local (ou mais próximo possível) a partir da análise das vibrações ambientais registadas.

A falta de informação a partir dos 15 m de profundidade obrigou a uma estimativa das características das colunas de terreno até à profundidade de 30 m. Assim foram-se associando progressivamente mais camadas em profundidade com uma estrutura semelhante à observada a menor profundidade, atribuindo-lhes propriedades médias, até se ajustar a função de transferência com a curva H/V. Este procedimento permitiu estimar o valor de V_{S30} (velocidade média das ondas S através dos 30 m superficiais) possibilitando, deste modo, a classificação dos terrenos segundo o EC8.

Apresentam-se, seguidamente, as características e descrição dos 4 tipos de terreno identificados em Ponta Delgada. Para além destes foi considerado ainda o “terreno tipo 5” para a rocha.

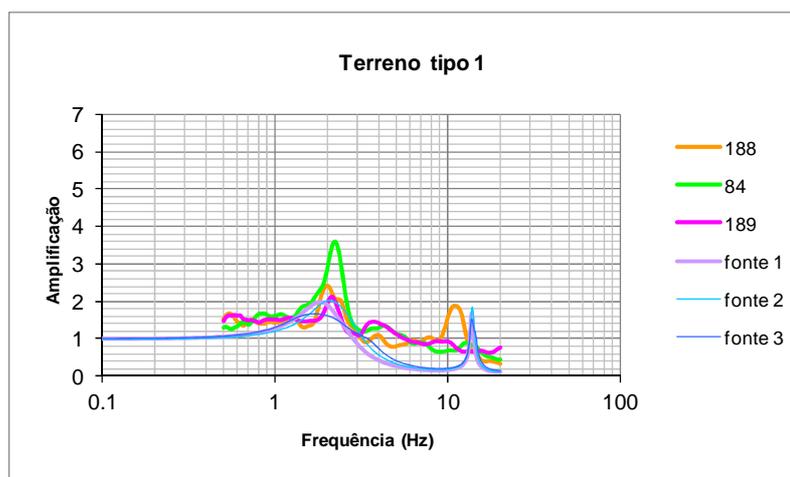
¹ Nota: Defina-se perfis como perfis geológicos interpretativos 1D.

TERRENO TIPO 1Frequência própria: ≤ 2.5 Hz

$$V_{S30} = 636.0 \text{ m/s}$$

Tabela 4.6: Coluna de terreno tipo 1

TERRENO TIPO 1		Espessura (m)	V_S (m/s)	Peso específico (kN/m^3)
Material				
Depósitos pomíticos	.....	1.0	250	11.0
Basalto	*****	4.0	800	22.0
Clinker	+++++	6.0	600	18.0
Basalto	*****	5.0	800	22.0
Clinker	+++++	4.0	600	18.0
Basalto	*****	4.0	800	22.0
Depósitos pomíticos	.....	1.0	250	11.0
Basalto	*****	5.0	800	22.0
Basalto	*****	-	1800	23.0

**Figura 4.5:** Curvas H/V obtidas nos pontos 84, 188 e 189 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.

TERRENO TIPO 2

Frequência própria: entre 2.6 e 5.5 Hz

$$V_{S30} = 497.8 \text{ m/s}$$

Tabela 4.7: Coluna de terreno tipo 2

TERRENO TIPO 2		Espessura (m)	V_s (m/s)	Peso específico (kN/m ³)
Material				
Depósitos pomíticos	.....	1.5	220	11.0
Basalto	*****	2.0	800	23.0
Depósitos pomíticos	.....	2.0	220	11.0
Basalto	*****	2.0	800	23.0
Depósitos pomíticos	.....	1.5	220	11.0
Clinker	+++++	0.5	500	18.0
Basalto+Clinker	***++	20.5	650	20.0
Basalto	*****	-	1500	23.0

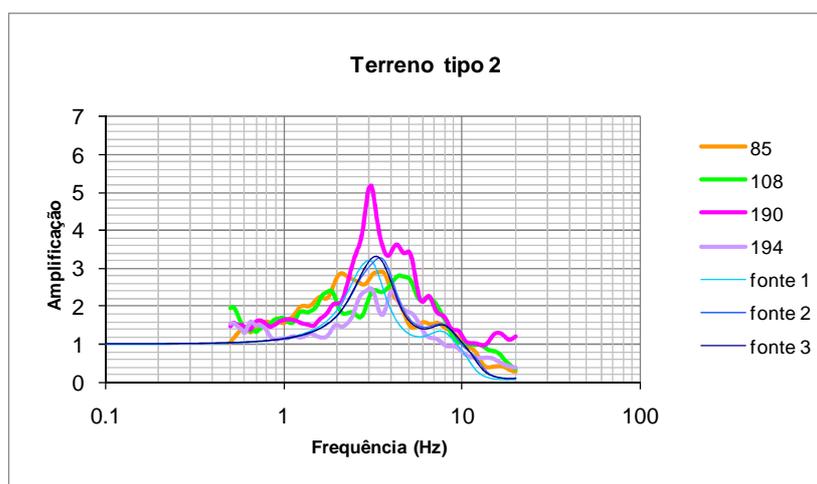


Figura 4.6: Curvas H/V obtidas nos pontos 85, 108, 190 e 194 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.

TERRENO TIPO 3:

Frequência própria: entre 5.6 e 7.5 Hz

$$V_{S30} = 547.7 \text{ m/s}$$

Tabela 4.8: Coluna de terreno tipo 3

TERRENO TIPO 3		Espessura (m)	V_s (m/s)	Peso específico (kN/m ³)
Material				
Aterro	~~~~~	3.0	180	11.0
Depósitos pomíticos	.....	0.5	250	11.0
Clinker	+++++	3.0	450	18.0
Basalto	*****	4.0	800	23.0
Clinker	+++++	4.0	450	18.0
Basalto	*****	10.0	800	23.0
Basalto	*****	-	1800	23.0

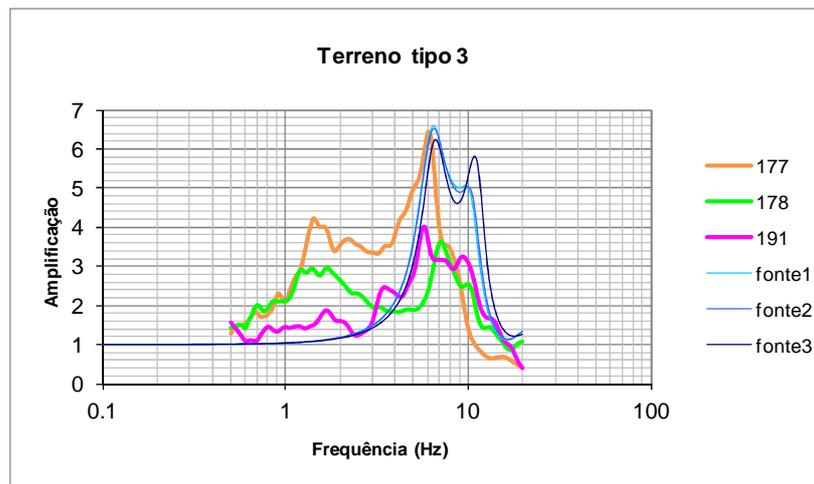


Figura 4.7: Curvas H/V obtidas nos pontos 177, 178 e 191 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.

TERRENO TIPO 4

Frequência própria: ≥ 7.6 Hz

$$V_{S30} = 835.3 \text{ m/s}$$

Tabela 4.9: Coluna de terreno tipo 4

TERRENO TIPO		Espessura (m)	V_s (m/s)	Peso específico (kN/m^3)
Material				
Depósitos pomíticos	.....	1.0	250	11.0
Clinker	+++++	2.0	500	18.0
Basalto	*****	17.0	800	23.0
Basalto	*****	-	1500	23.0

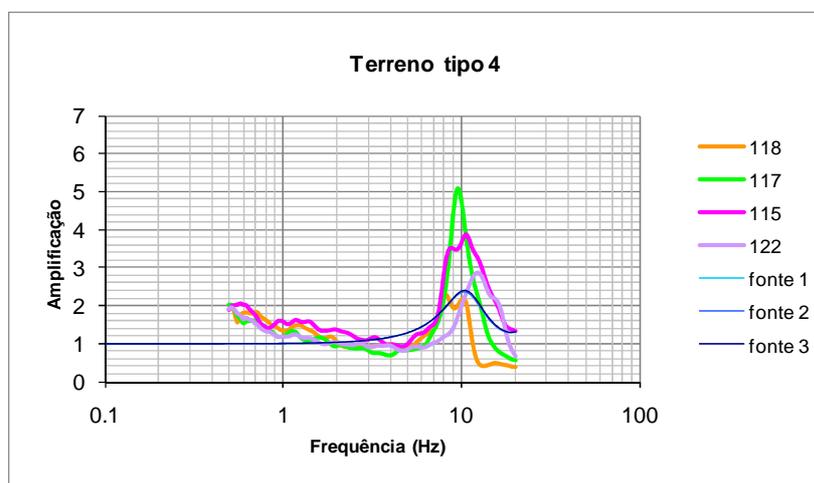


Figura 4.8: Curvas H/V obtidas nos pontos 118, 117, 115 e 122 e funções de transferência calculadas para as fontes 1, 2, e 3.

TERRENO TIPO 5

Frequência própria: Sem pico de frequência.

Terreno sem contraste com o substrato rochoso. A função de transferência de uma coluna de terreno deste tipo terá valor igual à unidade semelhante às curvas H/V determinadas a partir do ruído registado.

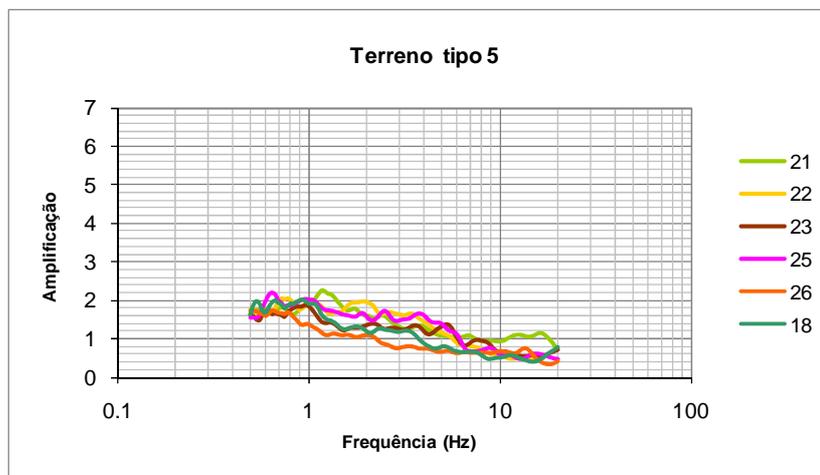


Figura 4.9: Curvas H/V obtidas nos pontos 21, 22, 23, 25, 26 e 18.

4.5. Discussão dos Resultados

De acordo com a modelação teórica, o terreno que produz maior amplificação, é o terreno tipo 3, que pode amplificar até cerca de 6 vezes o movimento em rocha na sua banda de frequência própria, entre 5.6 e 7.5 Hz. Esta amplificação está associada a existência de aterros superficiais nomeadamente na zona SE da cidade. Este comportamento poderá ser importante no caso de sismos próximos visto que, neste caso, o conteúdo do sinal sísmico é mais rico nas frequências mais altas. O tipo de terreno 2 pode amplificar o sinal sísmico entre 3 a 5 vezes, para uma frequência próxima dos 3.0 Hz.

Devido à heterogeneidade dos terrenos em Ponta Delgada, não foi possível realizar o zonamento com os 5 tipos de terreno encontrados. Deste modo optou-se por apresentar o zonamento para dois tipos de terreno, A e B, de acordo com a classificação das classes de terrenos dos Açores apresentada no Anexo Nacional do EC8 (figura 4.10). Os terrenos 1, 2 e 3 correspondem ao terreno tipo B com V_{S30} média entre 498 m/s e 636 m/s. Os terrenos 4 e 5 correspondem ao terreno tipo A, com V_{S30} acima dos 850 m/s.

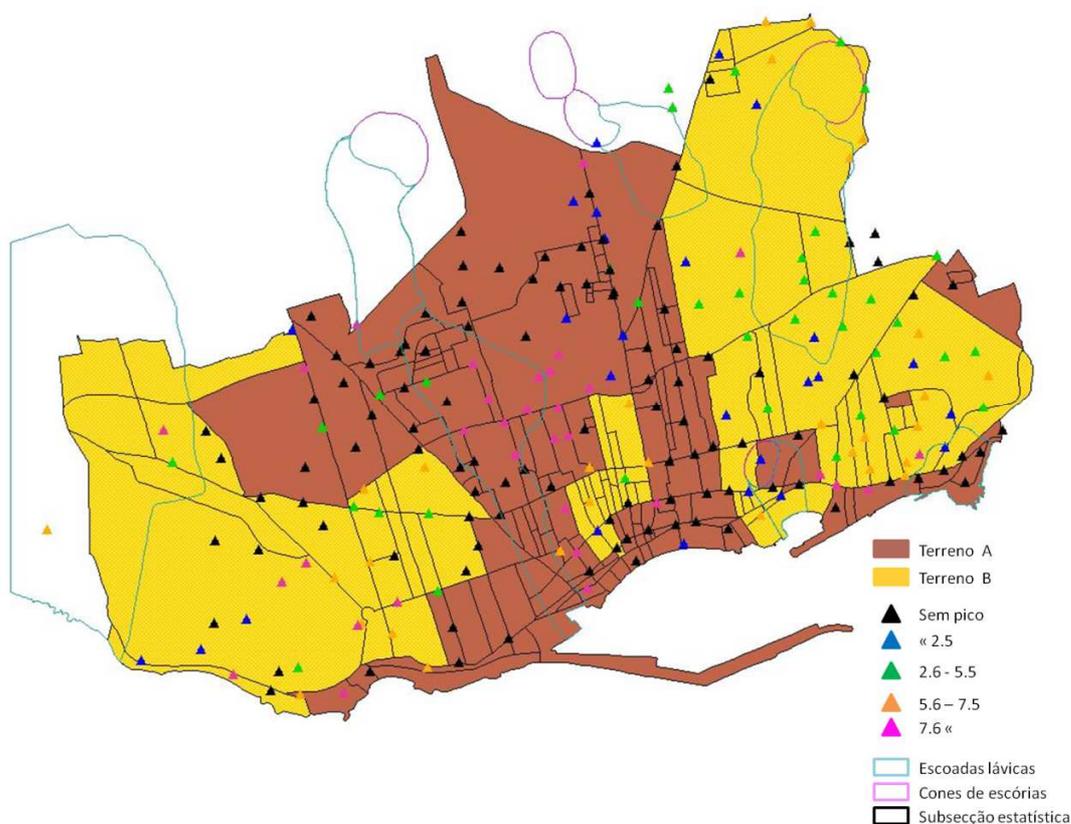


Figura 4.10: Zonamento dos terrenos para Ponta Delgada segundo a classificação expressa no EC8, Anexo Nacional.

No Anexo Nacional, são identificados 5 perfis estratigráficos para caracterizar os terrenos mais comuns presentes no arquipélago Açoriano (a descrição destes perfis encontra-se no anexo A). Os tipos de terreno encontrados neste estudo,

exceptuando os terrenos tipo 4 e 5 (rocha), encontram-se todos representados no perfil 3 do Anexo Nacional do EC8 (tabela 4.10), que é igual à coluna de terreno proposta por Malheiro & Nunes (2007) para Ponta Delgada (tabela 4.2). De facto os terrenos do tipo 2, 3, e 4 são semelhantes nas intercalações das camadas de material distinguindo-se entre si, principalmente, pela profundidade a que se encontra o substrato rochoso. O terreno do tipo 1 apresenta uma camada de baixa velocidade a uma maior profundidade que permitiu o ajuste com a curva H/V. Esta camada pode ser justificada pela presença de vazios, frequentes nesta região.

Tabela 4.10: Perfil 3 (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Espessuras das camadas (m)	Materiais das camadas
0.4 - 0.6	Solo de cobertura
2.0 - 3.0	Solo pomítico castanho, geralmente areno-siltoso ou arenoso, por vezes podendo apresentar pequenas intercalações de piroclásticos basálticos, normalmente de pequenas dimensões
1.0 - 3.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basalto
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 1.0	<i>Lapilli</i> ou cinzas
3.0 - 2.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basalto
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basalto
0.0 - 1.0	<i>Clinker</i>

Capítulo 5: Vulnerabilidade Sísmica do Edificado

5.1. Introdução

A estimativa da vulnerabilidade sísmica de uma zona urbana envolve a análise pormenorizada de centenas ou milhares de edifícios. Não se pretendendo, neste trabalho, proceder a uma análise detalhada edifício a edifício, mas sim efectuar uma abordagem mais generalizada, optou-se por classificar o edificado da área urbana de Ponta Delgada (freguesias de Sta. Clara, S. Pedro, São Sebastião e S. José) de um modo agrupado que, segundo os dados do Instituto Nacional da Estatística, INE, (Censos, 2001), é constituído por 6000 edifícios; contudo, dados da Secretaria Regional da Habitação, SRHE, indicam cerca de 8850 edifícios. Para tal foi necessário seguir uma metodologia que fosse conveniente, ou seja, encontrar um compromisso entre a informação disponível, o método aplicável e os resultados esperados.

Deste modo a metodologia utilizada nesta abordagem consistiu nos seguintes passos:

- (1) Identificar e classificar as diferentes tipologias existentes em Ponta Delgada.
- (2) Delimitar zonas de edificado homogéneo, de acordo com a classificação feita anteriormente.
- (3) Estimar a vulnerabilidade sísmica do edificado.

A vulnerabilidade sísmica foi estimada usando dois métodos diferentes, Risk-UE (nível I) e Vulneralp permitindo assim uma comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos.



Figura 5.1: Edifícios da zona urbana de Ponta Delgada.

5.2. Caracterização do Edificado

Ponta Delgada foi elevada a cidade no reinado de D. João III, conforme a carta régia de 2 de Abril de 1546, depois da primeira capital da ilha, Vila Franca do Campo, ter sido devastada pelo terramoto de 1522. É durante o século XIX que a cidade de Ponta Delgada conhece a sua época áurea devido à prosperidade económica, graças à exportação de citrinos para o Reino Unido e à fixação na cidade de numerosos comerciantes estrangeiros (Dias, 2011). Durante o século XX

a maioria dos edifícios novos construídos na cidade foram-no após 1961, estando o crescimento da cidade até essa data um pouco estagnado, figura 5.2.

Dado este contexto histórico, o parque habitacional actual de Ponta Delgada é constituído por um bom número de habitações antigas, maioritariamente do século XIX, encontrando-se ainda algumas casas nobres dos séculos XVI, XVII e XVIII. O centro urbano, ou centro histórico, é ocupado por uma mancha heterogénea de edifícios antigos, com dois a três pisos, cuja resistência à acção sísmica é bastante dúbia. A falta de conhecimento sobre quais os edifícios recuperados e que tipo de recuperação tiveram, torna impossível saber, por exemplo, se sofreram algum tipo de reforço sísmico.

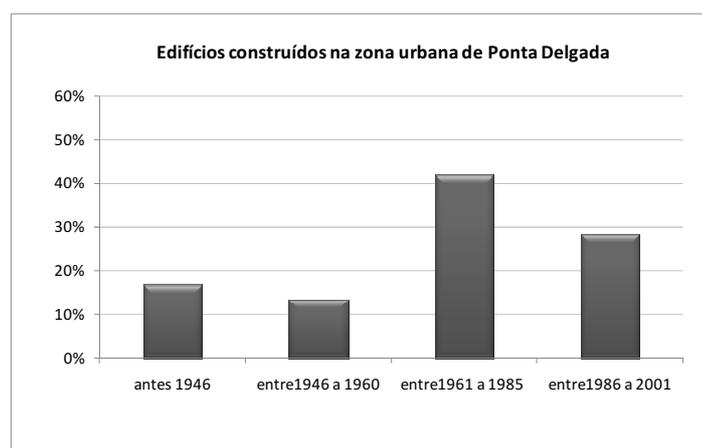


Figura 5.2: Edifícios construídos na zona urbana de Ponta Delgada durante o século XX, (dados de Censos, 2001).

Nas zonas mais periféricas, e que ocupam uma grande área da cidade, encontramos áreas residenciais mais modernas, onde os edifícios possuem um número variável de pisos, entre dois e 8 ou mais pisos, construídos maioritariamente, por betão (ver figura 5.3). Verifica-se assim que o parque edificado da zona urbana de Ponta Delgada é bastante heterogéneo e muito difícil de caracterizar sem um levantamento de campo exaustivo (o que, como já foi referido, está fora do âmbito deste trabalho).

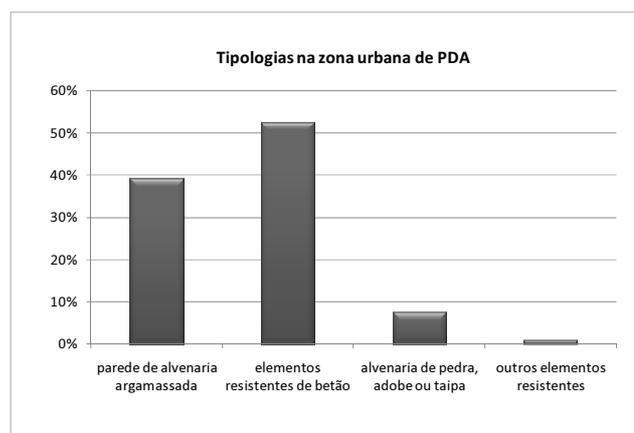


Figura 5.3: Tipologia dos edifícios da zona urbana de Ponta Delgada (dados de Censos 2001).

5.2.1 Frequências Próprias

Com o objectivo de caracterizar os edifícios de Ponta Delgada em termos das suas frequências próprias, foram feitas medidas de vibrações ambientais nalguns edifícios de betão e de alvenaria.

O trabalho experimental consistiu no registo de vibrações ambientais efectuadas durante 30 minutos, realizadas no topo e na base de cada edifício. Os registos foram obtidos usando uma estação sísmica Cityshark equipada com sismómetro Lennartz de 1 Hz, de 3 componentes, com uma amostragem de 100 Hz. O sismómetro foi colocado no umbral das varandas, ou no parapeito das janelas no caso das medições nos andares intermédios, e no terraço para as medições efectuadas no topo, orientando-se o sismómetro (d direcção Norte-Sul) paralelamente à fachada principal do edifício. Uma parte importante do levantamento experimental foi realizada em 2005 (Silvestre & Teves-Costa, 2006), tendo-se concluído o levantamento no âmbito deste trabalho.

Foram seleccionados 21 edifícios para a caracterização do edificado em termos de frequências próprias de vibração. A escolha destes edifícios teve em conta a sua idade, tipologia e utilização (habitação, comércio, serviços, etc.), de

modo a termos uma amostra representativa do edificado existente na cidade de Ponta Delgada, tomando uma particular atenção à zona histórica, onde estão concentrados a maior parte dos edifícios seleccionados. Os edifícios seleccionados foram divididos nas duas tipologias principais: alvenaria ou betão armado. Os edifícios de alvenaria na sua grande parte estão implantados no meio, ou na extremidade de um quarteirão constituído por edifícios da mesma tipologia. Quanto ao número de pisos, observa-se que os edifícios de alvenaria não ultrapassam os 4 pisos. Para os edifícios de betão armado o número de pisos varia entre os 5 e os 7 andares, existindo no entanto um edifício com 21 andares. No que diz respeito à sua implantação no quarteirão, os edifícios de betão mais elevados estão isolados enquanto os restantes estão situados na extremidade de outros edifícios.

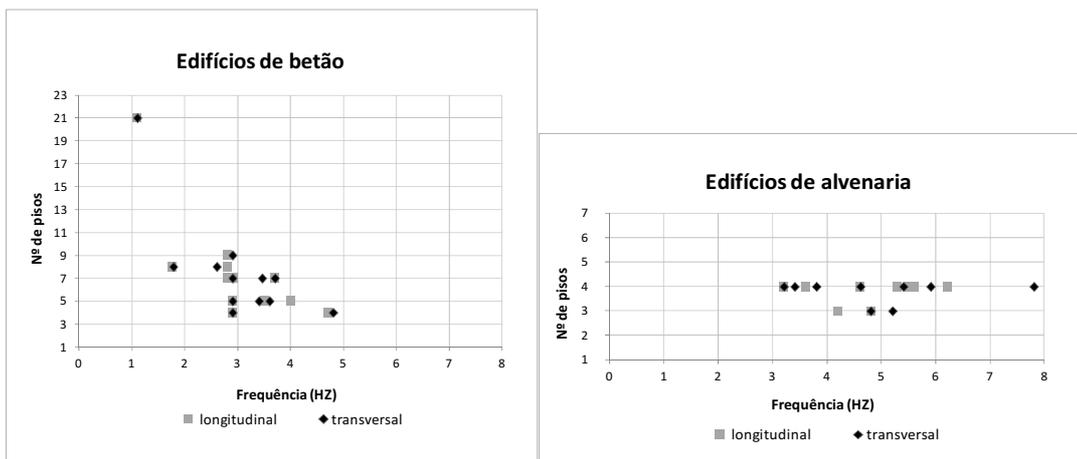


Figura 5.4: Frequência natural (longitudinal e transversal) dos edifícios de Ponta Delgada em função do número de pisos para as tipologias de betão e de alvenaria.

Como se pode observar nos gráficos da figura 5.4, os edifícios de betão têm, na sua maioria, frequências naturais entre os 2.5 Hz e 4.0 Hz (ou seja, períodos, T, entre 0.2 s e 0.4 s) notando-se uma tendência para a frequência diminuir com o aumento do número de pisos. A mesma tendência não se verifica nos edifícios de alvenaria, onde a frequência para os edifícios de três e quatro pisos varia entre 3 Hz e 6 Hz (T entre 0.2 s e 0.3 s).

5.2.2 Classificação do Edificado

Não havendo nenhum estudo anterior que envolvesse uma classificação do edificado a um nível estrutural e/ou tipológico, foi necessário recorrer a diversas fontes de informação de forma a construir uma base de dados com informação útil para se proceder a uma classificação simples do edificado.

