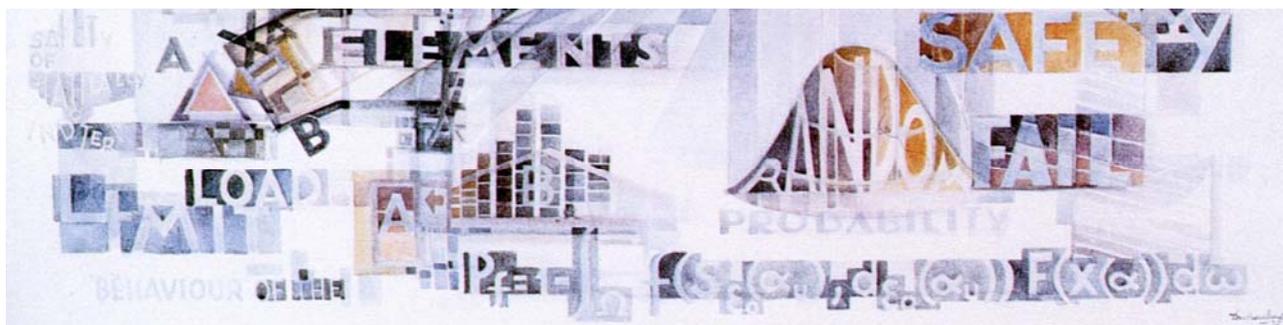




INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



# RISCO SÍSMICO EM PORTUGAL CONTINENTAL

**Maria Luísa Raposo de Magalhães do Nascimento e Sousa Sotto-Mayor**  
(Mestre)

Orientador: Doutor Alfredo Peres de Noronha Campos Costa  
Co-orientador: Doutor Carlos Alberto Ferreira de Sousa Oliveira

Júri

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa  
Vogais: Doutor Carlos Alberto Ferreira de Sousa Oliveira  
Doutor Jorge Miguel Alberto de Miranda  
Doutora Ema Paula de Montenegro Ferreira Coelho  
Doutor Alfredo Peres de Noronha Campos Costa  
Doutor João Filipe de Barros Duarte Fonseca  
Doutor Mário Manuel Paisana dos Santos Lopes  
Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Território pela Universidade Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC

Lisboa, Julho de 2006

«SEGURANÇA ESTRUTURAL»  
Detalhe  
Tomás Mateus 1918-1979  
Engº Civil, Investigador do LNEC  
Óleo sobre tela 100 x 75 cm 1972  
Col. LNEC

*À Marta,  
ao António e  
à Teresa*



## **RESUMO**

Os sismos são encarados frequentemente como desastres naturais inevitáveis. Todavia, deveriam ser considerados fenómenos naturais, cujos efeitos adversos podem ser minimizados caso se proceda a uma gestão efectiva do risco sísmico.

O objectivo principal do presente trabalho de investigação é o de avaliar o risco sísmico em Portugal Continental.

Sendo um tema de natureza multidisciplinar, apresentam-se e discutem-se modelos de avaliação probabilística da perigosidade sísmica e sua desagregação, de vulnerabilidade e fragilidade sísmicas de tipologias construtivas, de danos e de perdas económicas e humanas.

Aplica-se a análise probabilística da perigosidade sísmica, e sua desagregação, a Portugal Continental, obtendo-se cenários modais capazes de reproduzir os níveis de perigosidade que os condicionam. Apresenta-se o inventário do parque habitacional e seus habitantes, discriminado por factores de vulnerabilidade, e classifica-se a sua vulnerabilidade segundo os modelos de dano. Procede-se à actualização e aferição de uma metodologia para simulação de cenários sísmicos, integrada num Sistema de Informação Geográfico. Avalia-se o risco sísmico, seguindo diversas abordagens, comparando-se os resultados com o risco de outros países.

Construiu-se assim uma ferramenta de avaliação de perdas devidas a sismos, que constitui uma primeira contribuição para o desenvolvimento de um processo de gestão do risco sísmico aplicado ao Continente Português.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Risco sísmico

Perigosidade sísmica

Vulnerabilidade sísmica e danos

Exposição

Perdas económicas e humanas

Portugal Continental



## **ABSTRACT**

Earthquakes are often perceived as inevitable natural disasters. Nevertheless, they should be comprehended as natural phenomena, which adverse effects may be minimized if effective earthquake risk management strategies are implemented.