Deste modo os processos de identificação e classificação foram baseados em:

- Informação urbanística em formato SIG fornecida pelas autoridades locais, nomeadamente pela SRHE (Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos).
- Informação urbanística fornecida pelo INE (Instituto Nacional de Estatística).
- Inquéritos distribuídos e preenchidos pela população.
- Campanhas de campo de observação do edificado, realizadas em diferentes zonas da cidade, com respectivo registo fotográfico.

A cartografia digital em formato SIG da cidade de Ponta Delgada, cedida pela SRHE, contém informação edifício a edifício sobre o endereço, número de pisos, tipo de utilização, tipo de cobertura, estado de conservação, existência ou não de varandas e de que tipo, entre outros sem relevância para este estudo. Não contém informação sobre o tipo de material de construção nem a data de construção.

A informação fornecida pelo INE (Censos, 2001) em tabelas e/ou em formato SIG, traduz as características do edificado em cada subsecção estatística, e não caracteriza edifício a edifício. Em cada subsecção estatística (que corresponde, aproximadamente, a um quarteirão), a informação mais relevante para este estudo diz respeito à tipologia construtiva dos edifícios e explicita o número de edifícios construídos (não especificando quais):

- Com elementos resistentes em betão, com paredes de alvenaria, com paredes de alvenaria de pedra ou adobe e com outros elementos resistentes.
- Em diferentes períodos de tempo desde “antes de 1919”, “1919 a 1945”, “1946 a 1960”, “1961 a 1970”, “1971 a 1980”, “1981 a 1985”, “1986 a 1990”, “1991 a 1995” e “1996 a 2001”.
- Com, “1 ou 2 pisos”, “3 ou 4 pisos” e com “mais de 5 pisos”.

Foram distribuídos à população cerca de 400 inquéritos, através de escolas de ensino básico, secundário e profissional, tendo sido devolvidos apenas 160, 138 dos quais foram considerados válidos. As questões feitas no inquérito (que se apresenta no anexo C) foram simples, directas e de escolha múltipla (bastava assinalar a resposta correcta). Os parâmetros estruturais questionados foram: material de construção, estado de conservação exterior e interior, tipo de cobertura, inclinação do terreno, posição do edifício no quarteirão, diferença de alturas entre edifícios vizinhos, material utilizado entre andares, regularidade vertical e em planta, alterações na estrutura, existência de arcadas e/ou galerias no primeiro piso, elementos salientes e época de construção. Seleccionaram-se os seguintes períodos de construção, tomando em consideração a informação disponível e os regulamentos de construção sísmo-resistente:

- **Antes de 1935** - Em 1935 ocorreu um sismo que causou grandes danos na zona da Povoação e que se estenderam a quase toda a zona centro-leste de S. Miguel, o que poderá ter provocado uma alteração nas técnicas construtivas.
- **Entre 1935 e 1958** – O 1º regulamento sísmo-resistente surge em 1958.
- **Entre 1958 e 1983** - Desde 1983 que está em vigor o regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes (RSA, 1983).
- **Entre 1983 e 2001**- Os edifícios construídos até 2001 devem encontrar-se nos Censos 2001.
- **Depois de 2001.**

Os resultados das principais questões abordadas no inquérito estão representados nos gráficos da figura 5.5.

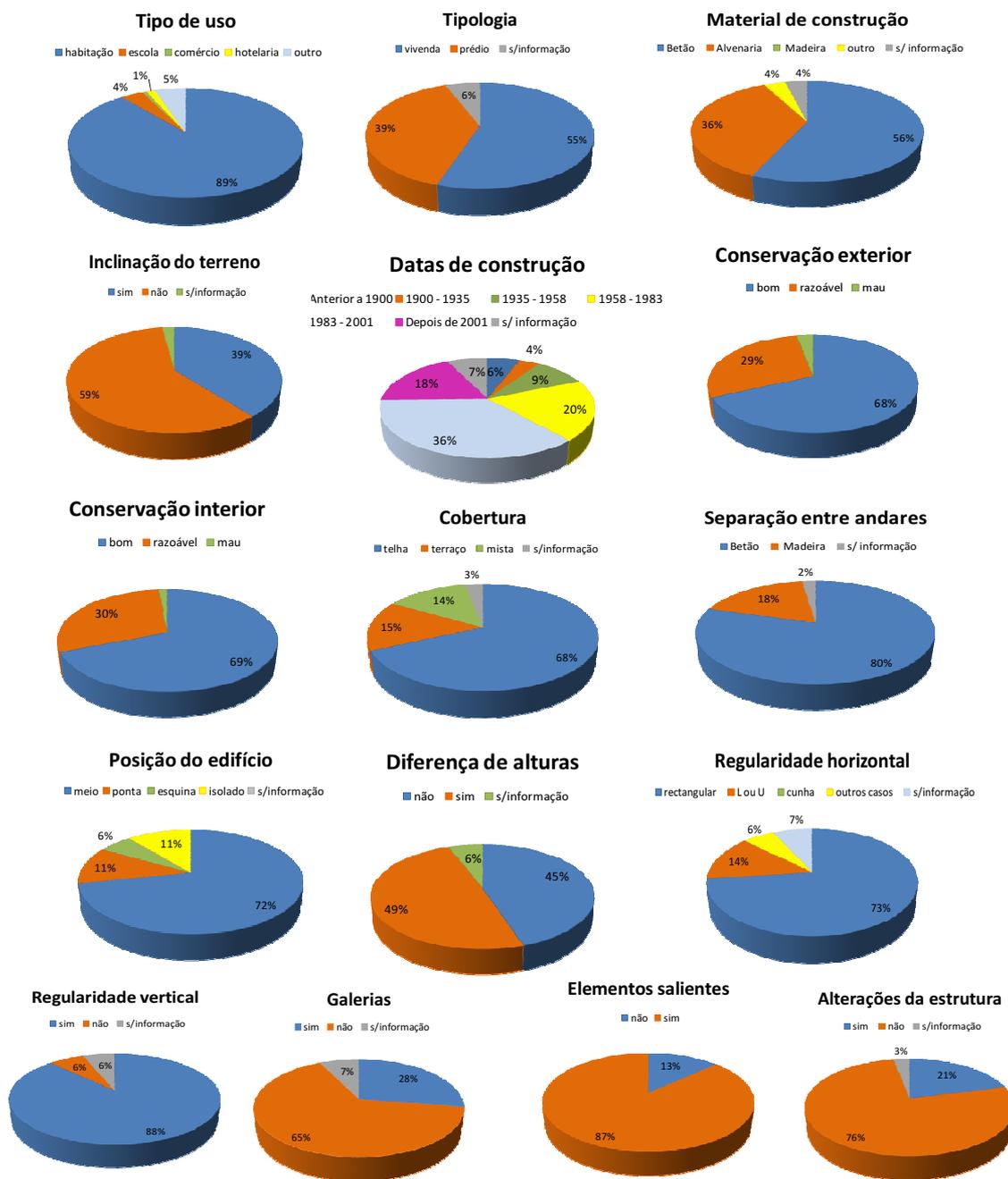


Figura 5.5: Resultados do inquérito feito à população para o estudo da vulnerabilidade sísmica do edificado da cidade de Ponta Delgada.

O inquérito seria uma “solução” ótima para preencher algumas lacunas existentes nos dados se tivesse sido feito a um maior número de inquiridos. Contudo, as poucas respostas obtidas ajudaram a caracterizar determinadas zonas, tornando possível estimar datas de construção e alguns parâmetros estruturais.

O trabalho de campo realizado por toda a cidade permitiu caracterizar exteriormente a quase totalidade do edificado, conseguindo-se principalmente: (i) retirar informação sobre o estado de conservação exterior; (ii) identificar bairros onde o edificado é uniforme (em número de pisos, em tipologia e em época de construção); e (iii) obter informação sobre o edificado recentemente construído e que não se encontra nas bases de dados referidas anteriormente.

Alem disso, o trabalho de campo serviu de suporte para sempre que necessário avaliar a qualidade da informação contida nas bases de dados disponíveis e, sobretudo, da informação retirada dos inquéritos. Também permitiu a construção de uma base de dados fotográfica onde estão registados os edifícios de cada rua da cidade.

A informação sobre a posição dos edifícios relativamente ao quarteirão foi obtida por análise visual da cartografia.

Tendo em conta toda a informação disponível, identificaram-se as seguintes tipologias na cidade de Ponta Delgada:

- Edifícios de alvenaria, geralmente com 1 a 2 pisos (figura 5.6-A).
- Edifícios de alvenaria com separação entre andares em madeira ou betão, geralmente com 2 a 3 pisos (figura 5.6-B).
- Edifícios de betão, com enchimento em alvenaria, geralmente com 2 pisos (figura 5.6-C).
- Edifícios de betão, geralmente com 4 ou mais pisos (figura 5.6-D).
- Edifícios históricos (igrejas, palacetes, etc.), que não foram considerados neste estudo (figura 5.6-E).



A



B



C



D



E

Figura 5.6: Classificação do edificado de Ponta Delgada. A- alvenaria de 1 a 2 pisos; B- alvenaria de 2 a 3 pisos; C- betão com enchimento de alvenaria com 2 pisos; D- betão com 4 ou mais pisos; E- Edifícios históricos.

5.2.3 Zonamento

Todo o edificado de Ponta Delgada foi agrupado de modo a definir zonas onde o edificado fosse o mais homogêneo possível em relação à sua tipologia,

número de pisos e época de construção. Deste modo identificaram-se quatro zonas caracterizadas do seguinte modo (figura 5.7):

- Zona 1: edifícios maioritariamente de alvenaria com 2 a 3 pisos, correspondendo à zona mais antiga de cidade.
- Zona 2: edifícios maioritariamente de alvenaria com 1 a 2 pisos.
- Zona 3: edifícios maioritariamente de betão com 4 ou mais pisos.
- Zona 4: edifícios maioritariamente de betão com 2 pisos.

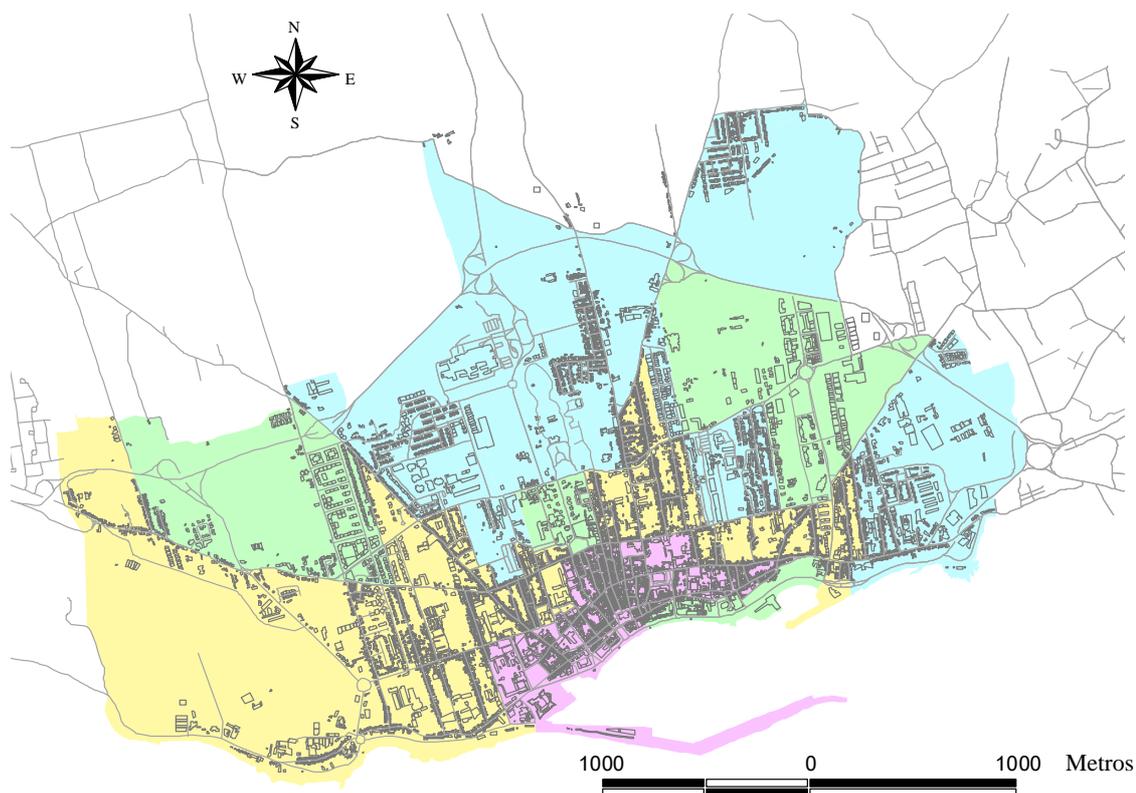


Figura 5.7: Edifícios do centro urbano de Ponta Delgada. ● Zona 1- edifícios de alvenaria com 2 a 3 pisos; ● Zona 2- edifícios de alvenaria com 1 a 2 pisos; ● Zona 3 - edifícios de betão com 4 ou mais pisos; ● Zona 4 - edifícios de betão com 2 pisos.

Nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 encontram-se, respectivamente, a percentagem das tipologias base, do número de pisos e das datas de construção dos edifícios em cada zona.

Tabela 5.1: Materiais de construção dos edifícios em cada zona (tipologias)

Zona	Betão	Alvenaria	Alvenaria de pedra ou adobe	Outros
1	22%	65%	13%	0%
2	41%	49%	10%	0%
3	53%	32%	13%	2%
4	80%	18%	1%	1%

Tabela 5.2: Número de pisos dos edifícios em cada zona

Zona	1 piso	2 pisos	3 pisos	4 ou 5 pisos	6 ou mais pisos
1	8%	48%	36%	8%	0%
2	31%	59%	9%	1%	0%
3	11%	25%	16%	48%	10%
4	13%	74%	10%	3%	0%

Tabela 5.3: Datas de construção dos edifícios em cada zona

Zona	Antes de 1946	1946 a 1960	1961 a 1985	1986 a 2001
1	38%	9%	26%	27%
2	20%	18%	41%	21%
3	17%	8%	36%	39%
4	5%	7%	49%	39%

Em virtude de não se dispor de informação suficiente, não foi possível incluir nesta classificação os edifícios construídos após 2001 e que se encontram, maioritariamente, nas zonas a norte mais periféricas da cidade. Nos últimos anos tem-se verificado um elevado crescimento da cidade; contudo, esses edifícios construídos mais recentemente, também não se encontram na base de dados disponibilizada pela SRHE.

5.3. Curvas de Vulnerabilidade Sísmica

A aproximação utilizada no presente trabalho para a análise da vulnerabilidade sísmica do edificado de Ponta Delgada é uma aproximação do nível I (já explicada no capítulo 2, secção 2.4.1.1). Neste nível é estimado um índice de vulnerabilidade que é função da tipologia do edifício e de outros factores que poderão afectar o seu comportamento sísmico. Através deste índice de vulnerabilidade é possível estimar o grau médio de danos de uma determinada tipologia, para um dado nível de intensidade do movimento do solo, o que poderá ser representado através das respectivas curvas de vulnerabilidade.

Os parâmetros estruturais analisados foram: o tipo de material de construção, a inclinação do terreno, o número de pisos, a época de construção, o estado de conservação, a posição no quarteirão, o tipo de cobertura e a regularidade horizontal e vertical.

Na análise da vulnerabilidade aqui descrita existiram algumas dificuldades em enquadrar as tipologias de Ponta Delgada dentro das tipologias pré-estabelecidas nos métodos utilizados. Estas dificuldades resultam, sobretudo, do desconhecimento da data precisa de construção para a quase totalidade dos edifícios de Ponta Delgada, da falta de informação sobre a existência ou não de pavimento de betão em casas de alvenaria, o desconhecimento sobre o tipo de paredes no interior dos edifícios de betão e da inexistência de dados que permitam fazer a distinção entre as tipologias de alvenaria de pedra e adobe.

5.3.1 Método Risk-UE

Para cada tipologia de edifícios, este método estima o valor de um índice de vulnerabilidade total, \overline{IV} , que é a soma do índice de vulnerabilidade geral da tipologia, IV^* , com o acréscimo ΔV_m (positivo ou negativo), que resulta da

identificação de diferentes factores susceptíveis de modificar o comportamento dessa tipologia.

Na tabela 5.4 apresentam-se os valores representativos do índice de vulnerabilidade para as diferentes tipologias consideradas neste estudo, onde se indica um valor médio (IV^*), limites dos valores plausíveis (IV^- e IV^+), e os valores máximos e mínimos aceitáveis (IV^{\min} e IV^{\max}), tal com apresentados no capítulo 2. Os valores dos factores condicionantes considerados no presente estudo (V_m)² encontram-se na tabela 5.5.

Tabela 5.4: Índices de vulnerabilidade para os edifícios em estudo em função da sua tipologia

Tipologia Risk-UE		IV^{\min}	IV^-	IV^*	IV^+	IV^{\max}
Alvenaria	M1	Paredes em alvenaria de pedra				
	M1.1	0.620	0.810	0.873	0.980	1.020
	M1.2	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M1.3	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
	M2	Adobe				
	M_{PDA}	0.500	0.659	0.767	0.896	0.980
	M3	Paredes em alvenaria não armada				
	M3.1	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M3.4	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
	A_{PDA}	0.380	0.570	0.678	0.812	0.940
Betão	RC1	Sistema de pilares e vigas com enchimento em alvenaria				
	RC2	-0.020	0.047	0.386	0.670	0.860
	RC_{PDA}	-0.020	0.047	0.414	0.735	0.940

Como já foi referido anteriormente não foi possível obter informação sobre o tipo de pavimento utilizado nos edifícios de alvenaria e o tipo de paredes existente nos edifícios de betão, bem como fazer uma distinção entre as alvenarias de pedra e adobe. Sendo difícil estimar estes factores a partir de uma análise visual exterior, foi decidido introduzir três tipologias mistas para o edificado de Ponta Delgada: A_{PDA}

² Nota : $\Delta V_m = \Sigma V_m$ (equação 2.14)

(alvenaria), M_{PDA} (alvenaria de pedra) e RC_{PDA} (betão). Os índices de vulnerabilidade para tipologia A_{PDA} são a média dos índices referentes às tipologias M3.1 e M3.4 da tipologia Risk-UE; para tipologia M_{PDA} são a média dos índices referentes às tipologias M1 e M2 da tipologia Risk-UE e, para tipologia RC_{PDA} são a média dos índices referentes às tipologias RC1 e RC2 das classes tipológicas definidas no Risk-UE (ver tabela 5.4).

Tabela 5.5: Factores que afectam a vulnerabilidade e respectivos índices (V_m)

Factores de vulnerabilidade	Parâmetros	Alvenaria	Betão (antes de 1983)	Betão (após 1983)
Código			0,16	0
Estado de conservação	Bom	-0,04	...	...
	Mau	0,04	0,04	0,02
Nº de pisos	1 ou 2	-0,02	-0,04	-0,04
	3, 4 ou 5	0,02	0	0
	6 ou mais	0,06	0,08	0,06
Irregularidade em planta	...	0,04	0,04	0,02
Posição do edifício	Meio	-0,04	...	...
	Esquina	0,04	...	...
	Ponta	0,06	...	...
Terreno	Inclinação	0,02	0,02	0,02

Para todas as zonas a tipologia de alvenaria escolhida foi A_{PDA} e para as alvenarias de pedra foi M_{PDA} . A tipologia de betão considerada neste estudo para as zonas 1 e 2 foi RC1, com a média entre os factores de vulnerabilidade “betão antes de 1983” e “após 1983”, e para as zonas 3 e 4 foi escolhida a tipologia RC_{PDA} “após 1983”. Os factores de vulnerabilidade “betão antes de 1983” e “após 1983” correspondem a um código anti-sísmico baixo e médio, respectivamente, no método em questão. Foi decidido usar a tipologia RC1 para as zona 1 e 2 devido às características próprias do edificado nestas duas zonas que não se coadunam com uma tipologia com paredes interiores de betão.

Numa primeira abordagem foi considerado que cada zona teria um “edificado homogéneo”. O grau de danos médio desse edificado foi calculado tendo em conta a

sua percentagem (tabela 5.1) e o grau de danos médio (de acordo com a equação 2.17), dos edifícios das diferentes tipologias em cada zona.

Deste modo foi possível traçar uma curva de “vulnerabilidade” sísmica média para cada zona, permitindo obter uma primeira avaliação da vulnerabilidade do edificado e distinguir quais as zonas que sofrerão mais ou menos danos, face à ocorrência de um sismo de determinada intensidade, figura 5.8.

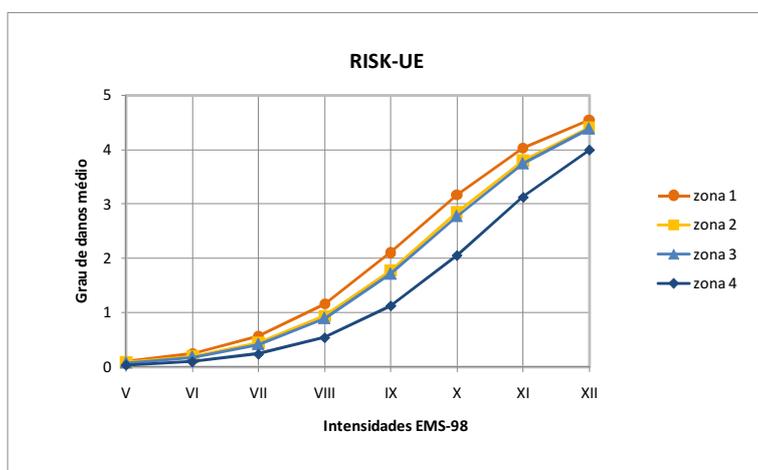


Figura 5.8: Curvas de “vulnerabilidade” sísmica média para as diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada, calculadas pelo método Risk-UE.

A partir da análise das curvas de “vulnerabilidade” apresentadas na figura 5.8, pode constatar-se que a zona 1 é a que apresenta o maior grau de danos médio em oposição à zona 4 que apresenta os valores mais baixos. Este resultado traduz com clareza a elevada percentagem de edifícios de alvenarias (65% A_{PDA} e 14% M_{PDA}) com dois e três pisos da zona 1 e a elevada percentagem de edifícios de betão com apenas dois pisos (74%) da zona 4. As zonas 2 e 3 apresentam valores de grau de danos médio muito semelhantes, resultado que traduz a tipologia existente na zona 3 que, apesar de ter maioritariamente edifícios de betão (53%) tem maioritariamente edifícios com 4 ou mais pisos (10% com seis ou mais pisos), o que agrava a sua vulnerabilidade.

As curvas de vulnerabilidade sísmica para cada tipologia considerada dentro de cada zona estão representadas nos gráficos da figura 5.9.

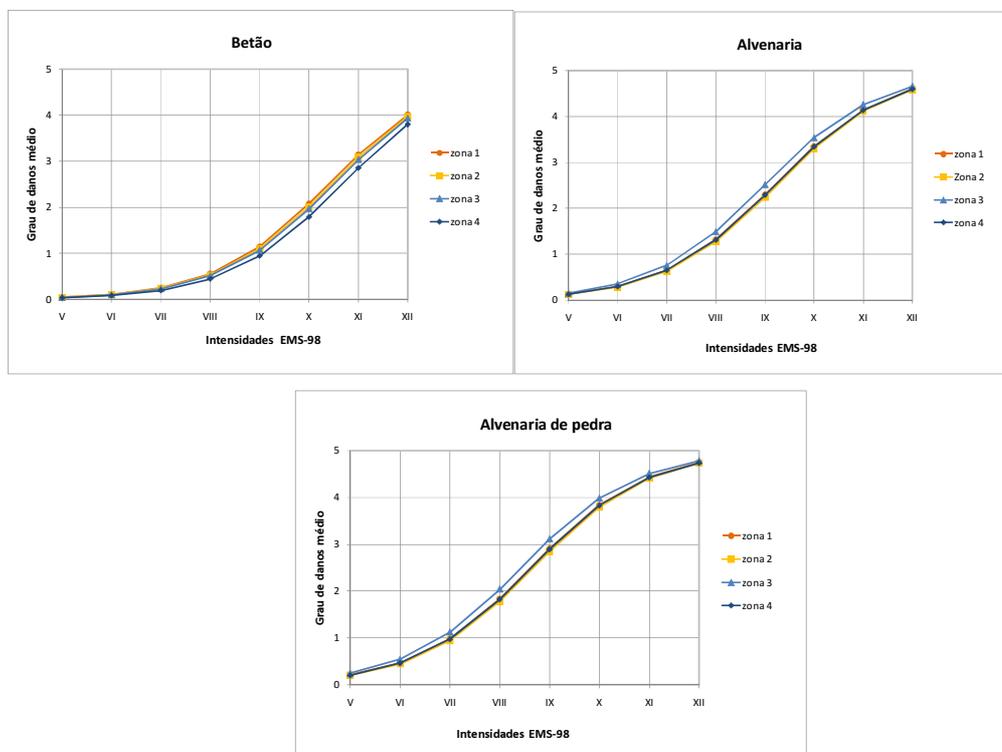


Figura 5.9: Curvas de vulnerabilidade sísmica para cada tipologia (betão, alvenaria e alvenaria de pedra) nas diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada calculadas pelo método Risk-UE.

Pela análise das curvas da figura 5.9 pode constatar-se que nas diferentes zonas a mesma tipologia comporta-se de modo semelhante. Para as tipologias de alvenaria e alvenaria de pedra os edifícios da zona 3 mostram-se ligeiramente mais vulneráveis do que os edifícios das mesmas tipologias nas restantes zonas. Este facto poderá estar relacionado com o número de pisos dos edifícios daquela zona, 48% de 4 ou mais pisos que, provavelmente, serão de betão e não de alvenaria ou de alvenaria de pedra. Uma análise da vulnerabilidade onde fosse conhecido o número de pisos em cada tipologia seria o mais indicado, mas a informação disponível nos dados não permite tal avaliação.

5.3.2 Método Vulneralp

Um método mais simplificado que o anterior é o método Vulneralp desenvolvido por Guéguen et al., (2007) e que foi aplicado na cidade de Grenoble (França). Este método visa reduzir os custos inerentes ao estudo da vulnerabilidade sísmica em grande escala. Como não é necessário fazer uma análise visual detalhada dos parâmetros estruturais, poupa tempo no inventário dos edifícios e no pessoal técnico para realizar tal tarefa. Este método distingue apenas os edifícios em duas tipologias, alvenaria e betão, e os parâmetros que afectam a vulnerabilidade são fáceis e rápidos de identificar.

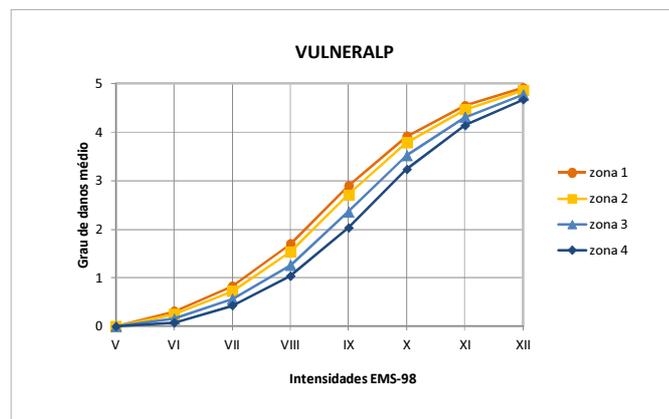
Os parâmetros estruturais analisados foram: o tipo de material de construção, localização e fundações, cobertura, regularidade em planta e posição no quarteirão. Neste caso todos os edifícios foram considerados como tendo regularidade horizontal. Os intervalos das datas de construção foram alterados, em relação aos intervalos temporais apresentados na metodologia (capítulo 2 secção 2.4.2), de acordo com os dados disponíveis e de forma a enquadrarem-se melhor no contexto da cidade de Ponta Delgada. Tendo em conta que o primeiro regulamento anti-sísmico surge em 1958, que desde 1983 que tem estado em vigor o regulamento RSA (RSA, 1983) e que os dados disponíveis sobre as datas de construção dizem respeito apenas a intervalos de tempo (antes de 1919; de 1919 a 1945; de 1946 a de 1960; de 1961 a 1970; de 1971 a 1980; de 1981 a 1985; de 1986 a 1990; de 1991 a 1995 e de 1996 a 2001), os intervalos de tempo considerados neste estudo para as épocas de construção são os apresentados na tabela 5.6, com os respectivos índices de vulnerabilidade média (IV^*).

O peso (W) associado à idade de construção é de 2.5. Os restantes índices de vulnerabilidade e respectivos pesos de cada parâmetro estrutural encontram-se na tabela 2.6.

Tabela 5.6: Peso e índices de vulnerabilidade para as diferentes datas de construção (método Vulneralp)

Idade de construção $W=2.5$	Antes 1946			Entre 1946 e 1960			Entre 1961 e 1985			Entre 1986 e 2001		
	IV ^{máx}	IV [']	IV ^{min}	IV ^{máx}	IV [']	IV ^{min}	IV ^{máx}	IV [']	IV ^{min}	IV ^{máx}	IV [']	IV ^{min}
Alvenaria	45	25	15	45	25	15	25	15	5	25	15	5
Betão	25	25	25	25	15	5	15	5	0	5	2,5	0

Tal como no método anterior foi feita uma primeira abordagem onde foi considerado que cada zona teria um “edificado homogéneo”. De acordo com as equações 2.22 e 2.23 que estimam o índice de vulnerabilidade total e o grau de danos médio, e com a percentagem de edifícios das diferentes tipologias em cada zona (tabela 5.1), foram obtidas as curvas de “vulnerabilidade” sísmica média para as 4 zonas identificadas na cidade, figura 5.10.

**Figura 5.10:** Curvas de “vulnerabilidade” sísmica média para as diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada, calculadas pelo método Vulneralp.

Pode observar-se nas curvas da figura 5.10 que, a zona 1 é a que apresenta o maior grau de danos médio, qualquer que seja a intensidade considerada, seguida de muito perto pela zona 2 e depois a zona 3 e, por último a zona 4, que apresenta os valores um pouco mais baixos. Contudo, pode observar-se que a diferença de graus de danos, entre a zona 1 e 4, nunca excede um grau de danos, para todas as

intensidades consideradas. Esta diferença pouco acentuada na vulnerabilidade média deve-se ao facto de o material e datas de construção serem os parâmetros com mais peso neste método, e de todas as zonas terem maioritariamente edifícios construídos a partir de 1961.

As curvas de vulnerabilidade sísmica determinadas por este método para cada tipologia considerada dentro de cada zona estão representadas na figura 5.11.

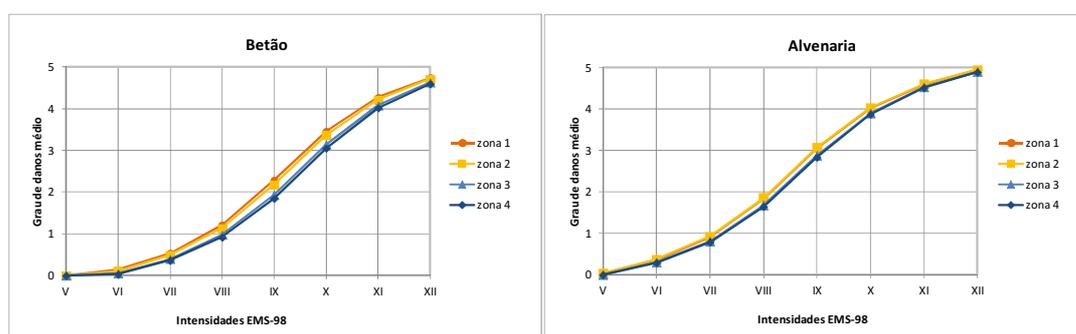


Figura 5.11: Curvas de vulnerabilidade sísmica para as tipologias de alvenaria e de betão das diferentes zonas da cidade de Ponta Delgada calculadas pelo método Vulneralp.

As curvas da vulnerabilidade sísmica para a tipologia de betão dentro de cada zona mostram-nos uma pequena diferença no grau de danos médio dos edifícios das zonas mais antigas (1 e 2) e dos edifícios das zonas mais recentes, sendo essa diferença menos acentuada para os edifícios de alvenaria.

5.3.3 Comparação dos Resultados Obtidos pelos dois Métodos

Compararam-se os resultados obtidos com os dois métodos, para as tipologias de betão e alvenaria, para cada zona, figura 5.12. Para isso foi calculada a diferença entre o grau de danos médio determinado pelo método Vulneralp e pelo método Risk-UE ($\mu_{DVulneralp} - \mu_{DRisk-UE}$). O grau de danos médio utilizado aqui para as alvenarias pelo método Risk-UE foi estimado fazendo a média do grau de danos

médio para as tipologias de alvenaria e alvenaria de pedra, visto que o método Vulneralp apenas considera uma tipologia de alvenaria.

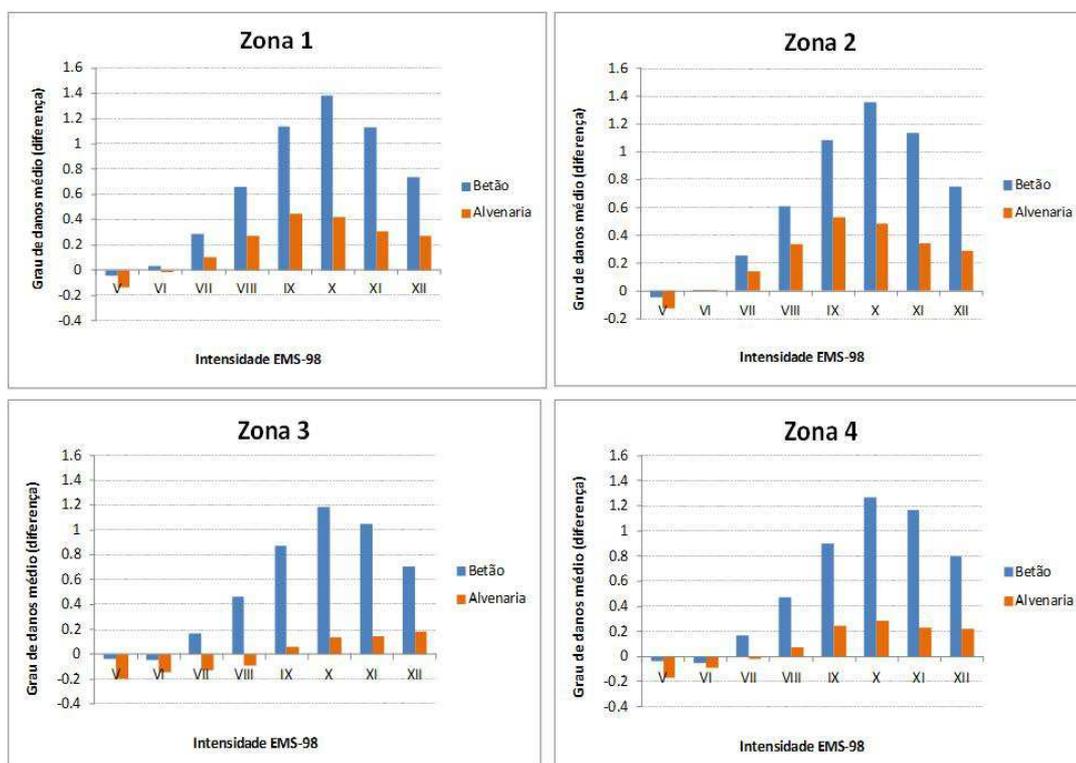


Figura 5.12: Diferença entre o grau de danos médio determinado pelos métodos Vulneralp e Risk-UE ($\mu_{DVulneralp} - \mu_{DRisk-UE}$), para diferentes intensidades e para as tipologias de betão e alvenaria da cidade de Ponta Delgada.

Ambos os métodos se mostraram razoavelmente eficazes para uma estimativa inicial da vulnerabilidade sísmica.

A metodologia Vulneralp, para intensidades iguais ou superiores a VII fornece um grau de danos mais elevado para ambas as tipologias embora essa diferença seja mais acentuada para a tipologia de betão, podendo ser superior a um grau de danos. Este resultado poderá dever-se ao carácter mais global do método Vulneralp em termos de classificação tipologias.

5.4. Curvas de Fragilidade

As curvas de vulnerabilidade mostram o grau de danos médio sofrido por uma determinada tipologia face a uma dada intensidade macrossísmica. Contudo, o mesmo tipo de estrutura pode sofrer diferentes graus de danos. A distribuição nos graus de danos é dada através das curvas de fragilidade.

As curvas de fragilidade representam a probabilidade de uma determinada tipologia (estrutura) sofrer ou ultrapassar um determinado grau de danos (D_K) para uma determinada intensidade.

Usando o índice de danos médio (μ_D) obtido através das curvas de vulnerabilidade pelo método Risk-UE e aplicando as equações 2.19 e 2.21 relativas à probabilidade associada ao grau de danos, foi possível construir as curvas de fragilidade para as diferentes tipologias estudadas (figura 5.13). O índice de danos médio utilizado para cada tipologia foi calculado através da média dos índices respectivos dessa mesma tipologia em cada zona, visto que as três tipologias em estudo não apresentam grandes variações de zona para zona (ver figura 5.11).

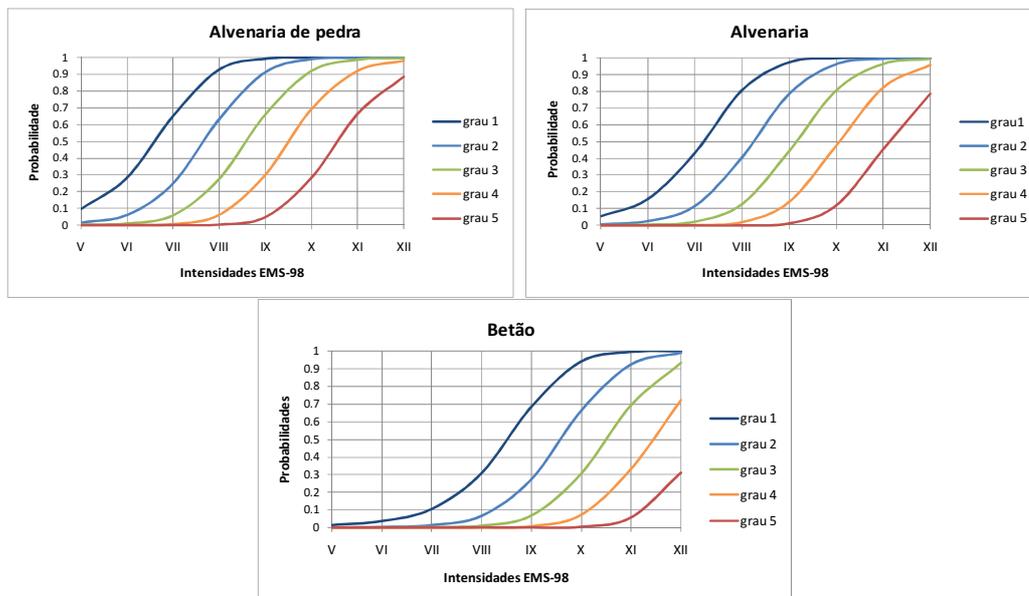


Figura 5.13: Curvas de fragilidade para as diferentes tipologias (método Risk-UE).

Estas curvas podem ser utilizadas para estimar a distribuição dos danos causados por um evento sísmico de uma determinada intensidade num determinado local. Por exemplo, a cidade de Ponta Delgada foi atingida com uma intensidade VIII_(EMS-98) pelo sismo a 22 de Outubro de 1522 (Silveira, 2002) onde caíram muitas casas e a igreja. Hoje se a cidade fosse atingida pelo um sismo com a mesma intensidade, e de acordo com os cálculos efectuados (ver figuras 5.13 e 5.14), haveria cerca de 30% de probabilidade dos edifícios de alvenaria de pedra sofrerem danos iguais ou superiores a 3 (danos severos) e cerca de 10% de probabilidade de sofrerem danos iguais ou superiores a 4 (danos muito severos). Para os edifícios de alvenaria há uma probabilidade de 40% de sofrerem danos moderados iguais ou superiores a 2 e de 10% de sofrerem danos severos iguais ou superiores a 3. Os edifícios de betão têm 30% de probabilidade de sofrerem danos iguais ou superiores a 1 (danos ligeiros) e apenas 7% de sofrerem danos iguais ou superiores a 2.

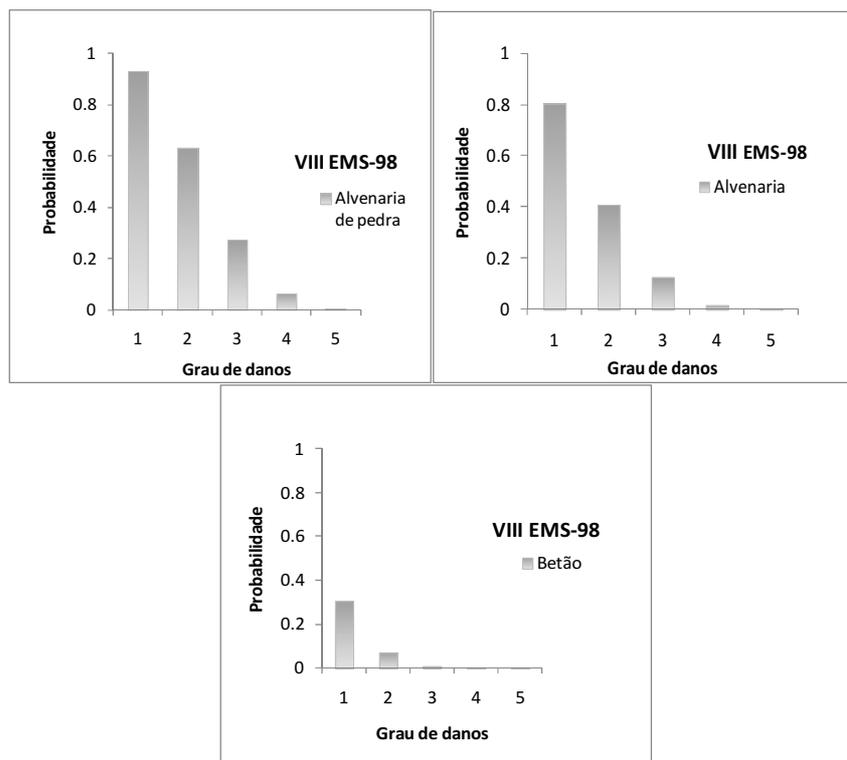


Figura 5.14: Probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos para uma intensidade sísmica de VIII_{EMS-98} para as três tipologias em estudo (método Risk-UE).

O método Vulneralp não apresenta uma solução probabilística que faça corresponder o grau de danos médio obtido através das curvas de vulnerabilidade a diferentes graus de danos. De forma a obter as curvas de fragilidade para este método, foi usado o índice de danos médio (μ_D) obtido através das curvas de vulnerabilidade pelo método Vulneralp nas equações 2.19 e 2.21 do método Risk-UE (ver figura 5.15).

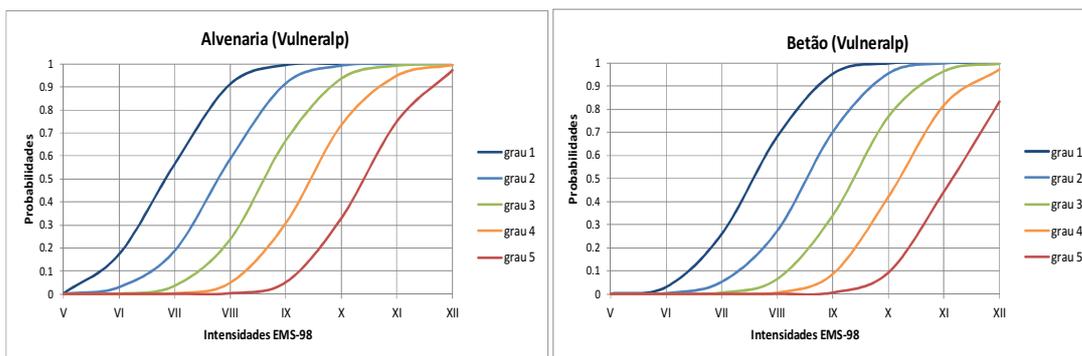


Figura 5.15: Curvas de fragilidade para as diferentes tipologias (método Vulneralp).

O índice de danos médio utilizado para cada tipologia foi calculado através da média dos índices respectivos dessa mesma tipologia em cada zona.

Para o mesmo exemplo referido anteriormente, e de acordo com os cálculos efectuados para o método Vulneralp, (ver figuras 5.15 e 5.16), há cerca de 25% de probabilidade dos edifícios de alvenaria sofrem danos iguais ou superiores a 3 (danos severos) e cerca de 5% de probabilidade de sofrerem danos iguais ou superiores a 4 (danos muito severos). Os edifícios de betão têm 30% de probabilidade de sofrerem danos iguais ou superiores a 2 (danos moderados) e apenas 7% de sofrerem danos iguais ou superiores a 3.

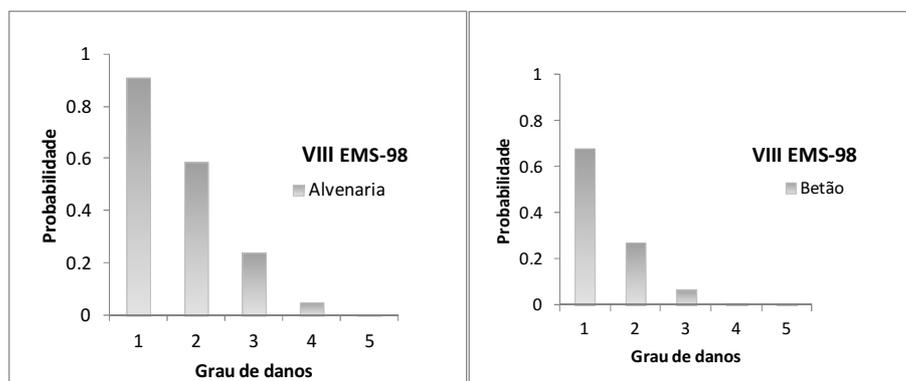


Figura 5.16: Probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos para uma intensidade sísmica de VIII_{EMS-98} para as duas tipologias em estudo (método Vulneralp).

No capítulo seguinte será feito um estudo mais detalhado sobre a distribuição de danos para a cidade de Ponta Delgada para sismos de cenário considerados e serão comparados os resultados obtidos para ambos os métodos.

Capítulo 6: Cenários de Danos

6.1. Introdução

Analisando a sismicidade em S. Miguel desde o povoamento da ilha, pode-se constatar que Ponta Delgada tem sido um local privilegiado em termos de danos causados por grandes sismos. Isto deve-se à sua localização geográfica pois situa-se numa das regiões com menor sismicidade da ilha e também ao facto de não se encontrar muito próximo das fontes sismogénicas oceânicas. Apesar deste panorama aparentemente tranquilo em termos sísmicos é de realçar que a cidade já sofreu danos avultados em consequência de dois sismos mais severos no passado. Deste modo, e devido à importância sócio-económica da cidade, é fundamental estimar os cenários de danos atendendo à sismicidade histórica e às principais zonas sismogénicas que afectam Ponta Delgada.

Os cenários aqui apresentados apenas relatam as perdas directas, isto é, os danos causados nos edifícios e apresentam-se em termos de percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de um determinado grau em cada subsecção estatística. Isto permite uma visualização das zonas mais sensíveis da cidade e uma antevisão dos danos que poderão ocorrer numa situação real com as mesmas características do sismo de cenário.

6.2. Sismos de Cenário

Os sismos de cenário escolhidos para estimar a distribuição dos danos para este estudo foram:

-
- Sismo de 22 de Outubro de 1522, com uma intensidade macrossísmica associada de VIII_{EMS-98}.
 - Sismo, potencial, gerado próximo da cidade de Ponta Delgada (p. ex. na Região dos Picos) com uma intensidade macrossísmica associada de IX_{EMS-98}.

A selecção dos sismos de cenário teve em conta a sismicidade histórica de S. Miguel. Os sismos que registaram maiores intensidades em Ponta Delgada foram os sismos de 22 de Outubro de 1522 e de 16 de Abril de 1852, sentidos, respectivamente, com intensidades de VIII_{EMS-98} e VII_{EMS-98}, em Ponta Delgada.

O sismo de 22 de Outubro de 1522 foi produzido pela actividade sísmica associada aos sistemas vulcano-tectónicos do Fogo, Congro e Furnas. Foi seleccionado para traçar o primeiro cenário de Ponta Delgada, por ter sido originado na zona sísmicamente mais activa da ilha e por ser o sismo, que se conhece, que atingiu a cidade com maior intensidade.

O segundo cenário corresponde a um sismo que não há conhecimento de ter ocorrido no período histórico, mas que estaria associado à actividade sísmica no Sistema Vulcânico da Região dos Picos, e que produziria uma intensidade IX_{EMS-98} em Ponta Delgada. A escolha deste sismo de cenário está baseada numa possível ocorrência extrema do sucedido a 16 de Abril de 1852. Este sismo de 1852 tem sido alvo de alguma controvérsia quanto à localização do seu epicentro. Silveira (2002) descreve algumas considerações feitas por diversos autores (Correia *et al.*, 1992; Ferreira, 2000, p. ex.), que sugerem a localização do epicentro na Região dos Picos. À excepção da actividade sísmica precursora de episódios vulcânicos, estes autores consideram ter sido este o único sismo de grande magnitude gerado nesta região. Contudo, Silveira (2002 e 2003) situa o epicentro deste evento no mar, a Norte da Região dos Picos, onde não é conhecido nenhum mecanismo com evidências de gerar tal sismo, e atribuindo uma intensidade para Ponta Delgada de VII_{EMS-98}.

6.3. Estimativa dos Cenários de Danos

Os cenários desenvolvidos apenas descrevem os danos causados nos edifícios. Foram elaborados tendo em conta a análise da vulnerabilidade sísmica feita no capítulo 5 por ambos os métodos, Risk-UE e Vulneralp, e por isso são apresentados em termos de intensidade EMS-98 onde os danos são classificados em cinco níveis: ligeiros (grau 1); moderados (grau 2); severos (grau3); muito severos (grau 4); e colapso parcial ou total (grau 5). Alguns autores incluem também o grau zero, para referir os casos em que não ocorrem danos.

A integração dos efeitos dos terrenos nos cenários sísmicos, em termos de intensidade, poderá ser feita através de incrementos na intensidade dependendo do tipo de terreno (Scanell, 1999 *in* Lantada *et al.* 2001). Os incrementos utilizados por Scanell (1999) (*in* Lantada *et al.* 2001) consideram quatro tipos de terreno: rocha; materiais compactados; materiais semi-compactados; areias e materiais não coesivos. Para rocha e materiais compactados não é aplicado nenhum incremento na intensidade enquanto que para os restantes tipos de terreno é incrementado 0.5 graus à intensidade dos cenários. Segundo a classificação dos terrenos de Ponta Delgada feita no capítulo 4, estes foram identificados como rocha e terreno rijo (tipos A e B, respectivamente, de acordo com o EC8). Deste modo não foi tido em conta o efeito dos terrenos na elaboração dos cenários pois estes não terão uma influência significativa em termos de intensidade.

Os dados do trabalho foram integrados num sistema de informação geográfica. Esta ferramenta poderia permitir uma análise edifício a edifício, contudo a informação sobre o tipo de material de construção apenas está disponível ao nível de subsecções estatísticas e não edifício a edifício. Ou seja, dentro de cada subsecção estatística temos o número de edifícios de cada tipologia, mas não são identificados quais. Tendo em conta que em cada subsecção estatística a informação do número de edifícios fica, de um modo geral, aquém do número verdadeiro, torna-se impossível fazer um cenário de danos com o número exacto de edifícios e,

por isso, apresentam-se os cenários em termos de percentagem de edifícios em cada subsecção estatística.

A questão em relação a algumas das subsecções estatísticas não terem qualquer tipo de informação sobre o edificado, foi ultrapassada através da análise da base de dados da SRHE e da análise de fotografias tiradas a quase todas as ruas durante as campanhas a Ponta Delgada. Deste modo foi possível construir uma carta de densidade do edificado em cada subsecção estatística (figura 6.1) facilitando assim uma melhor interpretação dos cenários que são aqui apresentados.