The main purpose of the present work is to evaluate the seismic risk in mainland Portugal, in order to contribute to its mitigation.

Seismic risk evaluation requires a multidisciplinary approach. This work includes guidance and discussion for modelling probabilistic seismic hazard and deaggregation, seismic vulnerability and fragility of building typologies and economic and human losses.

Probabilistic seismic hazard analysis and deaggregation are applied to Portuguese mainland, leading to modal scenarios able to reproduce target hazard levels. A detailed inventory of residential buildings and their inhabitants, considering relevant vulnerability factors, is provided and the classification of its vulnerability according to damage models is made. An automatic seismic scenario loss estimate methodology, integrated on a Geographic Information System, is updated and checked against past earthquakes. Seismic risk of Portuguese mainland is evaluated following several approaches. Results are compared with other countries risk.

One may conclude that a tool to evaluate seismic losses in Portuguese mainland has been developed, providing a first contribution to a seismic risk management process.

## **KEY-WORDS**

Seismic risk

Seismic hazard

Seismic vulnerability and damage

Exposure

Economic and human losses

Mainland Portugal.



## **AGRADECIMENTOS**

A avaliação do risco sísmico em Portugal Continental, resultou do trabalho da autora desenvolvido no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, mas só foi possível graças à contribuição de diversas pessoas e entidades a quem se exprimem agradecimentos sinceros:

- Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), nas pessoas da actual Direcção, agradeço a oportunidade, tempo e meios concedidos para a minha formação e para a realização deste trabalho.
- Ao Chefe do Departamento de Estruturas, Engenheiro João Almeida Fernandes, agradeço de forma idêntica o apoio, os meios e o tempo concedidos para a realização deste trabalho.
- Aos Chefes dos Núcleos com quem trabalhei no LNEC, o Engenheiro Ricardo Teixeira Duarte, pela importante contribuição para a minha formação inicial no Laboratório, o Engenheiro Eduardo Cansado Carvalho pelo acompanhamento do trabalho e pelas suas intervenções sempre pragmáticas e pertinentes, e a Engenheira Ema Coelho, actual Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE), pela disponibilidade sempre demonstrada para acompanhar a realização deste trabalho.
- Ao Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil que patrocinou o projecto «Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras», em que o Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas deste Laboratório esteve envolvido e no qual se iniciou o trabalho de investigação conducente a esta tese.
- À Fundação para a Ciência e a Tecnologia que patrocinou o projecto de investigação «Mitigação do risco sísmico em Portugal» e à Comissão Europeia que patrocina o projecto «LESSLOSS – Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides», ambos englobando matérias afins à temática do risco sísmico, e no âmbito dos quais se desenvolveu parte desta tese.
- Ao Engenheiro Alfredo Campos Costa, orientador deste trabalho no LNEC, pela importante contribuição para a minha formação científica no Laboratório, pelo engenho e forma activa com que contribuiu para o desenvolvimento desta tese e pela sua amizade.
- Ao Professor Carlos Sousa Oliveira, co-orientador desta tese no Instituto Superior Técnico, pelos seus ensinamentos científicos e humanos proporcionados ao longo de muitos anos de trabalho, iniciados antes mesmo de terminar a minha licenciatura, mas principalmente pelo seu apoio e orientação na elaboração desta dissertação e pela sua amizade.

- À experimentadora e amiga Dra. Anabela Martins pelo seu enorme e inestimável contributo, pelo seu espírito positivo mesmo em situações adversas, pela sua colaboração no desenvolvimento desta tese, mas também ao nível de outras actividades neste Laboratório, e pela sua paciência infinita quando muitas vezes foi necessário dar um passo atrás para progredir.
- À Dra. Alexandra Carvalho pelo seu contributo para o desenvolvimento do capítulo 3 desta tese, nomeadamente no que concerne à desagregação da perigosidade sísmica e ao Engenheiro Paulo Candeias que elaborou uma rotina para o Simulador de Cenários Sísmicos.
- À Engenheira Ema Coelho e ao Engenheiro Eduardo Cansado Carvalho que contribuíram para o trabalho com inúmeras sugestões e a quem também agradeço a revisão técnica e científica de alguns capítulos.
- Ao Jaime pela revisão do texto e pelas dúvidas valiosas levantadas por um leigo na matéria. Também à Dra. João Coelho pela revisão do texto da Introdução.
- Ao Engenheiro Aníbal Costa e ao Engenheiro Carlos Sousa Oliveira pela disponibilização de fotografias e partilha de conhecimentos sobre o parque habitacional de Portugal Continental.
- Ao Observatório das Ciências e do Ensino Superior que, ao abrigo de um protocolo elaborado com o Instituto Nacional de Estatística permitiu, no final de 2003, o acesso gratuito a informação dos Censos 2001.
- Ao Instituto Nacional de Estatística pela rapidez com que disponibilizou a referida informação.