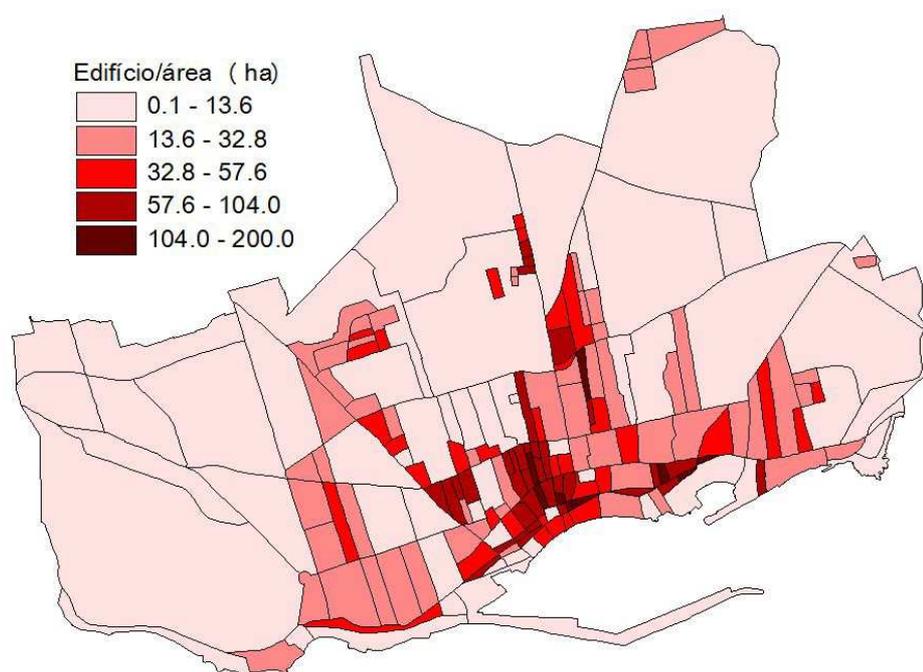


Figura 6.1: Carta de densidade do edificado. Número de edifícios por hectare em cada subsecção estatística.

No capítulo anterior (capítulo 5) associou-se a cada classe tipológica de edifícios uma distribuição de danos (probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos), através da qual se construiu as curvas de fragilidade. Essa probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos é aqui apresentada como sendo a percentagem do número de edifícios que é atingido por esse grau de danos. Sendo assim os cenários de danos foram estimados:

- 1°. Calculando, a probabilidade de atingir ou ultrapassar um determinado grau de danos, para uma determinada intensidade, para cada classe tipológica (betão, alvenaria e alvenaria de pedra), através da densidade de probabilidade beta cumulativa (FDC) (eq. 2.19) e da expressão 2.21.
- 2°. Multiplicando essa probabilidade pelo respectivo número de edifícios correspondente a cada tipologia, em cada subsecção estatística, permitindo saber qual a percentagem de edifícios (por subsecção estatística) que atingem ou ultrapassam o grau de danos seleccionado.

6.3.1. Cenário Sísmico 1

Este cenário, estimado por o método Risk-UE e pelo método Vulneralp, corresponde à ocorrência de um sismo com epicentro na região do Fogo, Congro e Furnas e que produza uma intensidade VIII (EMS-98) na cidade de Ponta Delgada.

A percentagem total de edifícios que atinge ou ultrapassa o grau 3 e o grau 4, estimada pelo método Risk-UE, é de 7,7% e de 1,3%, respectivamente. Pelo método Vulneralp 14,8% dos edifícios atinge ou ultrapassa o grau 3 e 2,7% atinge o grau 4 ou superior.

A percentagem de edifícios por subsecção estatística, obtida através dos dois métodos, que atinge ou ultrapassa o grau 3 de danos deste cenário está representada na figura 6.2. Na figura 6.3 está representado a percentagem de edifícios que atinge o grau de danos 4 ou superior.

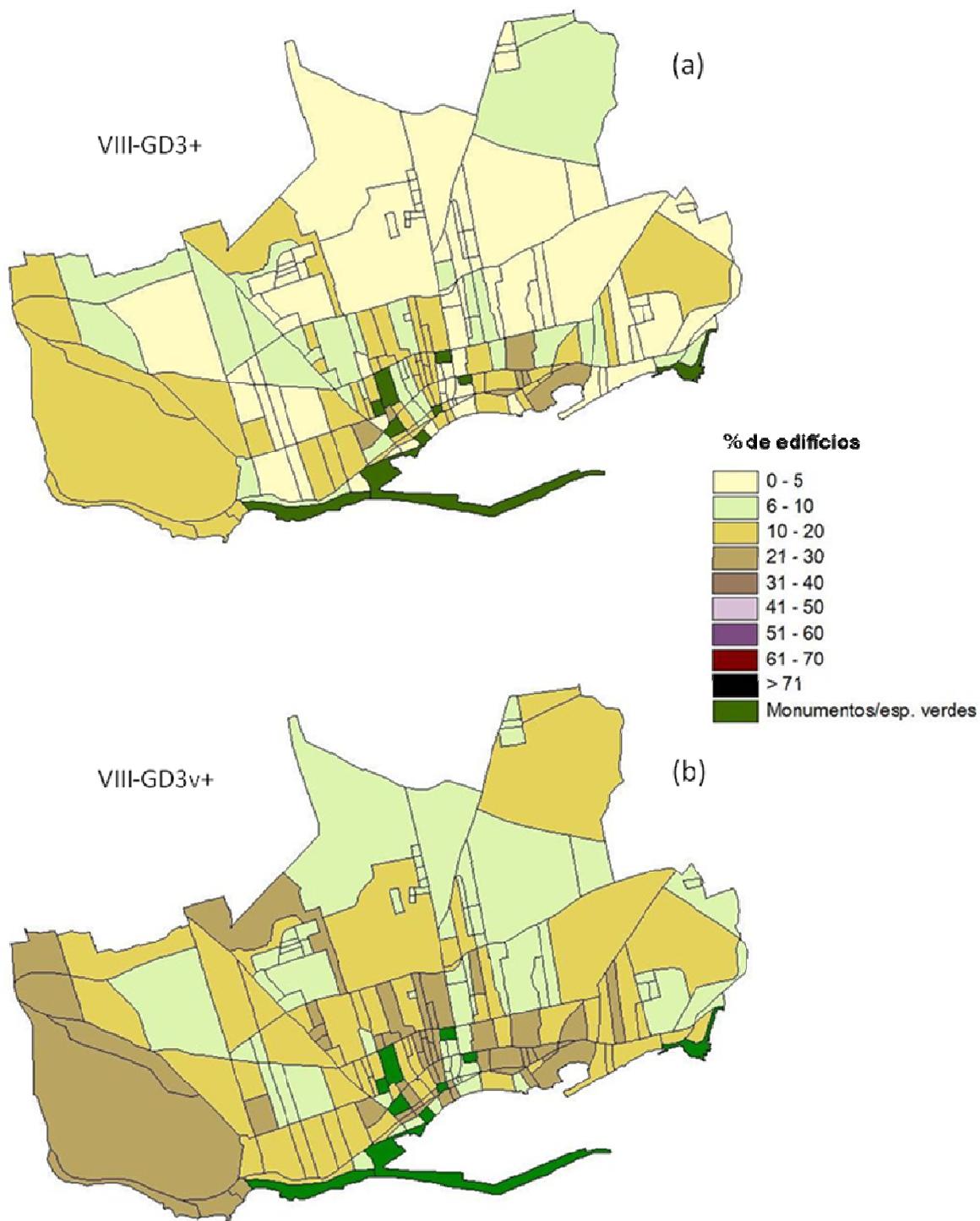


Figura 6.2: Cenário sísmico 1. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 3. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.

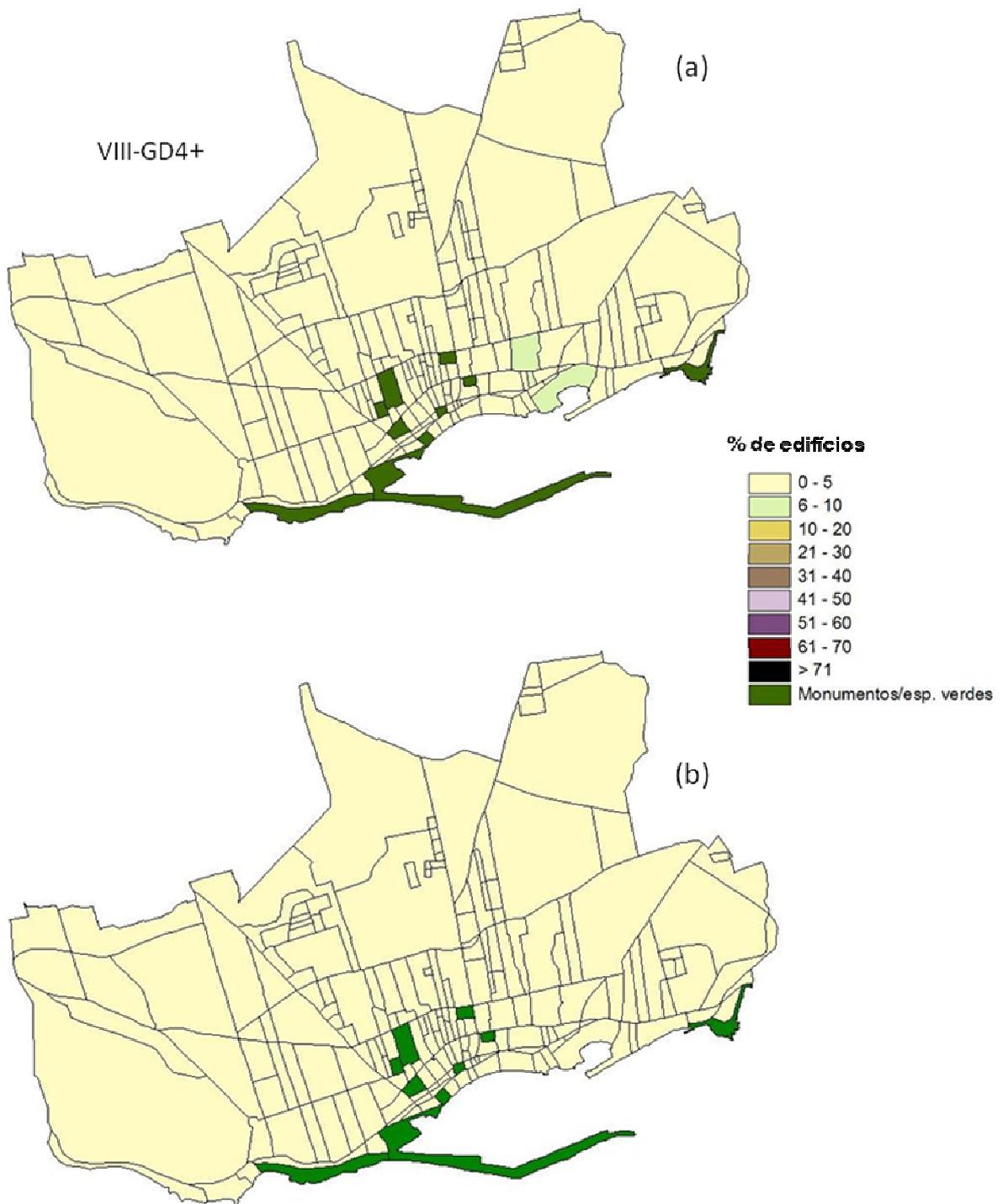


Figura 6.3: Cenário sísmico 1. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 4. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.

Observando a figura 6.3 o cenário obtido pelo método Risk-UE é “aparentemente” pior que o obtido com o método Vulneralp. O que acontece nas subsecções estatísticas a verde na figura em questão é que os edifícios aí contidos são maioritariamente de alvenaria de pedra. Para uma intensidade VIII a probabilidade destes edifícios excederem ou ultrapassarem danos de grau 4, pelo método Risk-UE, é superior à probabilidade estimada pelo método Vulneralp (que não faz distinção entre alvenarias). A percentagem de edifícios, estimada pelo método Risk-UE, nas restantes subsecções estatísticas que excedem ou ultrapassam danos de grau 4, é inferior à estimada pelo método Vulneralp, contudo como os valores estão abaixo dos 5%, essa diferença não é visível na figura.

6.3.2. Cenário Sísmico 2

Este cenário corresponde à ocorrência de um sismo próximo que produza uma intensidade IX na cidade de Ponta Delgada estimado por o método Risk-UE e pelo método Vulneralp.

A percentagem total de edifícios que atinge ou ultrapassa o grau 3 e o grau 4 estimada pelo método Risk-UE, é de 26,4% e de 8,4%, respectivamente. Pelo método Vulneralp 49,7% dos edifícios atinge ou ultrapassa o grau 3 e 19,3% atinge o grau 4 ou superior.

A percentagem de edifícios por subsecção estatística, também obtida através dos dois métodos, que atinge ou ultrapassa o grau 3 de danos deste cenário está representada na figura 6.4. Na figura 6.5 está representado a percentagem de edifícios que atinge o grau de danos 4 ou superior.

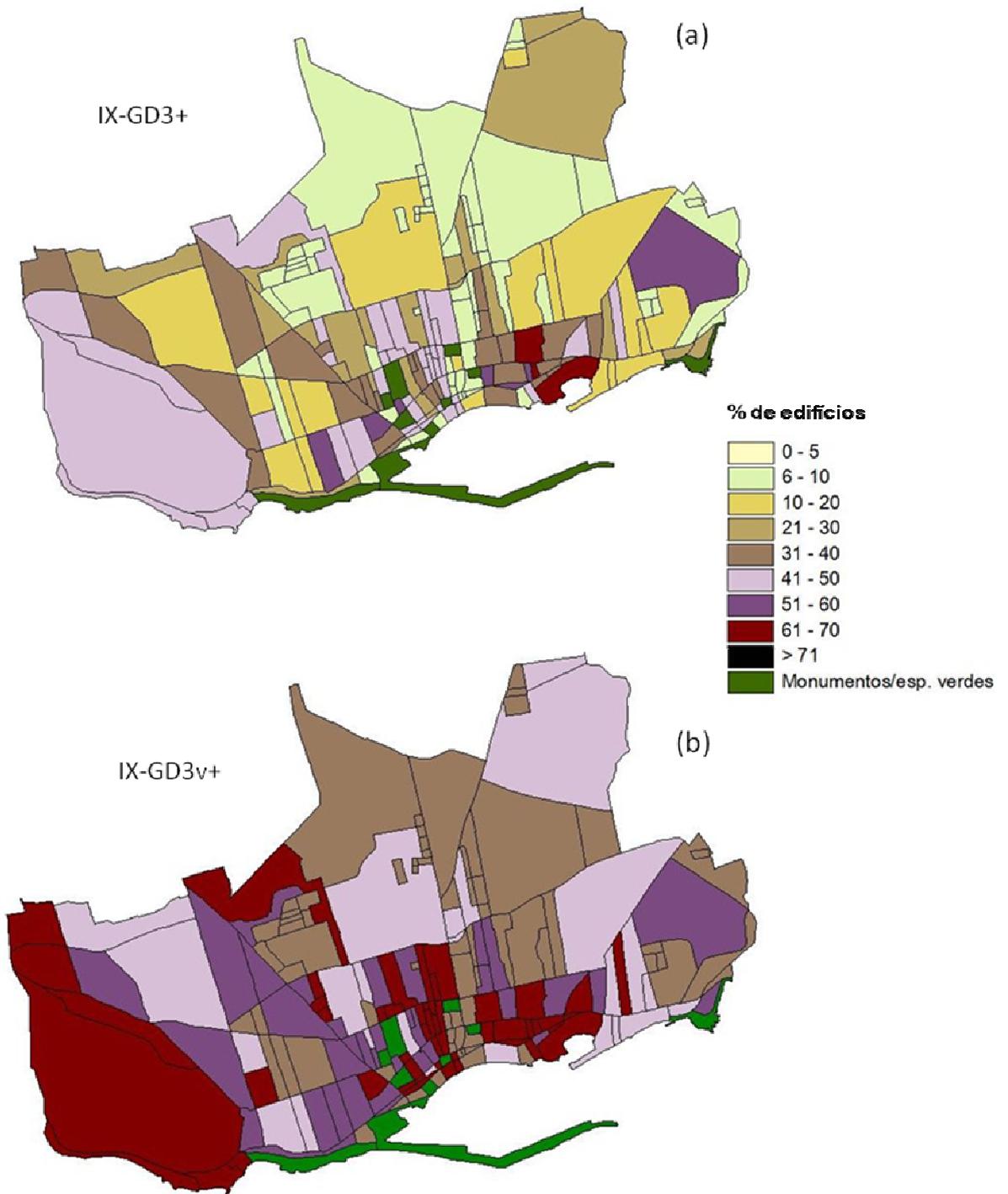


Figura 6.4: Cenário sísmico 2. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 3. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.

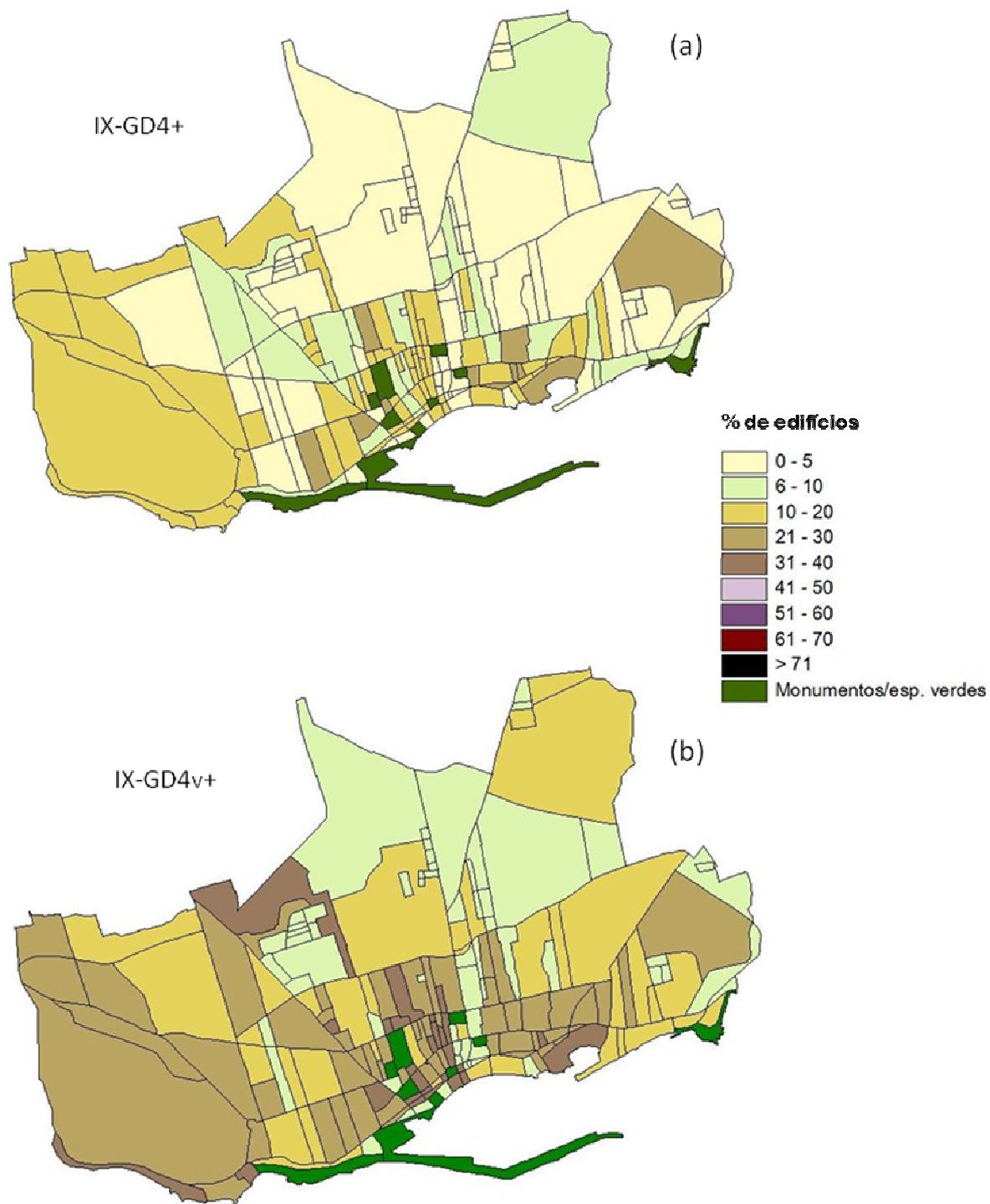


Figura 6.5: Cenário sísmico 2. Percentagem de edifícios que sofrem ou ultrapassam danos de grau 4. (a) Método Risk-UE. (b) Método Vulneralp.

Os resultados, de ambos os cenários, mostram-nos que a percentagem de edifícios que sofre ou ultrapassa um determinado grau de danos estimada do método Vulneralp é praticamente o dobro da percentagem de edifícios estimada pelo método Risk-UE, facto que traduz os resultados do capítulo 5. Apesar dos cenários obtidos pela metodologia Risk-UE “parecerem” muito optimistas, a sua sensibilidade em relação às três tipologias consideradas não está posta em questão, facto que se pode observar em todas as figuras, onde se destacam as subsecções estatísticas maioritariamente de alvenaria de pedra.

Em ambos os cenários há uma evidência clara no aumento da percentagem de edifícios danificados na zona central/histórica da cidade. Sendo esta também a zona com mais densidade de edifícios tem como consequência um maior número de estragos em caso de ocorrência de um sismo.

Capítulo 7: Conclusões

7.1. Discussão dos Resultados

Com o decorrer deste trabalho foi realizada uma avaliação do risco sísmico da cidade de Ponta Delgada e a consequente construção de cenários sísmicos em termos de danos no edificado. Este trabalho teve como pontos principais os estudos da perigosidade sísmica, do comportamento dos terrenos e do comportamento do edificado corrente. As metodologias utilizadas nas diferentes etapas do trabalho mostraram-se adequadas e foram alcançados resultados considerados coerentes e satisfatórios.

O estudo de perigosidade sísmica realizado mostrou que a zona de geração 1 (ilha de S. Miguel) é a que mais influencia a perigosidade sísmica na cidade de Ponta Delgada. Apesar de esta zona não ser a que apresenta sismos de magnitudes mais elevadas, é a que possui a maior taxa anual de sismos. Além disso, como a própria cidade de Ponta Delgada está nesta zona as fontes sísmicas encontram-se muito próximas. Este resultado é coerente com o que se conhece da sismicidade histórica, pois foi nesta zona que foram gerados os sismos que maiores efeitos produziram na cidade de Ponta Delgada.

Contudo, convém realçar que este estudo apresenta várias limitações que deverão ser tomadas em consideração. A principal limitação desta estimativa probabilista é o facto da informação sísmica instrumental ser bastante reduzida, pois considera apenas os sismos registados entre 1963 e Março de 2008. A inexistência de uma lei de atenuação específica para a região em estudo, também contribui de um modo negativo para a avaliação correcta da perigosidade sísmica. Apesar de ambas as leis consideradas neste estudo apresentarem resultados coerentes, quer

entre si, quer em relação ao espectro recomendado pelo anexo nacional do EC8 para o Arquipélago dos Açores, os resultados apresentados devem ser analisados de um modo cauteloso, pois reflectem as incertezas que ainda existem sobre a sismogénese e a propagação da energia sísmica nesta região.

Apesar de terem sido identificados 5 tipos de terreno e calculadas as suas respostas sísmicas, decidiu-se apresentar um zonamento dos terrenos de uma forma mais abrangente, de acordo com a classificação dos terrenos apresentada no EC8. Esta decisão teve como base, principalmente, a heterogeneidade dos terrenos e a falta de informação geotécnica de algumas zonas da cidade. Também as aproximações feitas nas colunas representativas de cada terreno, devido à falta de informação geológica e geotécnica abaixo dos 15 m de profundidade, e a inexistência de movimentos input reais na análise do comportamento das colunas de terreno, foram factores que contribuíram para que a classificação dos terrenos apresentada seja vista de uma forma mais genérica. Assim o estudo dos terrenos da zona urbana de Ponta Delgada revelou que são terrenos duros e rocha (tipos B e A, respectivamente, segundo a classificação do EC8) pelo que, por este motivo, as suas respostas face a acções sísmicas não serão relevantes em termos agravamento de danos nos cenários sísmicos.

No caso de estudos futuros, mais específicos, as zonas onde se encontram os terrenos tipos 2 e 3 deverão ser analisadas mais cuidadosamente, pois amplificam o sinal sísmico dentro da gama de frequências próprias dos edifícios de ponta Delgada (entre 3 e 6 Hz). O terreno tipo 3 apresenta uma primeira camada composta por aterro, pelo que deve tomar-se especial atenção nestas situações, em particular nas novas áreas construídas na parte SE da cidade junto ao mar.

Sobre a avaliação do comportamento sísmico do edificado, o que tornou este estudo mais difícil foi a falta de informação específica sobre o mesmo, principalmente sobre a sua tipologia. Esta informação apenas se encontra disponível nos dados dos censos 2001 e só em relação às subsecções estatísticas e não edifício a edifício. A análise e caracterização visual (exterior) do edificado foram

fundamentais para tentar preencher esta lacuna, bem como o inquérito feito à população. Embora o número de inquiridos não tenha sido suficientemente grande para serem representativos das características urbanas de Ponta Delgada, os resultados do inquérito mostram uma tendência que confirma os dados dos censos e os da SRHE podendo tornar-se numa ferramenta prática e pouco dispendiosa para obtenção de dados relevantes para estudos futuros de risco sísmico.

Os dois métodos utilizados para a estimativa da vulnerabilidade do edificado revelaram-se razoavelmente eficazes, embora a metodologia Vulneralp apresente um grau de danos mais elevado nos edifícios de betão, para as grandes intensidades, do que a metodologia Risk-UE. Esta tendência de a metodologia Vulneralp ‘parecer’ mais pessimista, no que diz respeito às tipologias de betão, já foi constatada por Guéguen *et al.* (2007), o que leva a concluir que, provavelmente, é uma característica inerente ao método em si e não particularmente às tipologias do edificado em estudo. Contudo é fundamental um melhor conhecimento sobre as tipologias do edificado de Ponta Delgada, principalmente dentro das tipologias de betão.

A validação dos resultados para cenários sísmicos não é uma questão trivial por causa das grandes incertezas envolvidas. O melhor teste de validação seria, como é óbvio, a ocorrência de um dos sismos de cenário. O ajuste entre as simulações e os danos observados iria validar o método utilizado bem como as escolhas tidas em conta para a caracterização dos parâmetros mais importantes. O sismo mais recente que abalou o Arquipélago foi o sismo de 1 de Janeiro de 1980. Este evento afectou uma grande percentagem de edifícios nas ilhas do Grupo Central e principalmente na capital da ilha Terceira, Angra do Heroísmo. A intensidade máxima nesta cidade foi de VIII, (na escala de Mercalli Modificada), tendo ficado uma grande parte do edificado, na parte central da cidade, total ou parcialmente destruído (Oliveira *et al.*, 1992). Numa primeira análise, e de uma forma muito simplista e qualitativa, se compararmos os resultados obtidos neste trabalho para um sismo de intensidade VIII, com os danos provocados na cidade de Angra de Heroísmo pelo sismo da de 1980, os cenários estimados pelo método

Vulneralp “parecem” os mais realistas. A grande maioria do edificado da cidade de Angra do Heroísmo na altura era anterior a 1960, factor que influenciou bastante a distribuição dos danos (Teves Costa *et al.*, 2007). O elevado peso dado ao parâmetro “data de construção” em relação aos outros parâmetros tidos em conta no método Vulneralp poderá ter sido também um dos factores a influenciar os resultados obtidos.

Contribuiu também para a margem de erro dos cenários o facto de o número de edifícios em cada subsecção estatística não corresponder ao verdadeiro, principalmente nas zonas mais antigas da cidade, podendo os resultados nessas zonas estar algo distorcidos.

7.2. Considerações finais

Apesar das limitações aqui referidas para a estimativa dos cenários sísmicos em Ponta Delgada, este trabalho apresenta resultados coerentes e os mais realistas possíveis em função dos dados existentes. Estes resultados podem ser uma ferramenta útil para estudos futuros mais pormenorizados, também para a criação de melhores planos de emergência de forma a responder às consequências imediatas de um evento sísmico, bem como para o planeamento de políticas de prevenção conducentes a uma minimização a médio e longo prazo. Deste modo merecem seguimento os seguintes pontos:

- Quando houver dados suficientes na região em estudo deverá ser desenvolvida uma lei de atenuação em termos de aceleração utilizando dados regionais, a fim de melhorar os resultados futuros da avaliação da perigosidade sísmica e do risco sísmico.
- A amplificação do sinal sísmico nas colunas de terreno é uma consequência dos valores estimados para a velocidade das ondas S, e

da profundidade a que está substrato; deveria haver um melhor conhecimento sobre estes parâmetros para uma modelação mais fiável.

- Uma avaliação mais precisa da vulnerabilidade do edificado, melhorando as bases de dados principalmente no que respeita a tipologia do edificado.
- Uma análise do comportamento sísmico pormenorizada de edifícios essenciais, tais como: hospitais, escolas, postos da polícia, bombeiros, edifícios governamentais, etc., bem como os monumentos mais importantes de modo a avaliar a sua condição actual e a sua vulnerabilidade, e recomendar medidas para melhorar a sua resistência sísmica.
- Pesquisas para avaliar os efeitos não-estruturais e para estimar os danos humanos, induzidos e indirectos (vitimas, perdas económicas, etc.).

Fica a esperança de que este trabalho não tenha sido apenas um exercício académico e que contribua de alguma forma para a mitigação do Risco Sísmico das cidades Portuguesas, principalmente da cidade de Ponta Delgada.

Referências Bibliográficas

- Alverne Fr. A. M. (1629-1726) Crónicas da Província de S. João Evangelista das ilhas dos Açores. 1ª ed. Ponta Delgada. Instituto Cultural de Ponta Delgada, 1961. V. II. 520 p. In Silveira J. L. (2002) Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico. *Tese Mestrado*. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 149 p.
- Ambraseys N. N., Simpson K. A., Bommer J. J. (1996) Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 371-400.
- Bender B. (1984) Seismic hazard estimation using a finite-fault rupture model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 74, nº 5, p. 1899-1923.
- Bender B. and Perkins D. (1987) SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1772.
- Benedetti D. and Petrini V. (1984) On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. *L'Industria delle Costruzioni* 18, 66-78 (in Italian).
- Boore D. M., Joyner W. B., Fumal T. E. (1997) Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of recent Work, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 128-153.
- Boore D. M. (2005) Erratum: Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work. *Seismological Research Letters*, Vol. 76, No. 3, 368-369.

-
- Bufo E., Borges J., Bezzeghoud M., Caldeira B. (2009) The 2007 Azores earthquakes: A case of triggering? *EGU- European Geosciences Union. General Assembly. Vienna, Austria, 19-24 April.*
- Carvalho A., Sousa M. L., Oliveira C. S., Nunes J. C., Campos-Costa A., Forjaz V. H. (2001) Seismic hazard for the Central Group of the Azores Islands. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata. Vol.42, n°1-2, pp. 89-105.*
- Censos (2001) Resultados Definitivos. *Instituto Nacional de Estatística (INE).*
- Chagas Fr. D. 1576-16?? - Espelho cristalino em jardim de várias flores. 1° ed. Direcção Regional dos Assuntos Culturais. *Centro de Estudos Doutor Gaspar Frutuoso da Universidade dos Açores*, 1989. Ponta Delgada. Açores. 731 p. In Silveira J. L. (2002) Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico. *Tese Mestrado. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 149 p.*
- Chouliaras G. (2009) Investigating the earthquake catalog of the National Observatory of Athens. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, p.905–912.
- Combescure D., Guéguen P., Lebrun B. (2005) Vulnérabilité sismique du bâti existant: approche d'ensemble. *Cahier technique AFPS*, 25, 121 pages.
- Cordeiro Pe. A. (1641-1722) Historia insulana das ilhas a Portugal sugeytas no oceano occidental. 3ª ed. [reimpressão fac-similada da 1ª ed. De 1717]. Secretaria Regional da Educação e cultura, 1981. Região Autónoma dos Açores. 528 p. In Silveira J. L. (2002) Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico. *Tese Mestrado. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 149 p.*

- Cornell C. A. (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1): 1583–1606.
- Correia M. J., Reis P., Costa Nunes J., Moreira V. S. (1992) A Sismicidade Histórica dos Açores e o Sismo de 1 de Janeiro de 1980. In Oliveira C. S., Lucas A. R. A., Guedes J. H. C (Eds.)- 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980. *Açores: Secretaria Regional da Habitação e Obras Publicas/ Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, p.127-134.
- CVARG - Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (2011) <http://www.cvarg.azores.gov.pt/Cvarg/> (site acedido em Dezembro 2011).
- Dias F. (2011) <http://cm-pontadelgada.azoresdigital.pt> (site acedido em Dezembro 2011).
- Dolce M., Masi A., Marino M. Vona M. (2003) Earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) including site effects. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1, 115-140.
- Ergunay O. and Gulkan P. (1991) Seismic risk reduction and disaster management: national report of Turkey. *Proceedings of workshop on seismic risk reduction and disaster management*, Roma, Italy, November, 1.
- EC8-Eurocódigo 8 (2010): NP EN 1998-1, Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras Gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Instituto Português de Qualidade.
- ESD European Strong Motion Database (site acedido em Dezembro 2011) http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm
- Faccioli E., Pessina V., Calvi G.M., Borzi B. (1999) A study on damage scenarios for residential buildings in Catania City. *Journal of seismology*, 3(3), 327-343.

-
- FEMA 154 (1988) Rapid Visual Screening of Buildings for Potential seismic Hazards: Supporting Documentation. FEMA, Washington.
- FEMA 178 (1992) NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings. Federal Emergency Management Agency.
- Ferreira T. (2000) Caracterização da actividade vulcânica da ilha de S. Miguel (Açores): vulcanismo basáltico recente e zonas de gaseificação. Avaliação de riscos. *Tese de Doutoramento*. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 233 p.
- Forjaz V. H., Nunes J. C., Guedes J. H. C., Oliveira C. S. (2001) Classificação geotécnica dos solos vulcânicos dos Açores: uma proposta. *II Simpósio de Meteorologia e Geofísica – Comunicações de Geofísica*. Évora. Portugal; 76-81.
- Frankel A. (1995) Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, 66(4): 8–21.
- Frutuoso G. (1522-1591) Livro Quatro das Saudades da Terra. In Frutuoso, G., «Saudades da Terra». 2º ed. Instituto Cultural de Ponta Delgada, 1981, V. II. Ponta Delgada. Açores. In Silveira J. L. (2002) Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico. *Tese Mestrado*. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 149 p.
- Gardner J. K. and Knopoff L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, poissonian?. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol.64, nº5, p. 1363-1367.
- Geopsy Project (2008) Geopsy: Software for ambient vibration techniques, <http://www.geopsy.org> (site acedido em Dezembro de 2011).

- GNDT (1993) Rischio Sismico di Edifici Pubblici - Parte I: aspetti metodologici. Centro Servizi Quasco, Bologna.
- Grünthal G. (1998) European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol. 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 pp.
- Guéguen P. Michel, C. LeCorre L. (2007) A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 5, n° 3, pp. 467–490.
- Gutenberg and Richter (1944) Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 34, n° 4, p. 1985-1988.
- HAZUS (1999). Earthquake loss estimation methodology. Hazus Technical manuals. National Institute of Building Science, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington.
- Ishibashi I. and Zhang X. (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1, pp. 182-191.
- Kanamori H. (1983) Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics* 93: 185-199
- Konno K. and Ohmachi T. (1998) Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 1, pp. 228-241.
- Kramer S. L. (1996) Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, New Jersey, 651p.
- Lantada N., Irizarry J., Barbat A. H., Goula X., Roca A., Susagna T., Pujades, L. G. (2010) Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8:201–229

-
- Lourenço N., Miranda M., Luis J., Ribeiro A., Mendes-Victor L. A., Madeira J., Needham N. H. (1998) Morpho-tectonic analysis of the Azores volcanic plateau from a new bathymetric compilation of the area. *Marine Geophysical Researches*, No. 20, pp. 141-156.
- Madeira J. and Ribeiro A. (1990) Geodynamic models for the Azores triple junction: a contribution from tectonics. *Tectonophysics*, 184, p. 405-415.
- Madeira J. (1998) Estudos de neotectónica nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge: uma contribuição para o conhecimento geodinâmico da junção tripla dos Açores. *Tese de Doutoramento*. Universidade de Lisboa. Lisboa. 481 p.
- Maldonado Pe. M. L. (1644-1711) Fénix angrense. 1º ed. Instituto histórico da ilha Terceira, 1990. V. 2º. Angra do Heroísmo. Açores. 717 p. In Silveira J. L. (2002) Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico. *Tese Mestrado*. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 149 p.
- Malheiro A. M. and Nunes J. C. (2007) Volcanostratigraphic profiles for the Azores Region: a contribution for the EC8 Regulations and the characterization of volcanic rocks geomechanical behaviour. *Volcanic Rocks*. Ed. Taylor & Francis. Páginas 59-64.
- McGuire R. K. (1976) Fortran computer program for seismic risk analysis, US Geological Survey open-File Report 76-67.
- Nakamura Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute*, vol.30, nº1, pp. 25-33.

- Nakamura Y. (1996) Real- time information systems for seismic hazards mitigation- UrEDAS, HERAS and PIC. *Railway Technical Research Institute (RTRI)*, vol.37, nº. 3, pp. 112-127.
- Nakamura Y. (2000) Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Nunes J. C., Alves J. L., Forjaz V. H. (1992) Sismicidade instrumental dos Açores no período 1980-89: implicações neotectónicas - 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980. Secretaria Regional da Habitação e Obras Públicas/ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1, pp. 163-174.
- Nunes J. C., Teves Costa P., Senos M. L. (1999) Estudos de sismicidade no Arquipélago dos Açores- aplicação ao sismo de 9 de Julho de 1998. *4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*. 1º ed., Universidade do Algarve, 2, pp.19-28.
- Nunes J. C., Forjaz V. H., Oliveira C. S. (2004) Catálogo sísmico da região dos Açores – Versão 1.0 (1850-1998). *Sísmica 2004 – 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, Guimarães 14-16 Abril, 349-357 & CD.
- Oliveira C. S., Lucas A., Correia Guedes J. H (1992) 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980. Secretaria Regional da Habitação e Obras Públicas, Delegação da Ilha Terceira, Açores & Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Otani S. (2000) Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2(2), 47-56.
- PEER Strong Motion Database. [Http://peer.berkeley.edu/smcat](http://peer.berkeley.edu/smcat) (site acedido em Dezembro 2011).

-
- Pousse G., Bonilla L. F., Cotton F., Margerin L. (2006) Nonstationary Stochastic Simulation of Strong Ground Motion Time Histories Including Natural Variability: Application to the K-Net Japanese Database. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 2103–2117.
- ProShake. Ground response analysis program - Version 1.1. EduPro Civil Systems, Inc., Redmond, Washington.
- 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). *5º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG: APMG 2007*. Peniche. 5 - 8 de Fevereiro.
- Risk-UE (2004) An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Technical Report EVK4-CT-2000-00014, European Project, Brussel. YRL
- RSA (1983). Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes. *Decreto-Lei nº235/83, de 31 de Maio*. Porto Editora.
- Sabetta F. and Pugliese A. (1996) Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 2, 337-352.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B. (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.
- Secanell R. (1999) Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics, *Ph.D. Thesis*, University of Barcelona. In Lantada N., Irizarry J., Barbat A. H., Goula X., Roca A., Susagna T., Pujades, L. G. (2010) Seismic hazard and risk

- scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8:201–229
- Seed H. B. and Idriss I. M. (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M., Tokimatsu K. (1984) Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1016-1032
- Seismocare (1998) Seismocare Computed Aided Reduction of Seismic Risk with application to existing cities, town planning and construction - Directions to fill in the vulnerability form GNDT levels 1 and 2. *European project Environment and Climate*, 1994-1998, ENV4-CT97-0588.
- Senos M. L., Gaspar J. L., Carrilho F., Queiroz G., Alves P. M., Ferreira T. (1997) Estrutura do Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores- SIVISA. 3º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. 1º ed. Lisboa: 3 a 5 de Dezembro, p. 31-38.
- Sesame, WP03 Team (2003) Multiplatform H/V processing software J-SESAME. Deliverable D09.03, June.
- Sesame, WP12 Team (2004) Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12.
- Silveira J. L. (2002) Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico. *Tese Mestrado*. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. Açores. 149 p.

-
- Silveira D., Gaspar J. L., Ferreira T., Queiroz G. (2003) Reassessment of the historical seismic activity with major impact on S. Miguel Island (Azores). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, pp. 615–623.
- Silvestre P., Teves Costa P., Escuer M., Correia G., Cadet H., Senos M. (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. 30 Janeiro-3 Fevereiro.
- Silvestre, P. and Teves-Costa, P. (2006). Seismic characterization of the building stock in Ponta Delgada – a first attempt. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, Switzerland, 3-8 September. Paper Number: 323
- Sun J. I., Goleorkhi R., Seed, H. B. (1988) Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Report No. EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Teves Costa P., Oliveira C., Senos L. (2007) Effects of local site and building parameters on damage distribution in Angra do Heroísmo –Azores. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, pp. 986–999.
- Vucetic M. and Dobry R. (1991) Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.
- Wiemer S. and Malone S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(2): 374-383.
- Zbyszewski G., D’Almeida F., Veiga O., Torre C. (1958) Carta geológica de Portugal na escala 1/50 000: notícia explicativa da folha «B», S. Miguel (Açores). Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

Zbyszewski G., Ferreira O., Assunção C. (1959) Carta geológica de Portugal na escala 1/50 000: notícia explicativa da folha «A», S. Miguel (Açores). Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

Zbyszewski G. (1961) Étude géologique de l'île de S. Miguel (Açores). *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*. Lisboa. 45, p.5-79.

ANEXOS

Anexo A: Tipos de Terreno (EC8-Norma Portuguesa)

Tabela A.1: Tipos de terreno segundo a classificação do (EC8, 2001)

Tipo de Terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (pancadas/30cm)	C_u (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície	> 800	-	-
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, 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 de água	>100 (indicativo)	-	10-20
S₂	Depósitos de solos com potencial de liquefacção, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A-E ou S ₁			

Tabela A.2: Terrenos dos Açores. Perfil 1 (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Espessuras das camadas (m)	Materiais das camadas
0.2 - 0.4	Solo vegetal
10.0 - 12.0	Traquito ou ignimbrito soldado
3.0 - 5.0	Basalto pahoehoe composto (pequenas escoadas geralmente muito fracturadas, sobrepostas)
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
2.0 - 3.0	Basaltos mais compactos

Tabela A.3: Terrenos dos Açores. Perfil 2 (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Espessuras das camadas (m)	Materiais das camadas
0.4 - 0.6	Solo vegetal
1.0 - 5.0	Tufos surtenseianos do Monte Brasil com elevada compacidade
10.0 - 15.0	Sequência pliniana (depósitos pomíticos de queda e ignimbritos soldados e não soldados)
5.0 - 10.0	Basaltos

Tabela A.4: Perfil 3 (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Espessuras das camadas (m)	Materiais das camadas
0.4 - 0.6	Solo de cobertura
0.0 - 3.0	Solo pomítico castanho, geralmente areno-siltoso ou arenoso, por vezes podendo apresentar pequenas intercalações de piroclásticos basálticos, normalmente de pequenas dimensões
1.0 - 3.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basalto
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 1.0	<i>Lapilli</i> ou cinzas
1.0 - 2.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basalto
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 3.0	Basalto
0.0 - 1.0	<i>Clinker</i>

Tabela A.5: Terrenos dos Açores. Perfil 4 (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Espessuras das camadas (m)	Materiais das camadas
0.5 – 1.0	Solos superficiais (solo vegetal, aterros, solos pomíticos)
1.0 - 2.0	<i>Clinker</i>
2.0 - 3.0	Basalto
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
0.5 - 1.0	<i>Lapilli</i> ou cinzas
1.0 - 2.0	<i>Clinker</i>
2.0 - 3.0	Basalto
0.5 - 1.0	<i>Clinker</i>
5.0- 10.0	Sequência pliniana (alternância de solos pomíticos castanhos, geralmente areno- siltosos ou silto arenosos com níveis de pedra pomes de queda, mais ou menos grosseira e paleosolos. A espessura destes níveis é muito variável, geralmente entre os 0.50 m a 2.0 m – 3.0 m, excepto a dos paleosolos, cuja espessura é geralmente inferior a 0.50 m ou 0.60 m)
0.0 – 1.0	<i>Clinker</i>

Tabela A.6: Terrenos dos Açores. Perfil 5 (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Espessuras das camadas (m)	Materiais das camadas
0.4 - 0.6	Solo vegetal
0.0 - 20.0	<p>Alternâncias de solos pomíticos castanhos, geralmente areno-siltosos ou silto arenosos com níveis de pedra pomes de queda, mais ou menos grosseira e paleosolos. A espessura destes níveis é muito variável, geralmente entre os 0.50 m a 2.0 m – 3.0 m, excepto a dos paleosolos, cuja espessura é geralmente inferior a 0.50 m ou 0.60 m.</p> <p>Por vezes, também pode aparecer nestes perfis níveis de material de fluxo (<i>mudflows, lahars</i>) com espessuras consideráveis (superiores a 5 m), com matriz predominantemente arenosa com fragmentos líticos de variadas dimensões podendo, em alguns casos, serem de grandes dimensões.</p>

Tabela A.7: Velocidades médias de propagação das ondas de corte nos perfis estratigráficos tipo considerados para os terrenos dos Açores (Anexo Nacional do EC8, 2010)

Perfis	Velocidades de propagação (m/s)
Perfil 1	1500
Perfil 2	850
Perfil 3	750
Perfil 4	530
Perfil 5	330

Tabela A.8: Correspondência, para efeito de definição da configuração do espectro de resposta, entre os perfis estratigráficos dos Açores e os tipos de terrenos da tabela A.1

Perfis	Tipos de terreno
Perfil 1	A
Perfil 2	B
Perfil 3	B
Perfil 4	B
Perfil 5	C

Anexo B: Curvas H/V

Figura B.1: Localização dos pontos de registo de vibrações ambientais, com a respectiva numeração, sobre a cartografia das diferentes litologias.