Também se agradece a amigos e colegas que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho:

- À Júlia Antunes pelo ambiente acolhedor que conseguiu promover no NESDE enquanto cá trabalhou e a Ana Marques pela sua ajuda na recolha bibliográfica e ao Francisco Ferro pela sua participação na elaboração da capa da tese.
- A todos que em situações de maior urgência tomaram conta dos meus filhos, nomeadamente a João Coelho e a Dulcina Marecos.

Finalmente, uma palavra especial de agradecimento a todas as pessoas da minha família, em particular aos meus Pais e Avó, mas principalmente ao Jaime que me conseguiu substituir perante os meus filhos durante o período de desenvolvimento desta tese.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificação do tema .....	1
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Organização.....	4
<b>2. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. Introdução.....	7
2.2. Definição de conceitos .....	10
2.3. Perigosidade sísmica .....	16
2.3.1. Modelação probabilística da perigosidade sísmica .....	16
2.3.2. Cenários sísmicos .....	22
2.3.3. Desagregação da perigosidade sísmica .....	24
2.4. Vulnerabilidade sísmica e danos de edifícios.....	29
2.4.1. Classificação dos métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica .....	29
2.4.2. Definição de vulnerabilidade e fragilidade sísmicas .....	32
2.4.3. Método mecanicista.....	35
2.4.3.1. Método FEMA & NIBS [1999] .....	35
2.4.3.2. Curvas de capacidade resistente.....	36
2.4.3.3. Avaliação da resposta sísmica.....	39
2.4.3.4. Curvas de fragilidade sísmica .....	41
2.4.4. Métodos estatísticos ou empíricos.....	44
2.4.4.1. Escala Macrossísmica Europeia, EMS-98 .....	44
2.4.4.2. Indicadores de dano .....	47
2.4.4.3. Modelo de danos baseado na escala EM-98 .....	48
2.4.4.4. Modelos estatísticos baseados em matrizes de probabilidade de dano..	52
2.4.4.5. Curvas de vulnerabilidade sísmica de edifícios .....	53
2.5. Vulnerabilidade sísmica e perdas humanas .....	55
2.5.1. Enquadramento.....	55
2.5.2. Modelo de árvore de eventos da metodologia FEMA & NIBS [1999].....	58
2.5.3. Perdas em função do colapso de edifícios [Coburn <i>et al.</i> , 1992 e Coburn & Spence, 2002] .....	61
2.5.4. Curvas de vulnerabilidade para elementos humanos em risco [Tiedemann, 1990 e 1992].....	65
2.6. Risco sísmico.....	67
2.6.1. Gestão do risco sísmico .....	67
2.6.2. Modelação probabilística do risco sísmico.....	70
2.6.3. Problemática da acumulação do risco sísmico .....	75
2.6.4. Incerteza na avaliação do risco sísmico.....	77
2.6.5. Modelação de perdas .....	78
2.7. Considerações finais .....	79