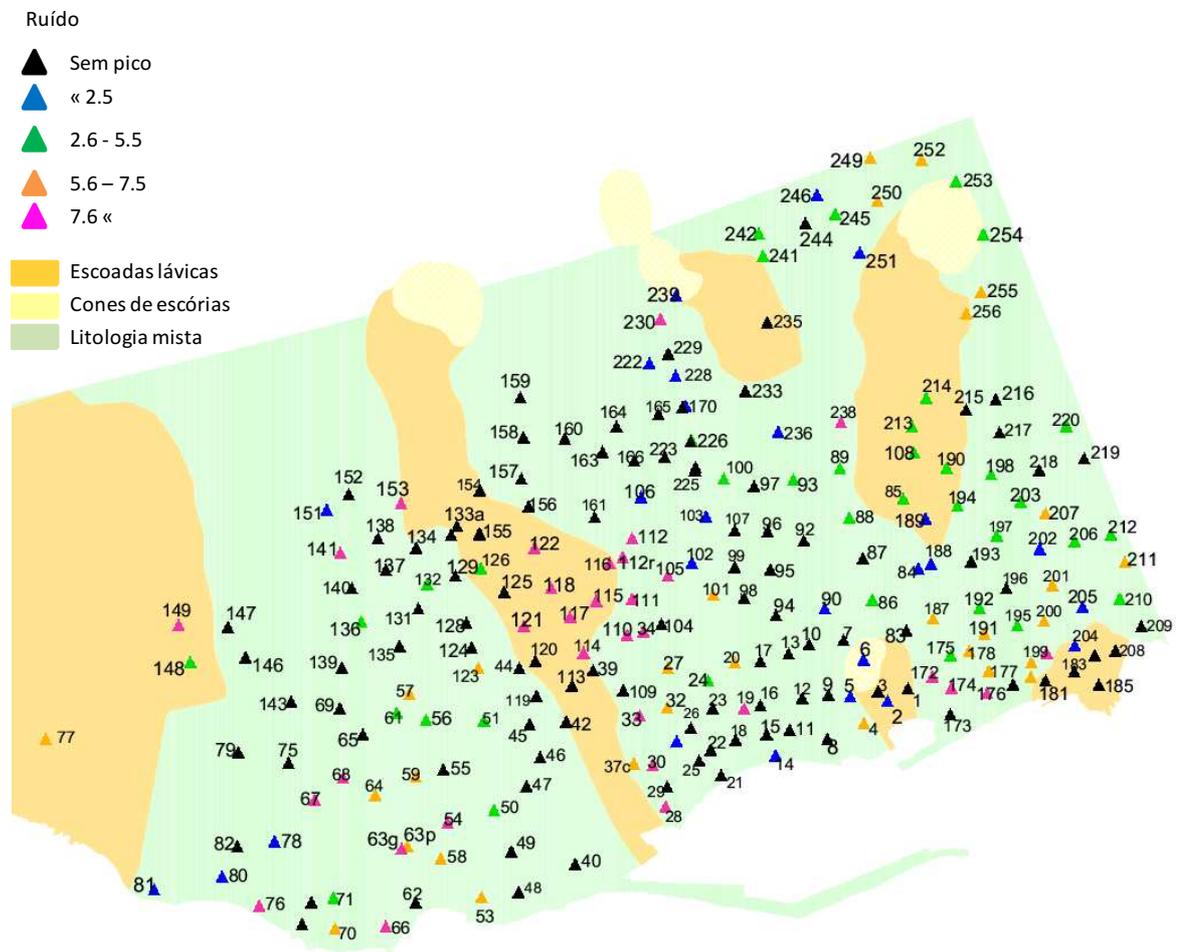
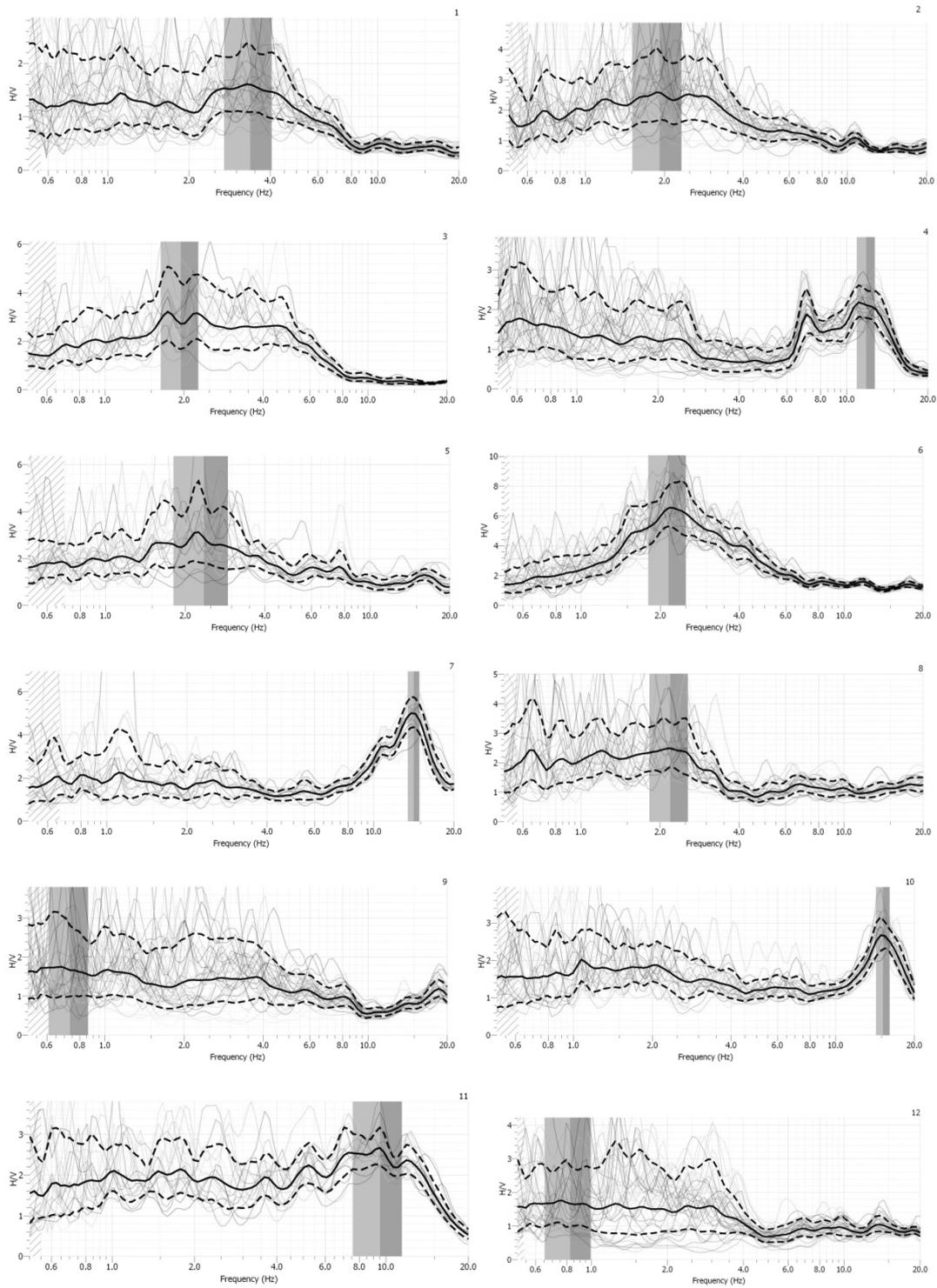
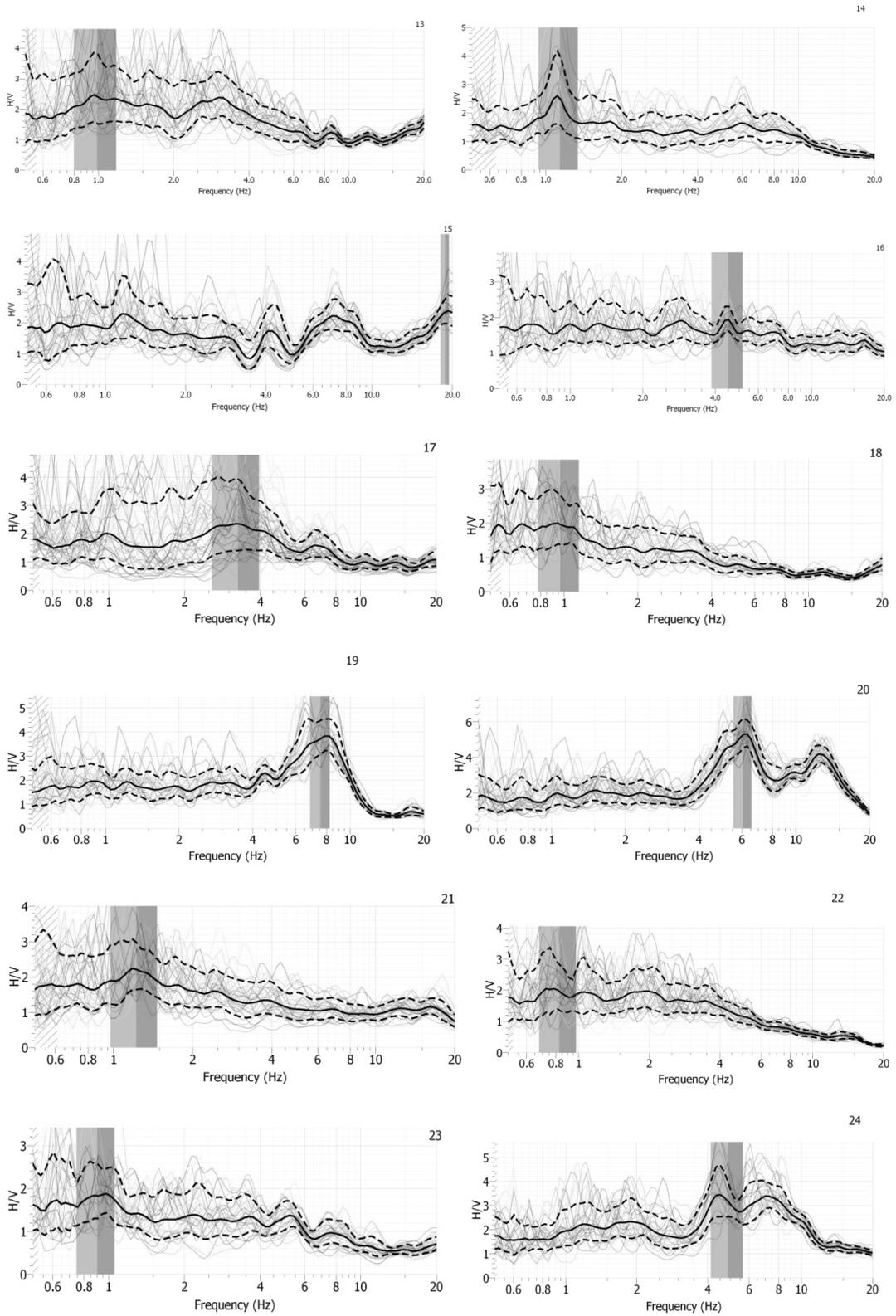
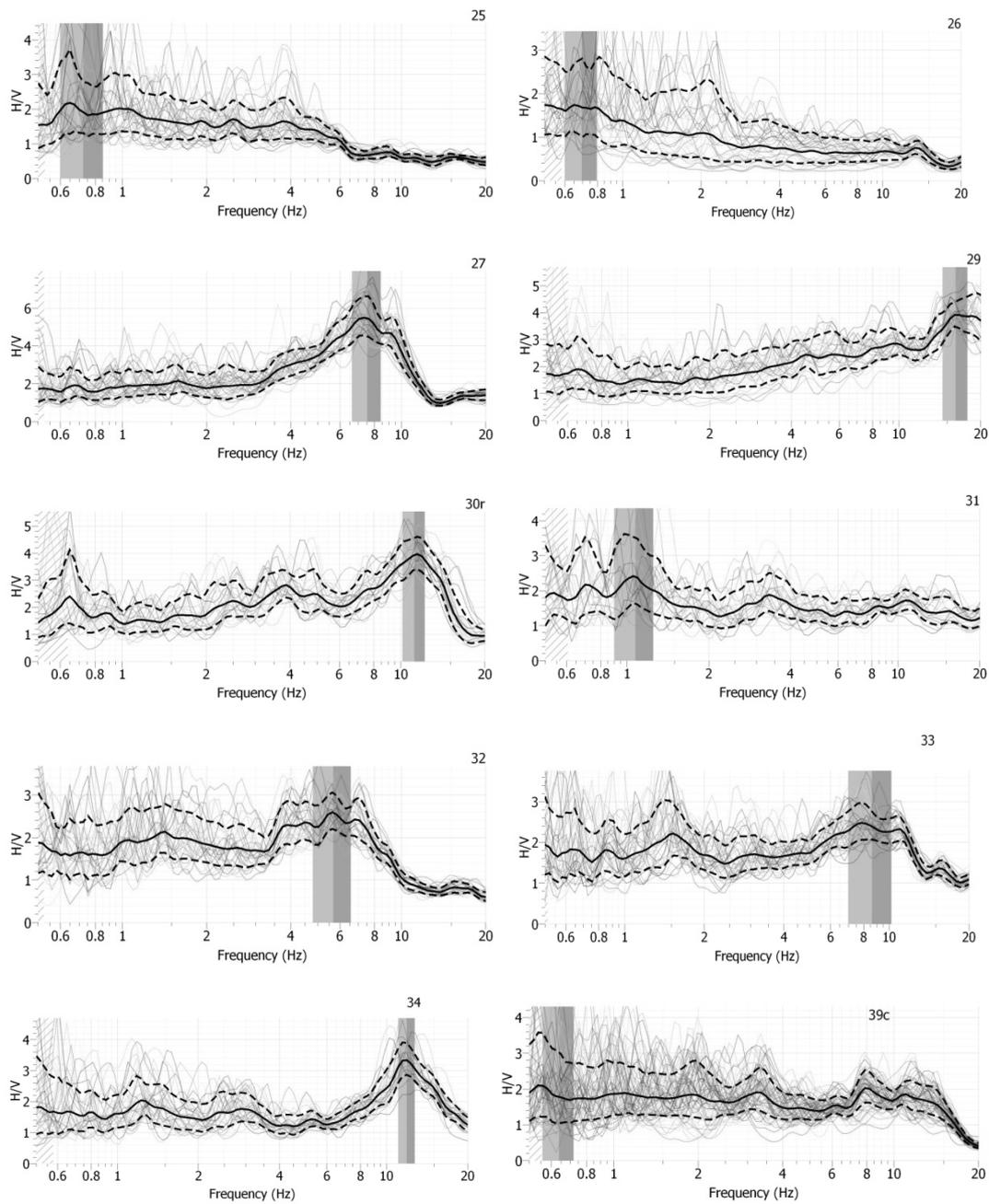


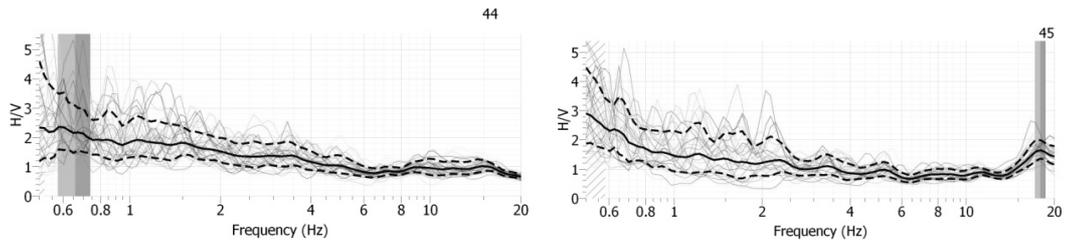
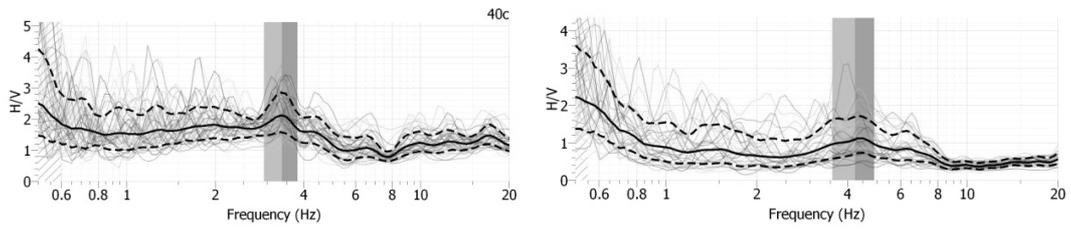
Figura B.2: Curva H/V para os diferentes pontos de registo de vibrações ambientais



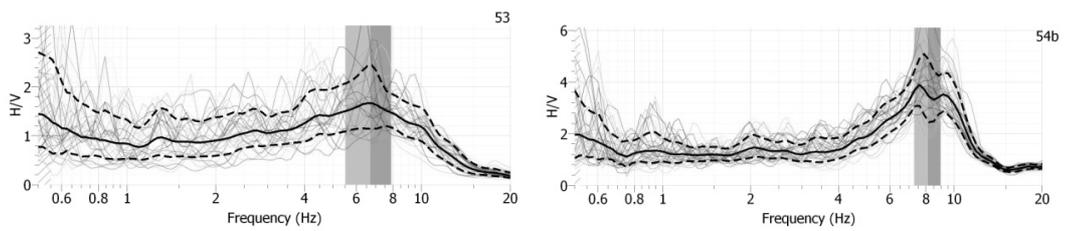
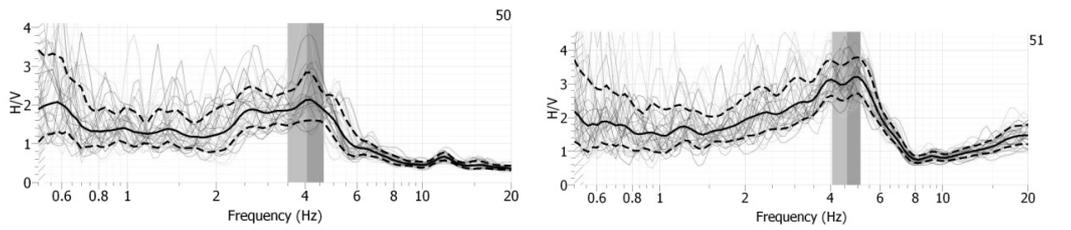
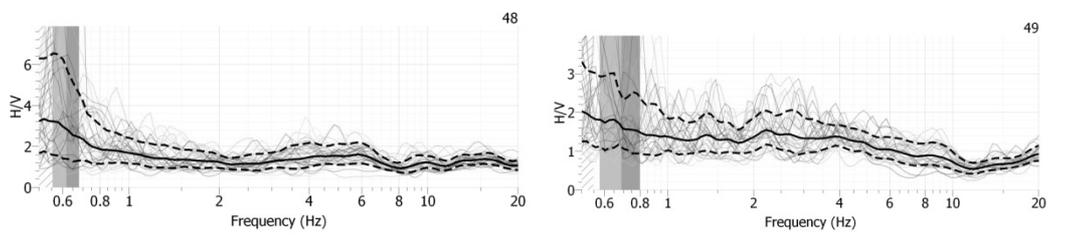
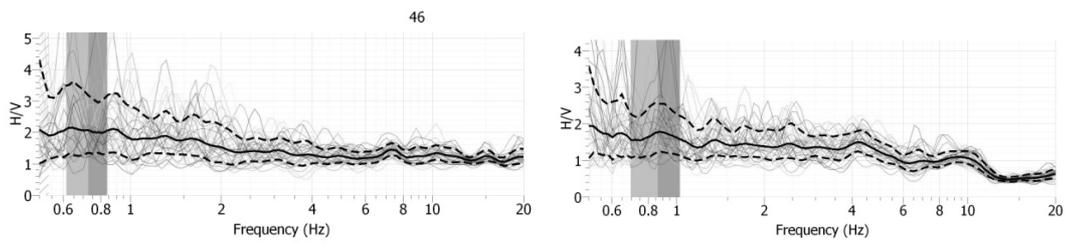


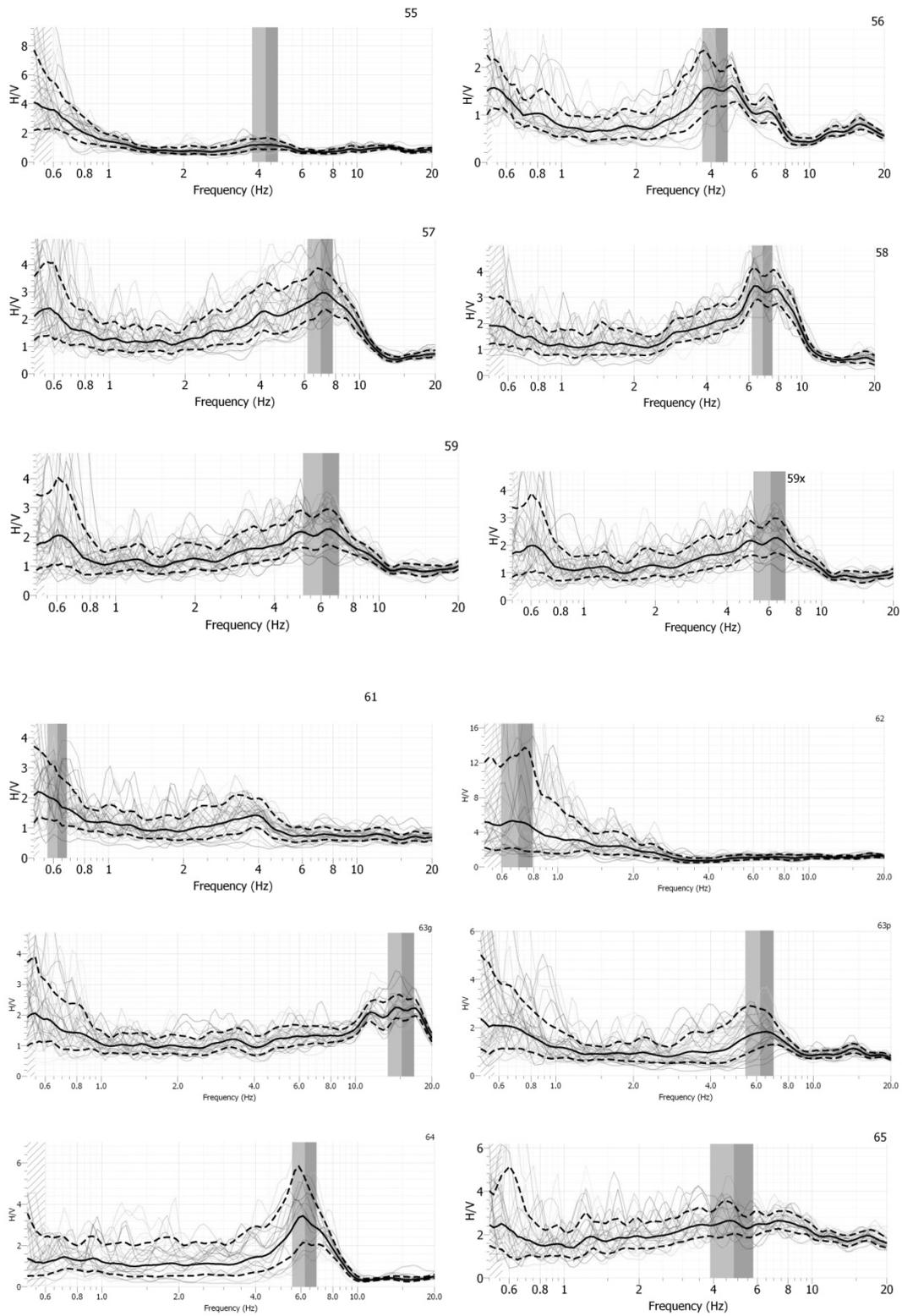


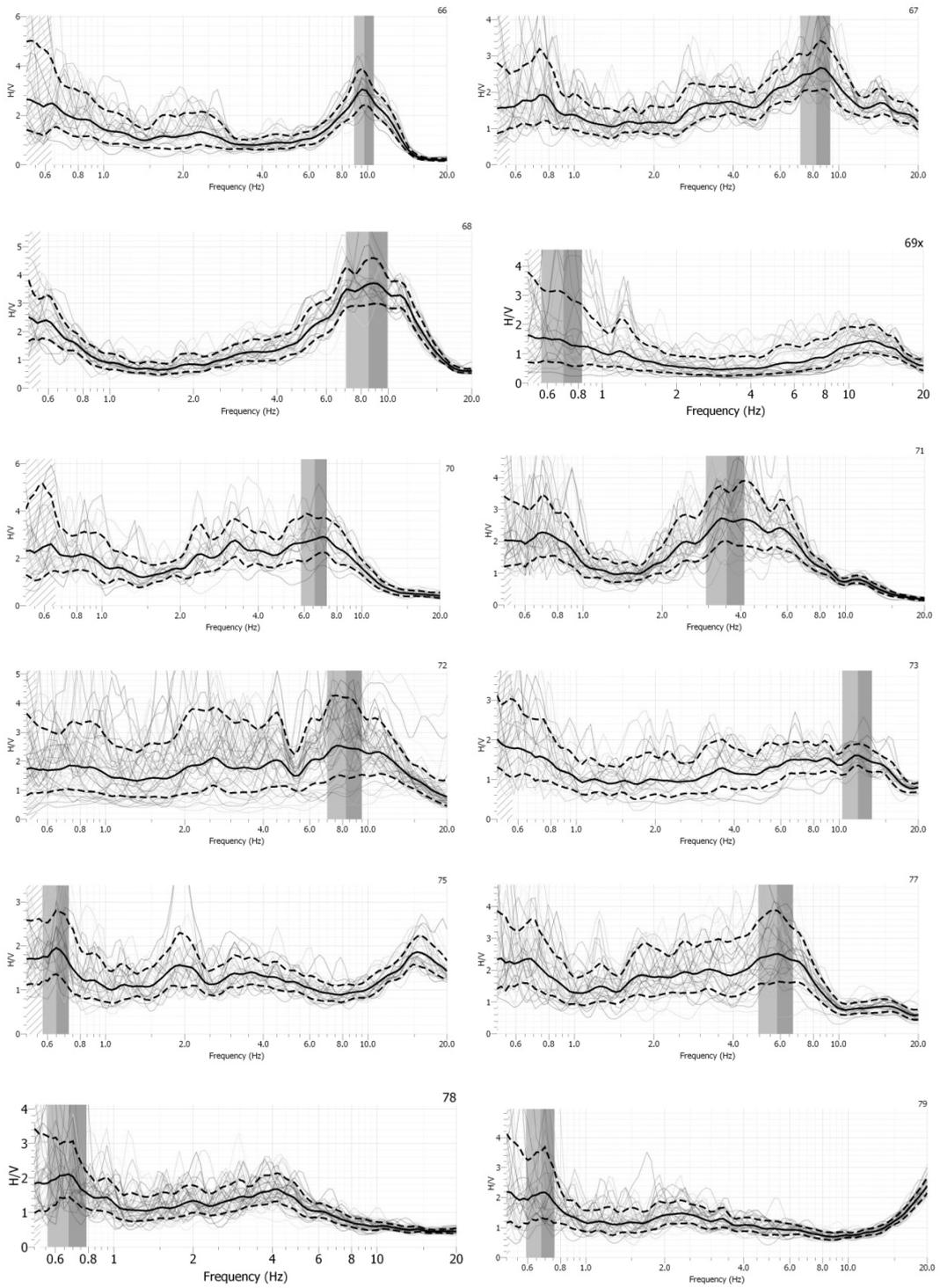
42

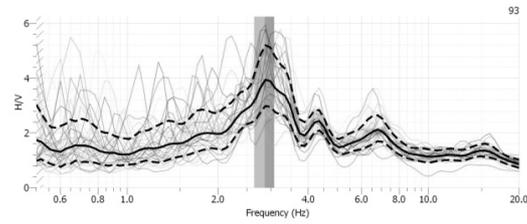
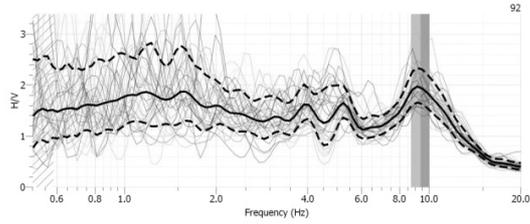
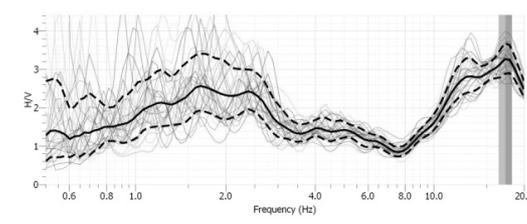
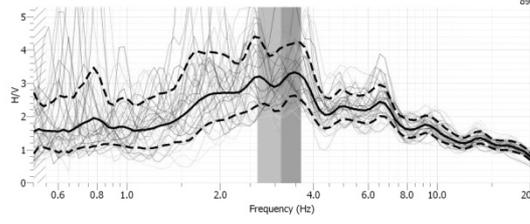
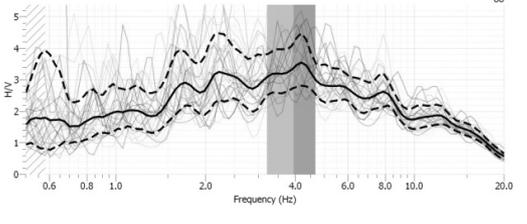
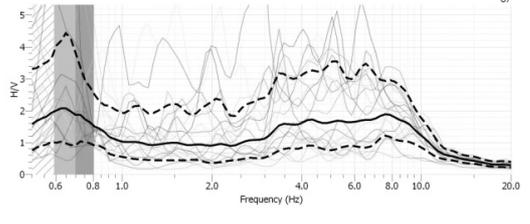
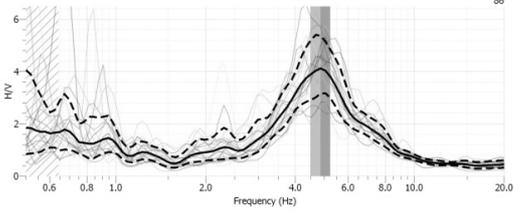
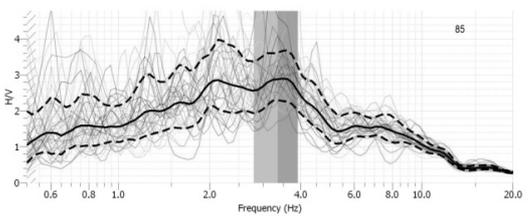
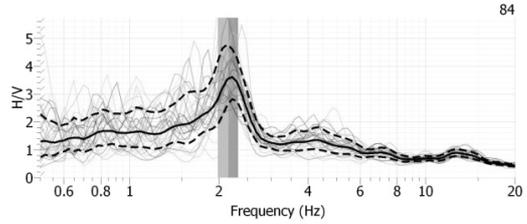
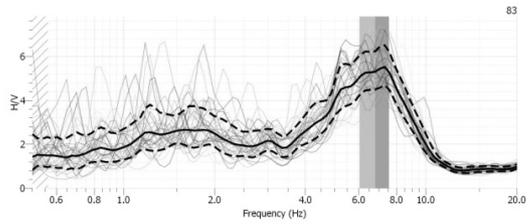
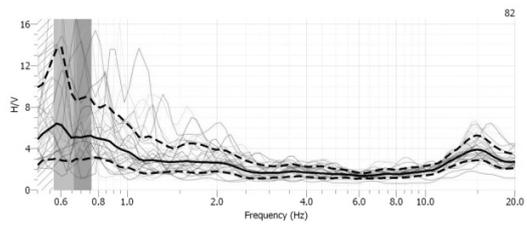
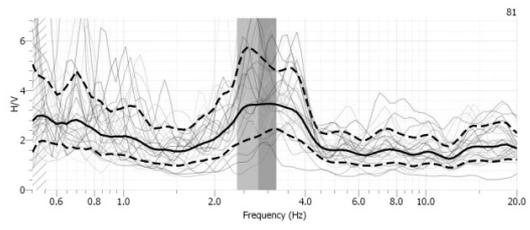


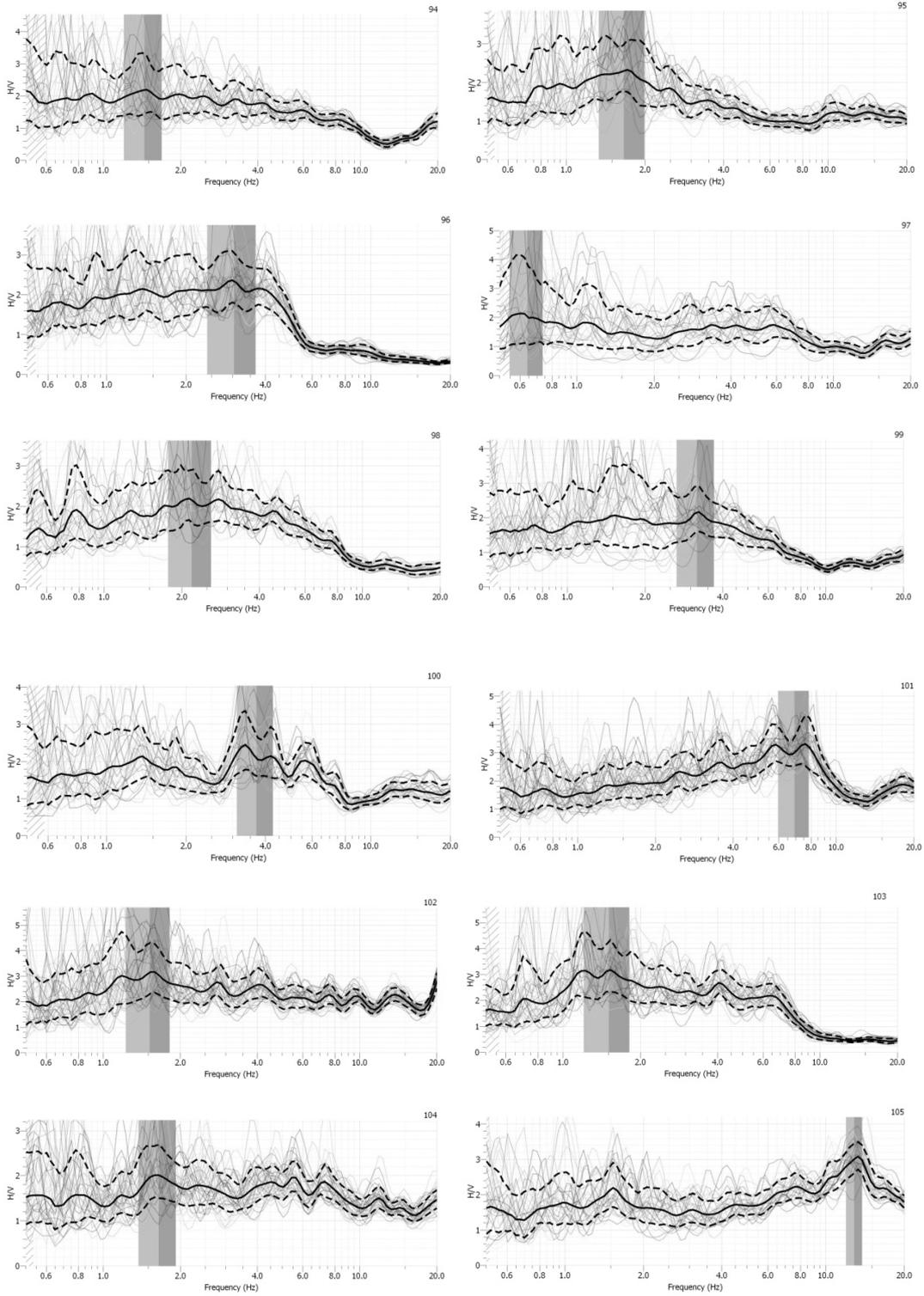
47

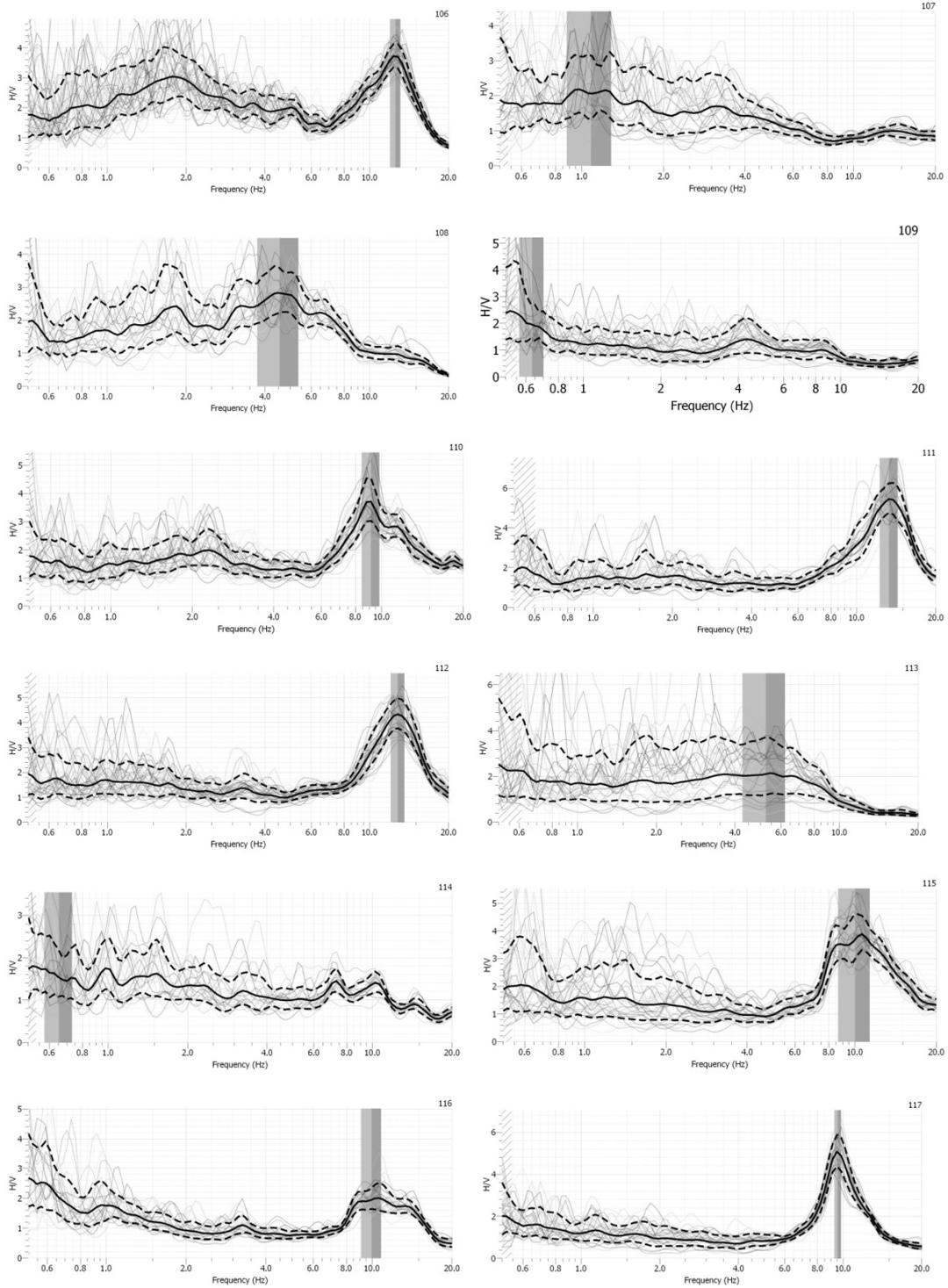


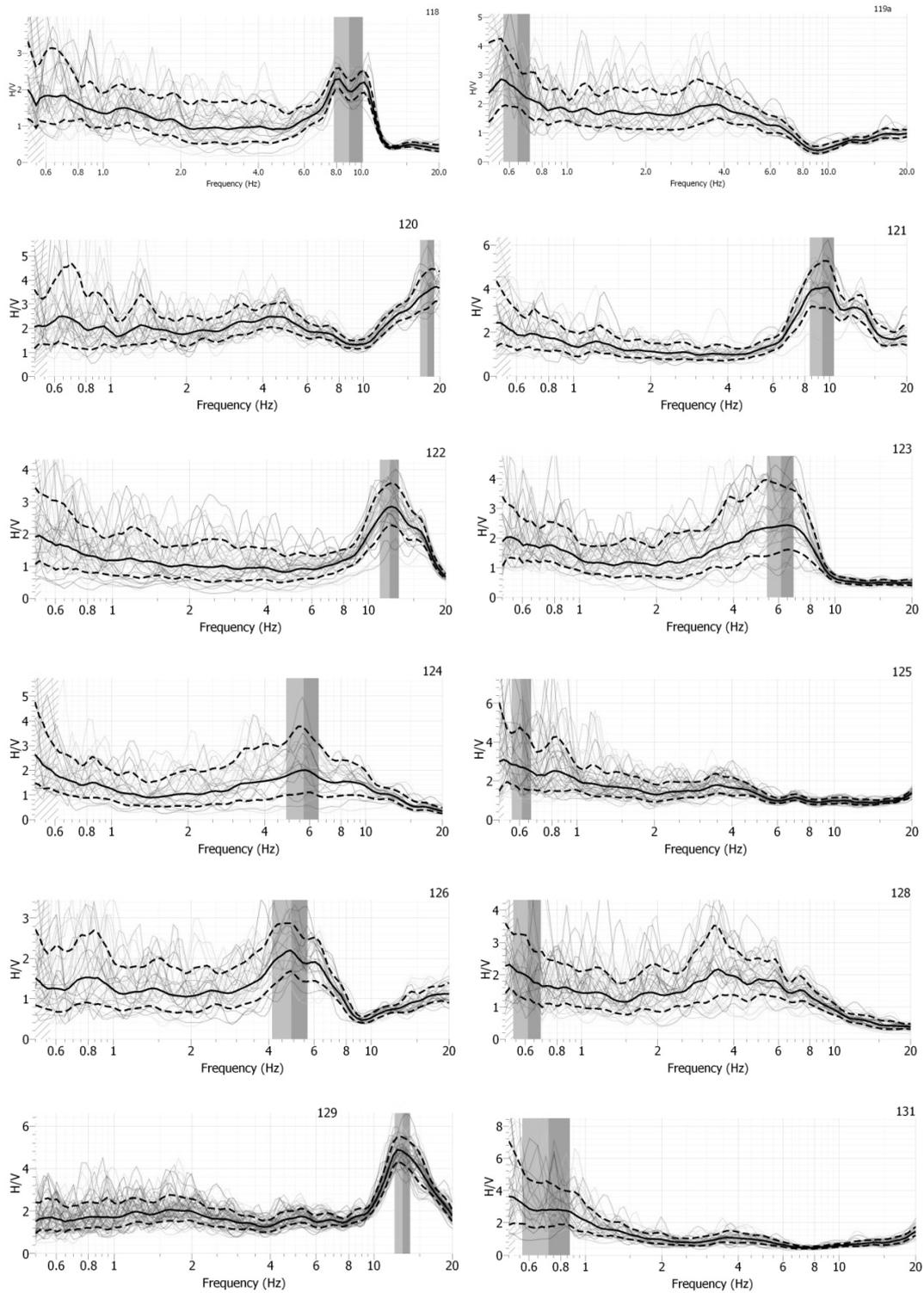


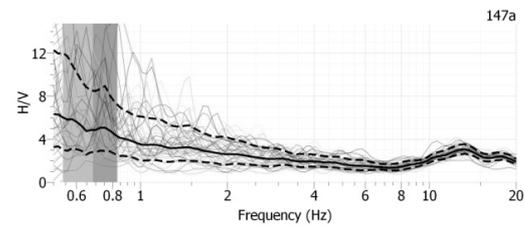
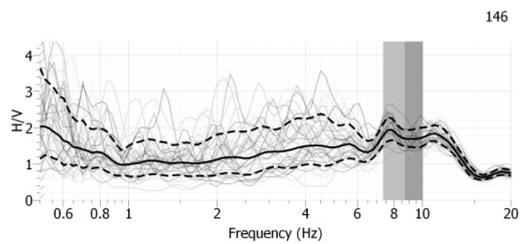
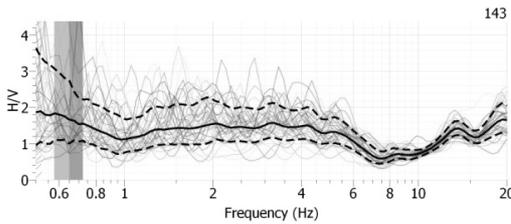
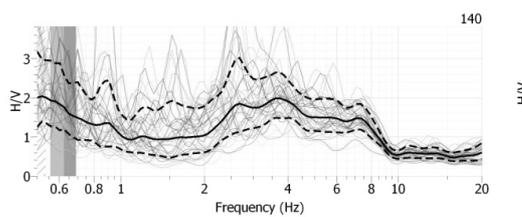
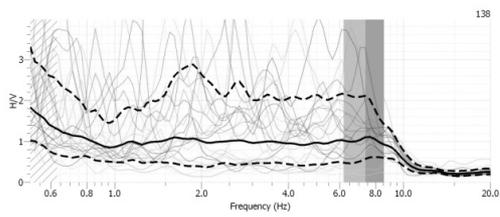
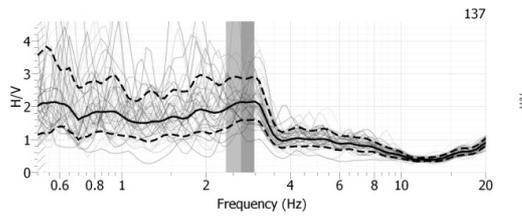
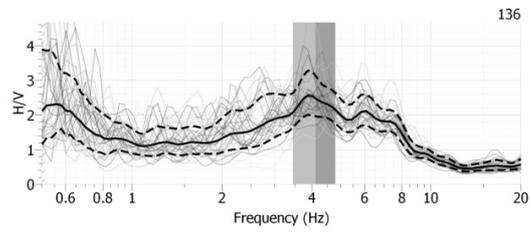
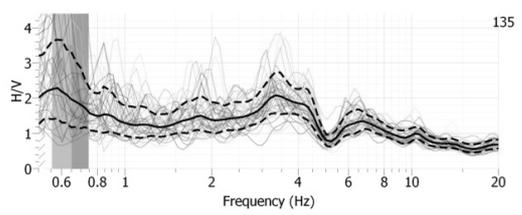
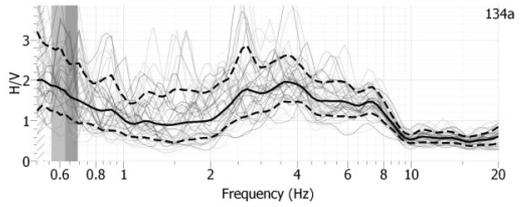
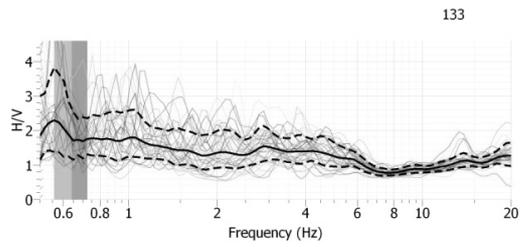
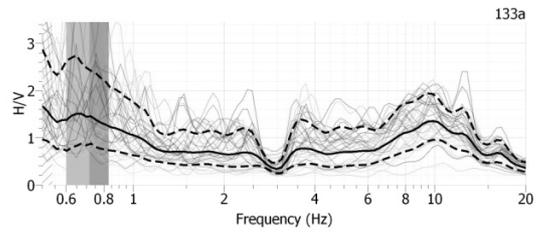
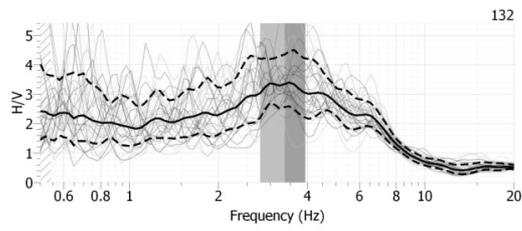