<b>3. PERIGOSIDADE SÍSMICA E ANÁLISE DE DESAGREGAÇÃO.....</b>	<b>83</b>
3.1. Introdução.....	83
3.2. Determinação de cenários de perigosidade sísmica .....	84
3.3. Dados de base e parâmetros dos modelos .....	85
3.3.1. O catálogo sísmico e as zonas de geração .....	85
3.3.2. Processo espacial e temporal da ocorrência .....	87
3.3.3. Distribuição de magnitudes .....	89
3.3.4. Atenuação dos movimentos sísmicos .....	90
3.4. Reavaliação da perigosidade sísmica .....	94
3.5. Análise de desagregação da perigosidade sísmica .....	98
3.5.1. Enquadramento.....	98
3.5.2. Desagregação unidimensional em $M$ e desagregação unidimensional em $\epsilon$ ....	100
3.5.3. Desagregação geográfica em $(X, Y)$ .....	103
3.5.4. Desagregação bidimensional em $M-R$ .....	109
3.5.5. Desagregação 4D e cenários de perigosidade sísmica .....	111
3.5.5.1. Cenários de perigosidade sísmica para os 278 concelhos de Portugal Continental .....	111
3.5.5.2. Análise de desagregação para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro..	115
3.5.5.3. Mapas do movimento do solo para os cenários escolhidos .....	117
3.6. Comparação com os resultados de outros estudos .....	118
3.7. Conclusões.....	120
<b>4. INVENTÁRIO DOS ELEMENTOS EM RISCO .....</b>	<b>123</b>
4.1. Introdução.....	123
4.2. Apuramentos efectuados nos Censos 2001 .....	124
4.3. Estatísticas dos elementos em risco.....	128
4.4. Distribuição geográfica dos elementos em risco .....	147
4.5. Análise das estatísticas apresentadas.....	154
4.5.1. Análise das estatísticas dos elementos em risco.....	154
4.5.2. Análise da distribuição geográfica dos elementos em risco.....	157
4.6. Conclusões.....	160
<b>5. VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS ELEMENTOS EM RISCO.....</b>	<b>165</b>
5.1. Introdução.....	165
5.2. Breve caracterização do parque habitacional de Portugal Continental .....	167
5.2.1. Enquadramento.....	167
5.2.2. Edifícios antigos de alvenaria e construção tradicional .....	170
5.2.3. Edifícios de alvenaria com elementos de betão armado.....	179
5.2.4. Edifícios com estrutura de betão armado .....	181
5.3. Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional.....	183
5.3.1. Tipologias Censos 2001 .....	183
5.3.2. Tipologias FEMA & NIBS.....	186

---

5.3.3. Tipologias EMS-98 .....	192
5.3.4. Tipologias MSK .....	197
5.4. Vulnerabilidade e fragilidade sísmicas das tipologias portuguesas.....	200
5.4.1. Modelo de danos FEMA & NIBS .....	200
5.4.2. Modelo de danos Giovinazzi & Lagomarsino.....	201
5.4.3. Modelo de danos Di Pasquale & Orsini .....	203
5.4.4. Modelo de danos Zuccaro & Papa.....	207
5.4.5. Modelo de danos Tiedemann.....	209
5.5. Análise crítica das metodologias de avaliação de danos no edificado .....	210
5.6. Vulnerabilidade sísmica dos habitantes de Portugal Continental.....	212
5.6.1. Modelo de perdas humanas Coburn & Spence.....	212
5.6.2. Modelo de perdas humanas FEMA & NIBS .....	214
5.6.3. Modelo de perdas humanas Tiedemann .....	215
5.7. Conclusões.....	215
<b>6. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS SÍSMICOS.....</b>	<b>219</b>
6.1. Introdução.....	219
6.2. Simulador de Cenários Sísmicos .....	220
6.2.1. Apresentação .....	220
6.2.2. História do desenvolvimento do Simulador .....	222
6.2.3. Dados.....	223
6.2.4. Procedimentos e resultados .....	225
6.2.5. Exemplo de operação do Simulador.....	229
6.3. Aferição dos resultados do Simulador.....	232
6.3.1. Escolha dos cenários reais .....	232
6.3.2. Sismo de 1755 .....	234
6.3.3. Sismo de 1909 .....	240
6.3.4. Sismo de 1969 .....	246
6.3.5. Apreciação dos resultados do Simulador .....	250
6.4. Simulações de cenários sísmicos para elementos em risco actuais .....	251
6.5. Conclusões.....	258
<b>7. AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO .....</b>	<b>261</b>
7.1. Introdução.....	261
7.2. Opções e limitações da avaliação do risco sísmico .....	263
7.3. Distribuição probabilística das perdas por concelho .....	265
7.3.1. Perdas económicas.....	265
7.3.2. Perdas humanas .....	268
7.4. Valor esperado anual das perdas em consequência de sismos .....	270
7.4.1. Objectivos.....	270
7.4.2. Variáveis envolvidas .....	270
7.4.3. Modelos de regressão para o risco sísmico .....	274

7.4.4. Análise do risco sísmico dos concelhos de Portugal Continental .....	277
7.5. Avaliação do risco sísmico acumulado .....	285
7.5.1. Acumulação das perdas esperadas anuais .....	285
7.5.2. Limite inferior das perdas acumuladas.....	288
7.5.3. Cenários de risco sísmico com base na desagregação da perigosidade sísmica ..	290
7.6. Comparação com outras avaliações de risco sísmico .....	296
7.6.1. Risco de perdas económicas.....	296
7.6.2. Risco de perdas humanas .....	299
7.7. Conclusões.....	300
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>305</b>
8.1. Introdução.....	305
8.2. Trabalho desenvolvido .....	305
8.3. Conclusões principais.....	308
8.4. Trabalho futuro.....	313
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>317</b>
<b>ANEXO A - MAPAS DE UNIDADES TERRITORIAIS DE PORTUGAL CONTINENTAL .....</b>	<b>A.1</b>
<b>ANEXO B - CENÁRIOS DE PERIGOSIDADE SÍSMICA.....</b>	<b>B.1</b>
<b>ANEXO C - PARÂMETROS DOS MODELOS DE DANOS.....</b>	<b>C.1</b>
C.1. Modelo de danos FEMA & NIBS.....	C.3
C.2. Modelo de danos Giovinazzi & Lagomarsino .....	C.6
C.3. Modelo de danos Di Pasquale & Orsini.....	C.8
C.4. Modelo de danos Zuccaro & Papa.....	C.9
C.5. Modelo de perdas humanas FEMA & NIBS .....	C.10
<b>ANEXO D - PERDAS ESPERADAS ANUAIS .....</b>	<b>D.1</b>
D.1. Perdas económicas.....	D.3
D.2. Perdas humanas .....	D.9

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
Figura 1.1 – Danos em edifícios no local de Espalhafatos; sismo do Faial de 1998. ....	1
Figura 1.2 – Componentes do procedimento para avaliação do risco sísmico. ....	4
<b>2. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO .....</b>	<b>7</b>
Figura 2.1 – Exemplo de desagregação geográfica obtido em USGS [2005]. ....	28
Figura 2.2 – Exemplo de desagregação 3D ( $M-R-\epsilon$ ) obtido em USGS [2005]. ....	28
Figura 2.3 – Sistematização das metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica. ....	31
Figura 2.4 – Representação da matriz de probabilidade de dano de Solares [2001] para a intensidade VI-VII e para o nível de dano 3-4. ....	34
Figura 2.5 – Construção do espectro de capacidade [adaptado de Kircher <i>et al.</i> , 1997 e de McGuire, 2004]. ....	38
Figura 2.6 – Procedimento iterativo da metodologia FEMA & NIBS conducente à determinação da resposta máxima do edifício. ....	40
Figura 2.7 – Esquerda: curvas de fragilidade para os estados de dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total; direita: matriz de probabilidade de dano para $SD = SD_{max}$ . ....	43
Figura 2.8 – Definição de quantidades na escala EM-98 [Grüntal, 1998]. ....	45
Figura 2.9 – Funções de pertinência dos atributos «Poucos», «Muitos» e «A maioria» da variável «edifícios danificados» [Giovinazzi & Lagomarsino, 2003 e 2004]. ..	50
Figura 2.10 – Curvas de vulnerabilidade de edifícios [Tiedemann, 1992]. ....	54
Figura 2.11 – Causas de morte em sismos ocorridos na primeira e na segunda metade do século XX [Coburn & Spence, 2002]. ....	56
Figura 2.12 – Relação entre o número de vítimas mortais e o número de edifícios severamente danificados [traduzido de Coburn & Spence, 2002]. ....	57
Figura 2.13 – Modelo em árvore de eventos para o cálculo da probabilidade de ocupantes mortos em consequência de sismos [adaptado de FEMA & NIBS, 1999]. ....	60
Figura 2.14 – Taxa de ocupação dos edifícios no instante do sismo [traduzido de Coburn & Spence, 2002]. ....	62
Figura 2.15 – Correlação aproximada entre a qualidade ou vulnerabilidade dos edifícios e a taxa de mortos, dependendo da intensidade MM do sismo. Correlação válida para edifícios moderadamente irregulares e para solos intermédios [Tiedemann, 1990]. ....	66