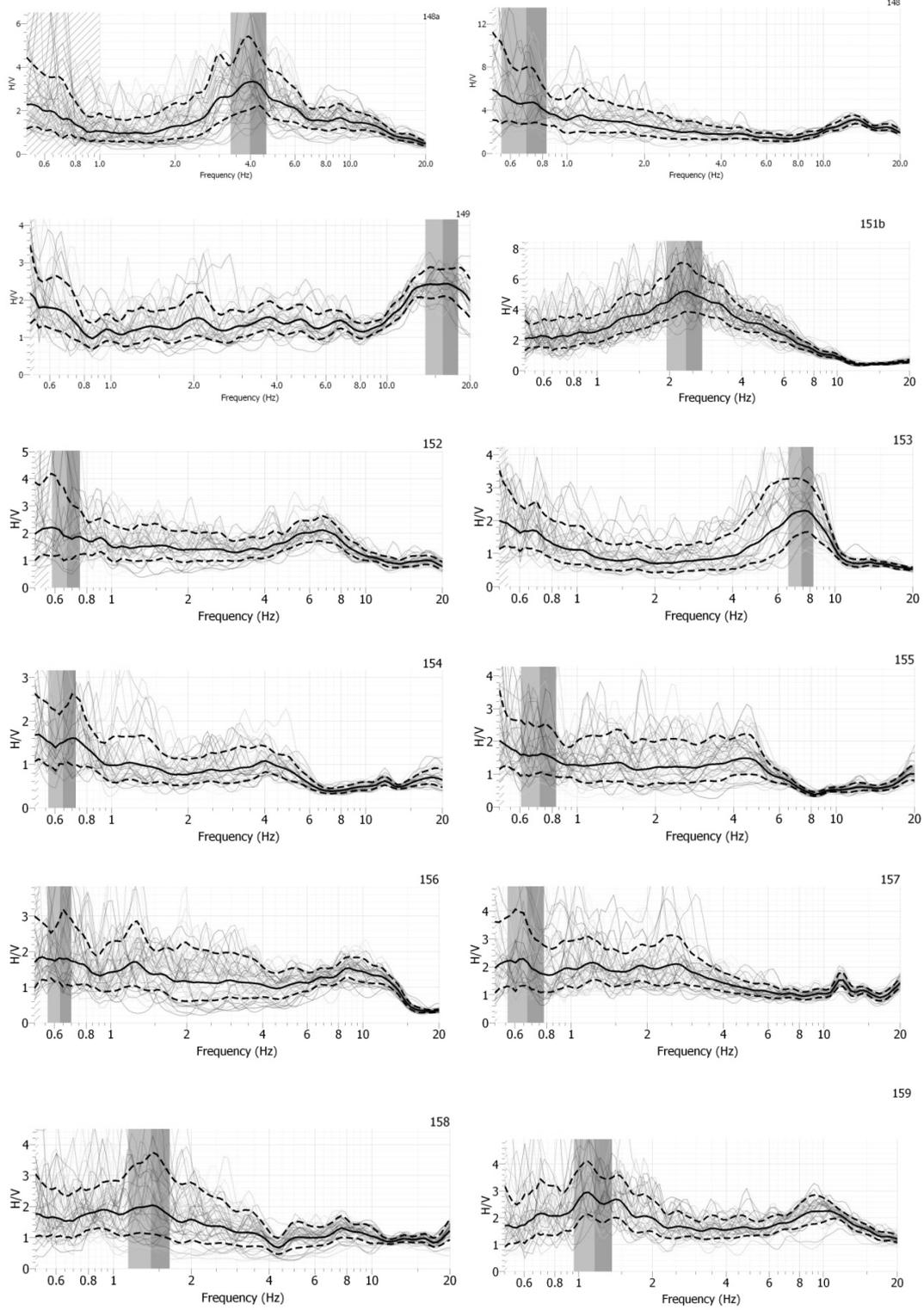


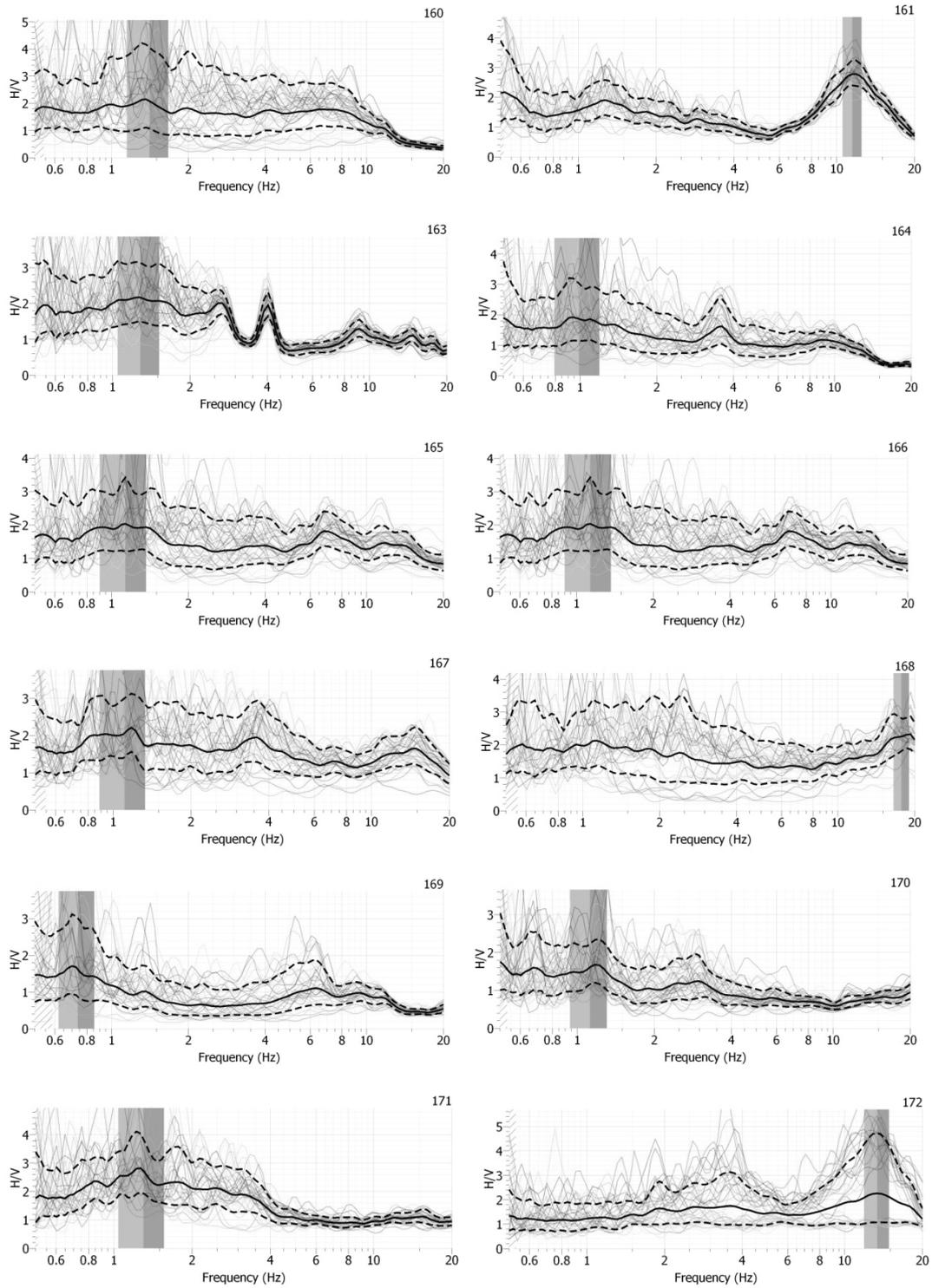


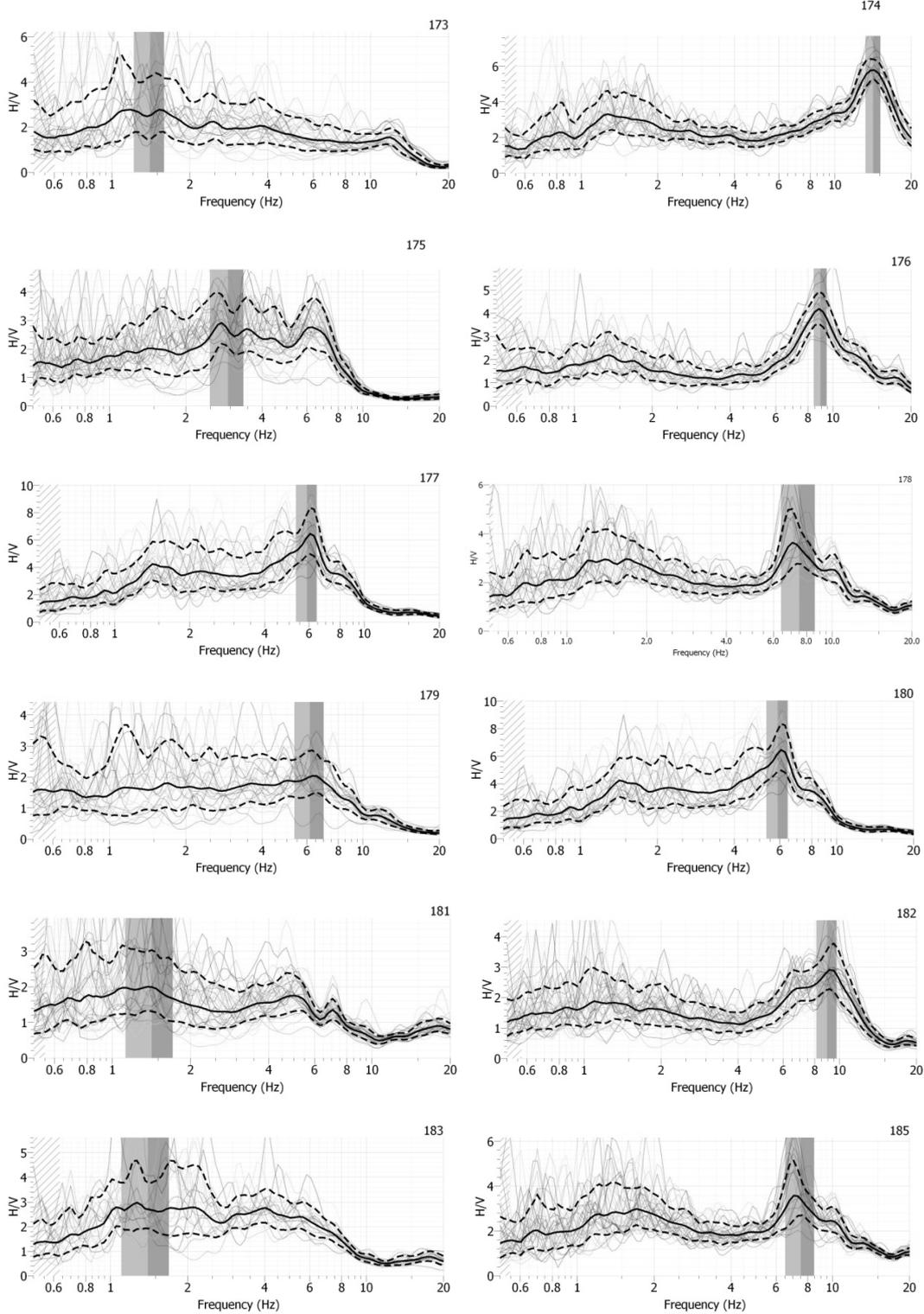


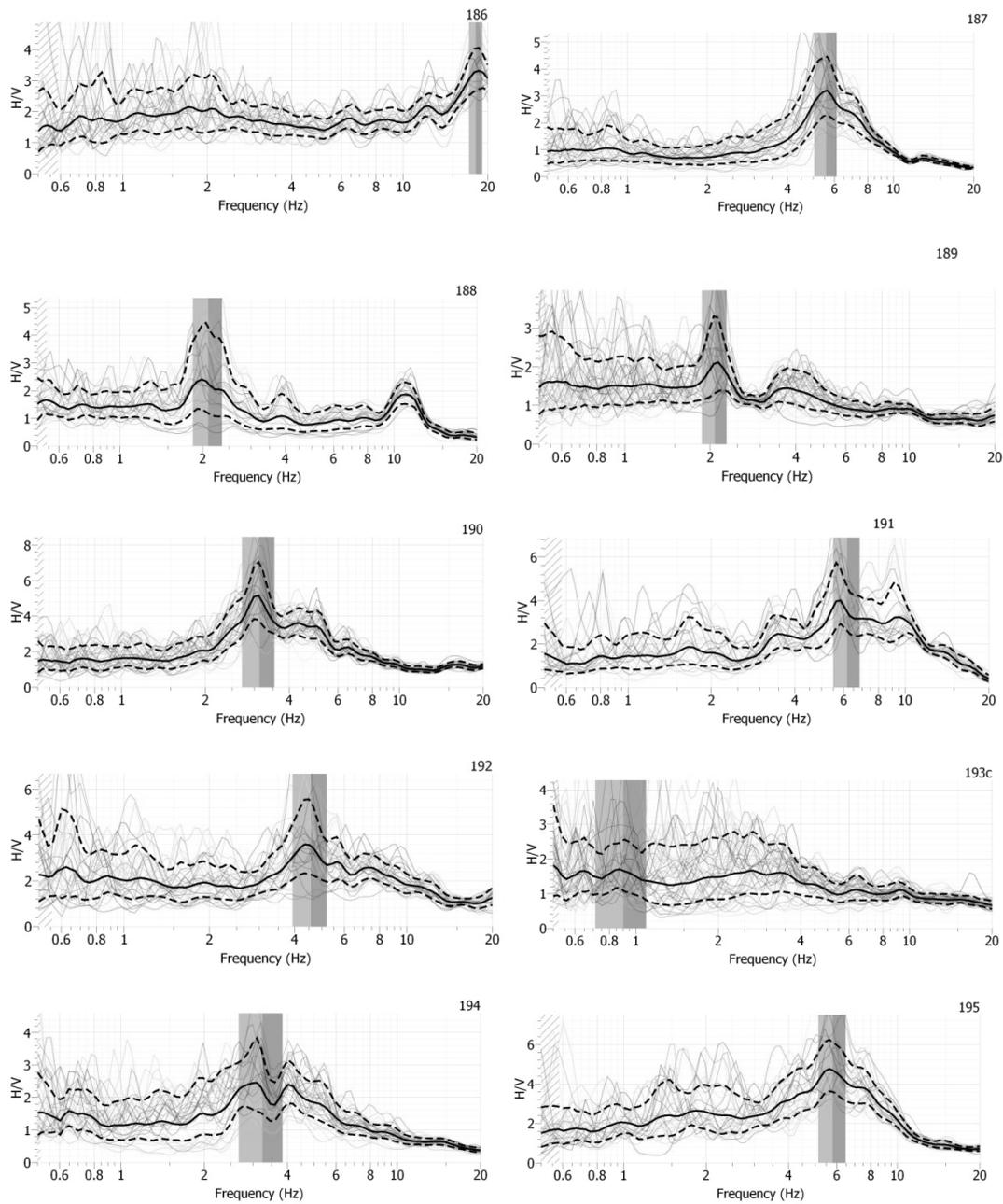


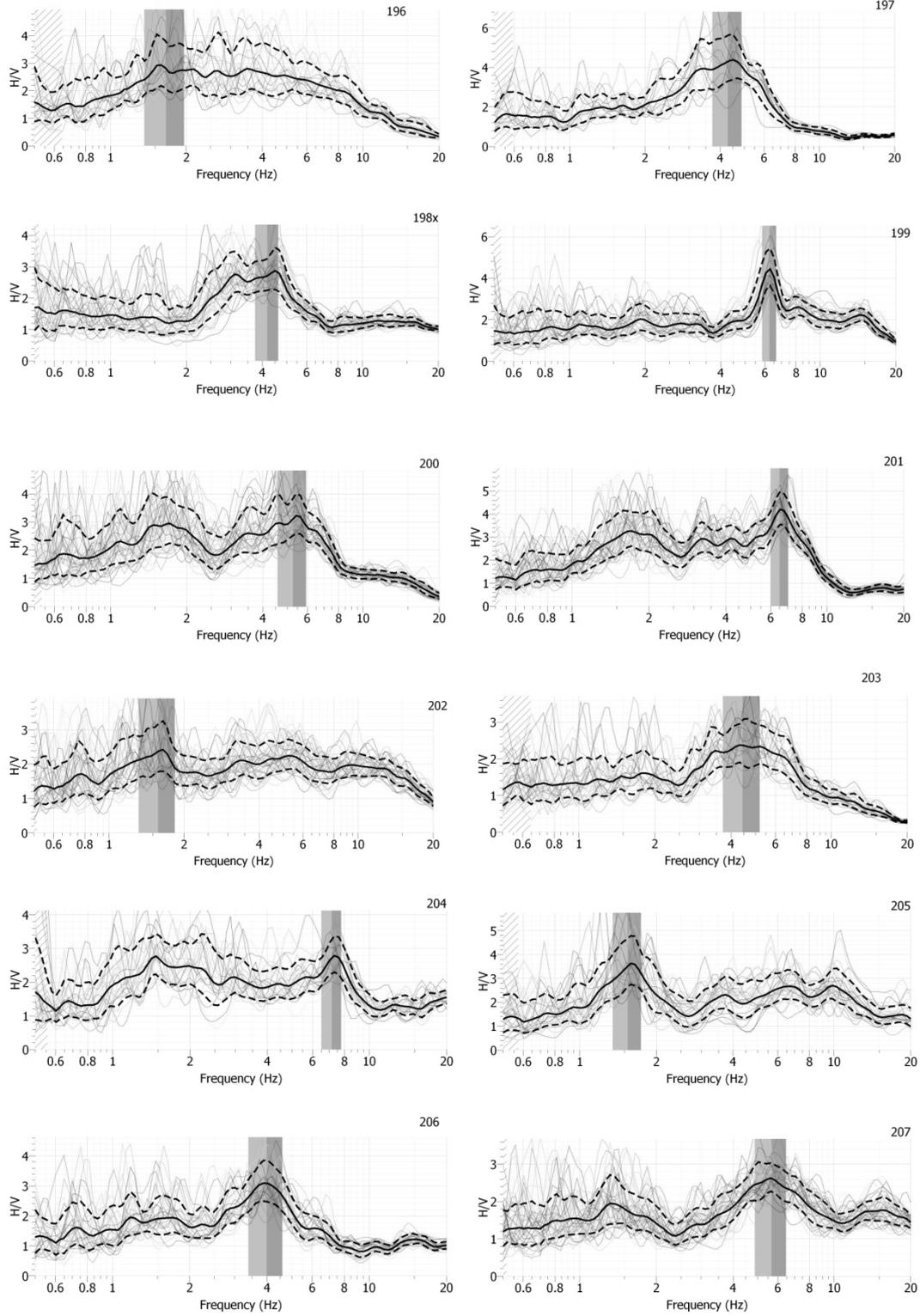


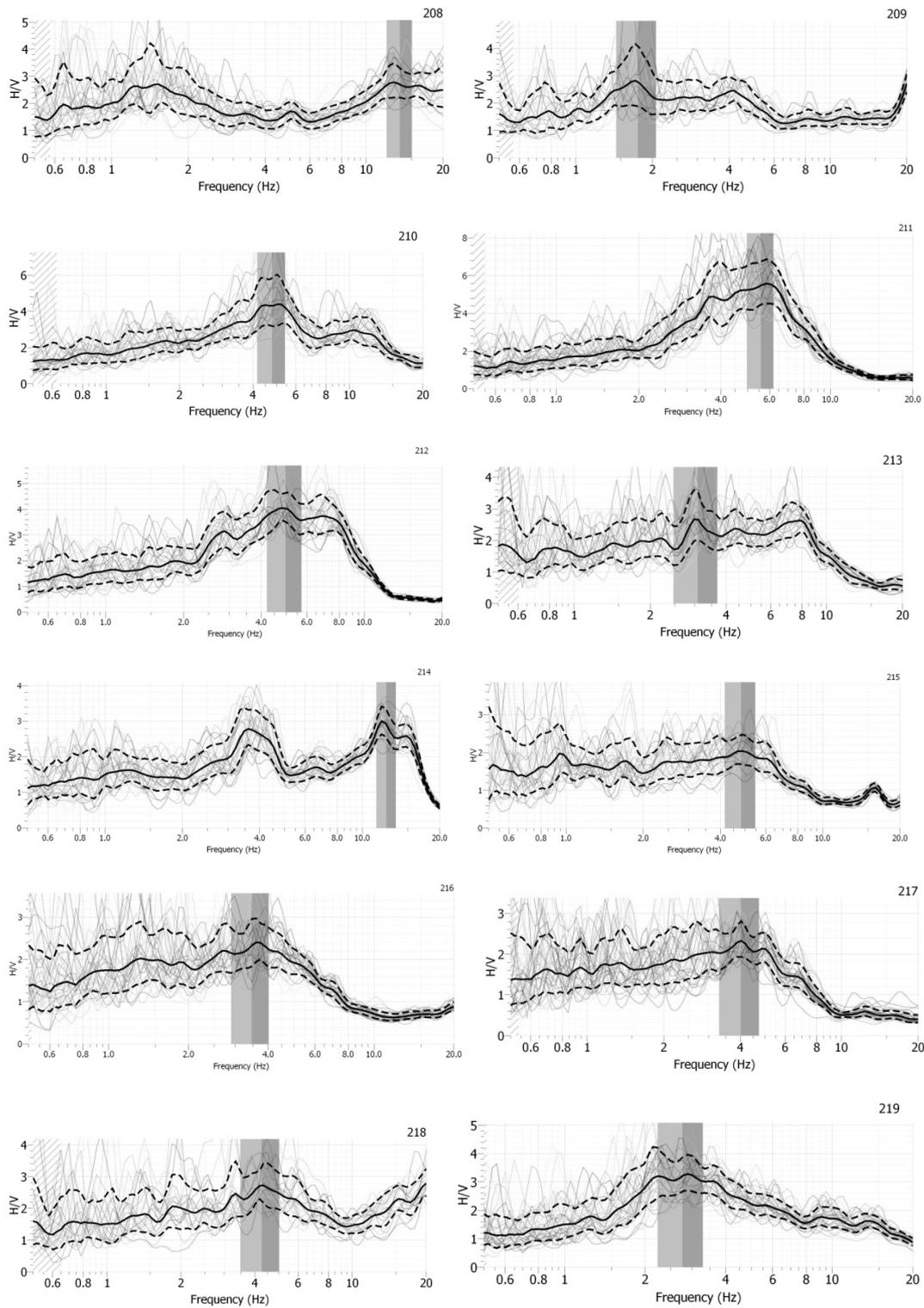


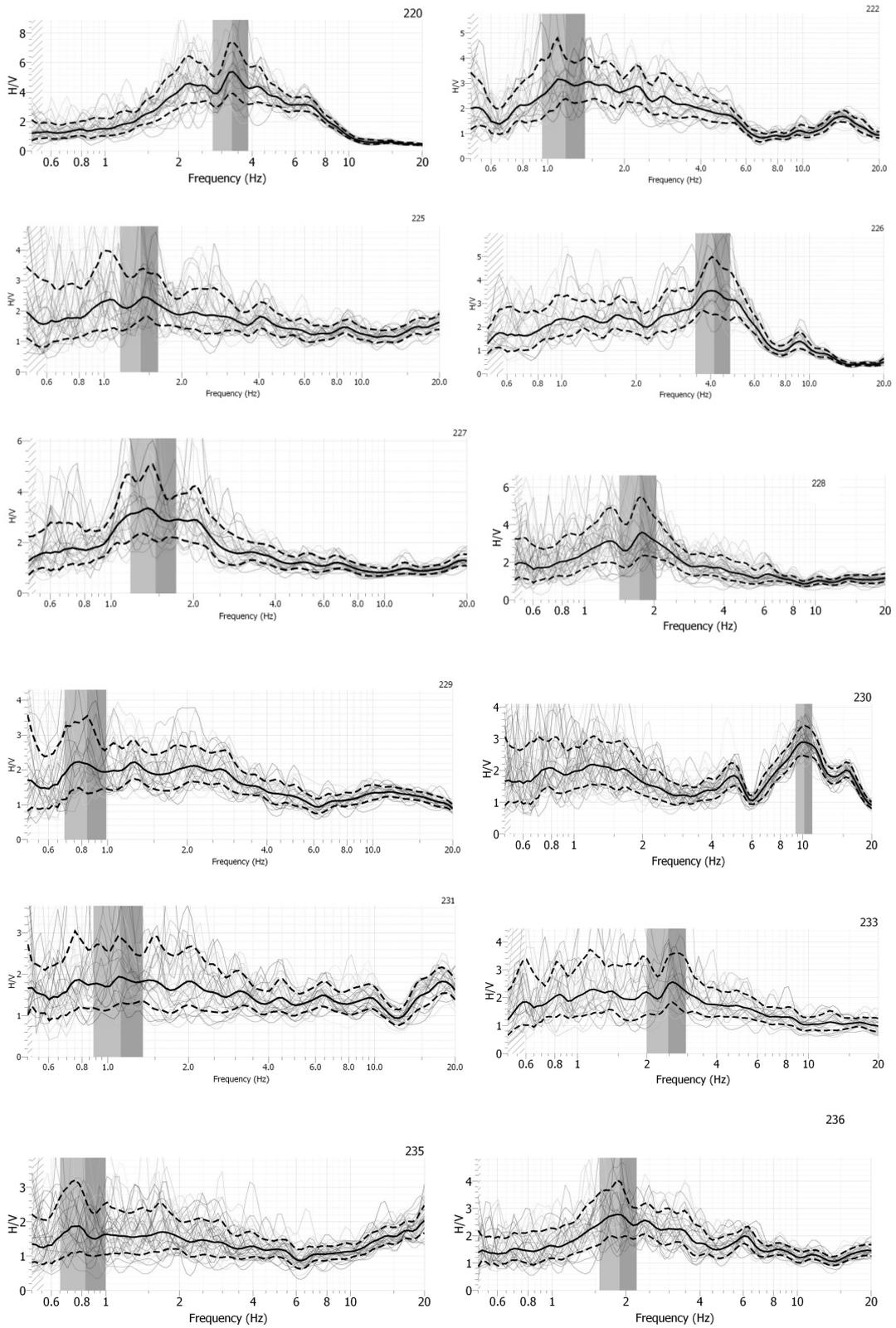




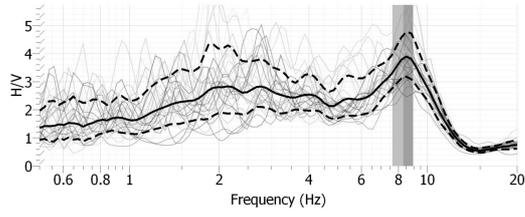




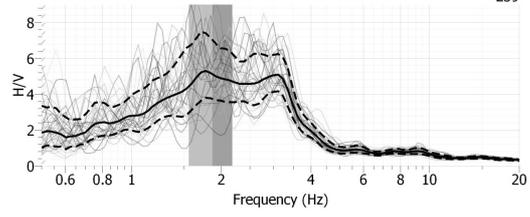




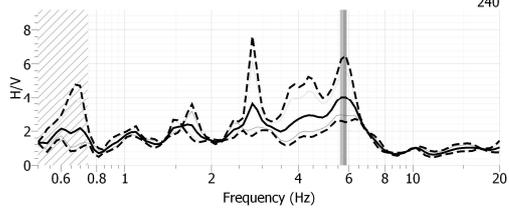
238



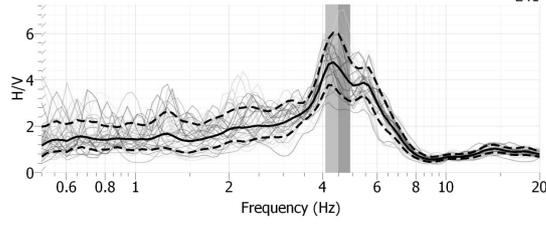
239



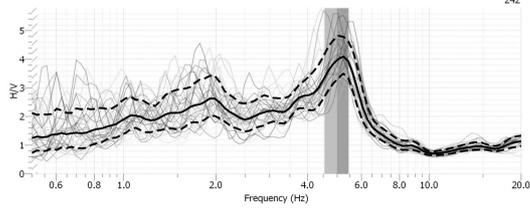
240



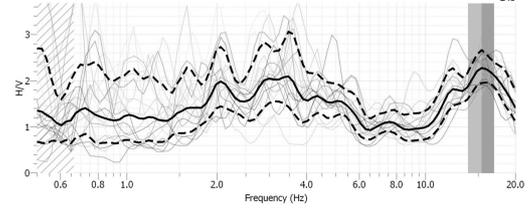
241



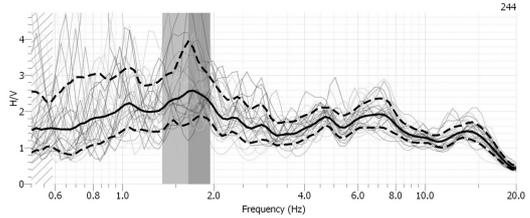
242



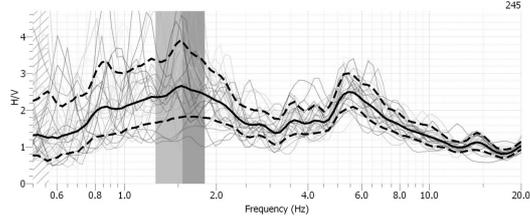
243



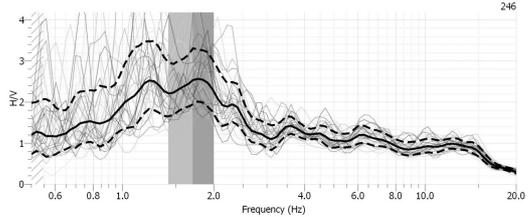
244



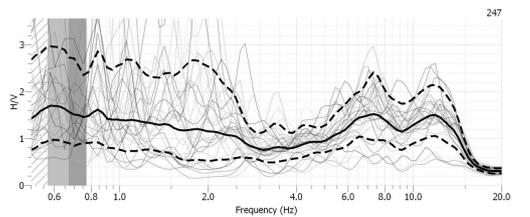
245



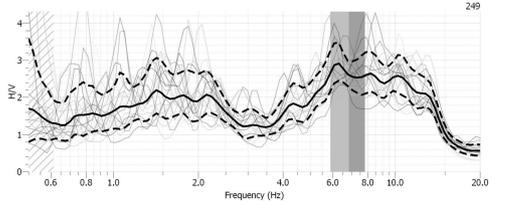
246



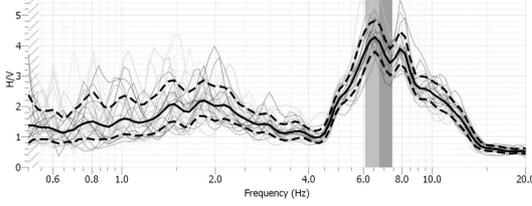
247

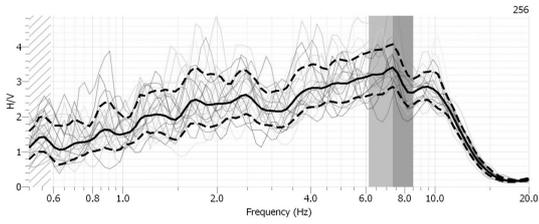
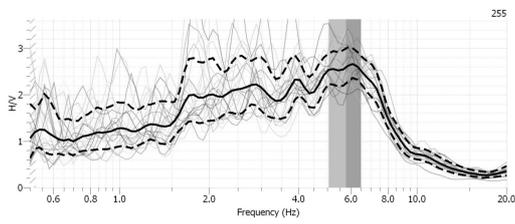
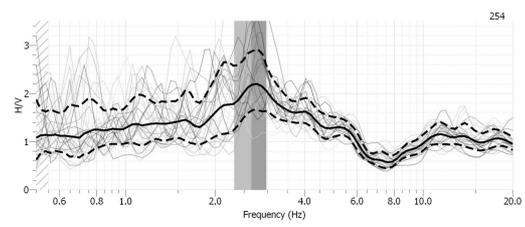
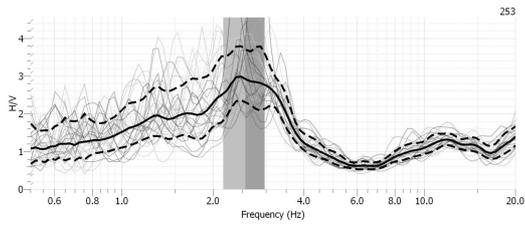
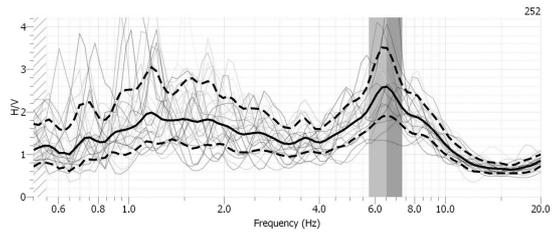
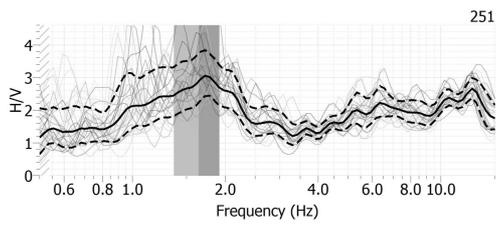


249



250





Anexo C: Inquérito feito à população para o estudo da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado

ESTUDO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO EDIFICADO
DA CIDADE DE PONTA DELGADA



CENTRO DE GEOFÍSICA DA
UNIVERSIDADE DE LISBOA

Freguesia.....

Morada completa:

Código postal.....

NOTA: Assinale com uma cruz a opção correcta.

CASO NÃO SAIBA RESPONDER A ALGUMA DAS PERGUNTAS, É FAVOR
DEIXAR EM BRANCO.

1. Tipo de uso

Habitação Escola Comércio Hotelaria Outro

2. Tipologia

Prédio Vivenda

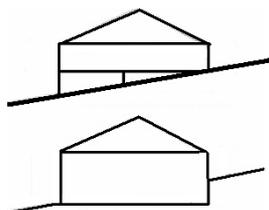
Nº de pisos acima do solo

3. Tipologia /Material de construção

Alvenaria (pedra e/ou tijolo) Betão armado Madeira Outro

4. Inclinação do terreno

Sim



Não



5. Época de construção

Anterior a 1900

Entre 1900 e 1935

Entre 1935 e 1958

Entre 1958 e 1983

Entre 1983 e 2001

Depois de 2001

6. Estado de conservação (exterior)

Bom

Razoável

Mau

7. Estado de conservação (interior)

Bom

Razoável

Mau

8. Cobertura

Em terraço

Telha

Mista

9. Separação entre andares

Madeira

Betão

10. Posição do edifício

Isolado

Meio

Esquina

Ponta

11. Diferença de alturas entre edifícios vizinhos

Sim

Não

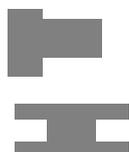
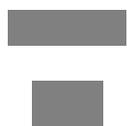
12. Regularidade horizontal (em planta)

Rectangular

Em L ou em U

Em cunha

Outros casos



13. Regularidade vertical

Estruturas regulares

Estruturas não regulares



14. Existência de galerias e/ou arcadas no 1º piso

Sim Não

15. Elementos salientes

Varandas: Sim Não

Palas: Sim Não

Chaminés: Sim Não

Marquises: Sim Não

Aparelhos de ar condicionado: Sim Não

Painéis de publicidade: Sim Não

16. Alterações da estrutura

Diga se o edifício sofreu alterações, no r/c ou em pisos superiores para instalações comerciais (por exemplo), ou se foram acrescentados pisos superiores.

Sim Não

17. Comentários

Utilize este espaço para escrever os seus comentários sobre este inquérito ou para fornecer informações complementares sobre o edifício.

.....
.....

impressão - encadernação - acabamento

Faculdade de Ciências
da Universidade de Lisboa

repro
2000
centro de cópias

TELEF 217 585 504 - FAX 217 577 652
e-mail: repro2000@sapo.pt