Figura 2.16 – Processo de gestão do risco [adaptado de EERI, 2000]. .....	67
Figura 2.17 – Esquema para a avaliação do risco sísmico de uma tipologia construtiva [adaptado de Campos Costa, 2004]. .....	72
<b>3. PERIGOSIDADE SÍSMICA E CENÁRIOS DE OCORRÊNCIA.....</b>	<b>83</b>
Figura 3.1 – Mapa de epicentros da região analisada, ano 33 a 1999, magnitudes superiores ou iguais a 3,5; Modelo de zonas de geração sísmica [adaptado de Sousa, 1996]......	86
Figura 3.2 – Distribuição geográfica da taxa de ocorrência de sismos: <i>e.g.</i> na célula 1 estão representados quatro sismos, $v_1 = v_k \cdot 4 / n_k$ e na célula 2, $v_2 = 0$ . .....	88
Figura 3.3 – Número de sismos com magnitude superior a 3,5 para cada célula geográfica de dimensão $10 \times 10$ km; período posterior a 1910. ....	89
Figura 3.4 – Envolvente das curvas de perigosidade sísmica para todos os concelhos de Portugal Continental. ....	95
Figura 3.5 – Perigosidade sísmica para Portugal Continental; mapas desenhados com a resolução geográfica do concelho.....	96
Figura 3.6 – Curvas de perigosidade sísmica para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e ajuste da função cumulativa de distribuição beta. ....	97
Figura 3.7 – Distribuição geográfica dos parâmetros da distribuição beta e limites de truncatura. ....	98
Figura 3.8 – Desagregação da perigosidade sísmica na variável aleatória $M$ para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e para os períodos de retorno de 95 (em cima), 475 (no meio) e 975 anos (em baixo); valores esperados e modais de $M$ . ....	101
Figura 3.9 – Desagregação da perigosidade sísmica na variável aleatória $\epsilon$ para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e para os períodos de retorno de 95 (em cima), 475 (no meio) e 975 anos (em baixo); valores esperados e modais de $\epsilon$ . ....	102
Figura 3.10a – Desagregação geográfica da perigosidade condicionada pela excedência do nível da acção sísmica correspondente ao período de retorno de 95 anos para o Porto, Lisboa e Faro; magnitude esperada condicional de cada célula. ....	104
Figura 3.10b – Desagregação geográfica da perigosidade condicionada pela excedência do nível da acção sísmica correspondente ao período de retorno de 475 anos para o Porto, Lisboa e Faro; magnitude esperada condicional de cada célula. ....	105
Figura 3.10c – Desagregação geográfica da perigosidade condicionada pela excedência do nível da acção sísmica correspondente ao período de retorno de 975 anos para o Porto, Lisboa e Faro; magnitude esperada condicional de cada célula. ....	106

Figura 3.11 – Distribuição de probabilidade conjunta da magnitude e distância para os períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos e para o Porto, Lisboa e Faro.....	110
Figura 3.12 – Mapas dos cenários de perigosidade sísmica, por concelho, resultantes da análise de desagregação 4D. Em cima, localização geográfica e magnitude dos cenários. Em baixo, valor do desvio para cada concelho. ....	112
Figura 3.13 – Histograma das magnitudes, distâncias e desvios dos cenários de perigosidade sísmica dos períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos para os concelhos de Portugal Continental. ....	114
<b>4. INVENTÁRIO DOS ELEMENTOS EM RISCO .....</b>	<b>123</b>
Figura 4.1 – Número de edifícios por época de construção (Censos 2001).....	129
Figura 4.2 – Número de alojamentos familiares clássicos por época de construção (Censos 2001).....	129
Figura 4.3 – Número de alojamentos colectivos por época de construção (Censos 2001).	130
Figura 4.4 – Número de ocupantes residentes em alojamentos familiares clássicos e em alojamentos colectivos, por época de construção (Censos 2001).....	130
Figura 4.5 – Variação, por época de construção, do número de edifícios entre os Censos 91 e 2001. ....	131
Figura 4.6 – Razão entre o número de alojamentos familiares clássicos e o número de edifícios, por época de construção (Censos 2001). ....	132
Figura 4.7 – Razão entre o número de ocupantes residentes em alojamentos familiares clássicos e em alojamentos colectivos e o número de alojamentos familiares clássicos e alojamentos colectivos, por época de construção (Censos 2001).	133
Figura 4.8 – Número de edifícios por tipo de estrutura (Censos 2001).....	135
Figura 4.9 – Número de edifícios por época de construção e tipo de estrutura (Censos 2001).....	135
Figura 4.10 – Percentagem de edifícios por tipo de estrutura dada a época de construção (Censos 2001).....	136
Figura 4.11 – Número de edifícios por número de pavimentos (Censos 2001).....	137
Figura 4.12 – Número de edifícios por época de construção e número de pavimentos (Censos 2001).....	137
Figura 4.13 – Percentagem de edifícios por número de pavimentos dada a época de construção (Censos 2001).....	138
Figura 4.14 – Número de edifícios por número de pavimentos e tipo de estrutura (Censos 2001).....	138

Figura 4.15 – Percentagem de edifícios por tipo de estrutura dado o número de pavimentos (Censos 2001).....	139
Figura 4.16 – Distribuição de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).....	140
Figura 4.17 – Distribuição de alojamentos familiares clássicos por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001). ....	141
Figura 4.18 – Distribuição de ocupantes por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).....	142
Figura 4.19 – Número de edifícios, com mais de 1 pavimento, pela configuração do R/C (Censos 2001). ....	144
Figura 4.20 – Número de edifícios pela altura relativa a edifícios adjacentes (Censos 2001). ....	144
Figura 4.21 – Número de edifícios pelo posicionamento relativo a edifícios adjacentes (Censos 2001). ....	145
Figura 4.22 – Número de edifícios por necessidade de reparações na estrutura (Censos 2001). ....	145
Figura 4.23 – Número de edifícios por estado de conservação (Censos 2001). ....	146
Figura 4.24 – Número de edifícios por estado de conservação, dada a época de construção (Censos 2001). ....	146
Figura 4.25 – Densidades de edifícios, de alojamentos familiares clássicos e colectivos e densidade populacional em Portugal Continental (Censos 2001). ....	148
Figura 4.26 – Densidades de edifícios, de alojamentos familiares clássicos e colectivos e densidade populacional na Área Metropolitana de Lisboa (Censos 2001). ...	149
Figura 4.27 – Densidades de alojamentos familiares clássicos e colectivos por tipo de estrutura (Censos 2001). ....	150
Figura 4.28 – Percentagens de alojamentos familiares clássicos e colectivos por número de pavimentos (Censos 2001).....	151
Figura 4.29 – Percentagens de edifícios construídos em data anterior à do primeiro regulamento sismo-resistente, alojamentos familiares clássicos e colectivos e ocupantes residentes nesses edifícios (Censos 91 e Censos 2001).....	152
Figura 4.30 – Taxas de variação do número de edifícios, alojamentos familiares clássicos e colectivos e ocupantes entre os Censos 2001 e os Censos 91, Portugal Continental e AML. ....	153

**5. VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS ELEMENTOS EM RISCO..... 165**

- Figura 5.1 – Comparação das percentagens de edifícios com tipo de estrutura de alvenaria e de betão armado existentes no parque habitacional de Portugal Continental, à data dos Censos 2001, e construídos em épocas distintas. .... 168
- Figura 5.2 – Sistemas construtivos existentes no parque habitacional de Portugal Continental..... 170
- Figura 5.3 – Exemplo de edifício com paredes em xisto no concelho de Manteigas; classificado nos Censos 2001 como ATAPS, anterior a 1919, de 1 pavimento.171
- Figura 5.4 – Exemplo e pormenor de edifício de habitação no concelho de Manteigas com paredes em granito e xisto argamassadas com barro vermelho; classificado nos Censos 2001 como ASP, anterior a 1919, de 2 pavimentos. .... 171
- Figura 5.5 – Exemplo de edifícios pré-Pombalinos na cidade de Lisboa; esquerda: prédio de duas águas de fachada em bico; direita: prédio com ressalto bilateral; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919..... 173
- Figura 5.6 – Exemplo de edifícios da zona histórica do Porto; centro e direita: edifício com fachada principal realizada em alvenaria de pedra e taipa e pormenor de parede de travamento com elementos de madeira e taipa [Costa, 2001]; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919, em mau estado de conservação... 174
- Figura 5.7 – Exemplo de edifícios Pombalinos; em cima à esquerda: edifício localizado em Alcobaça em mau estado de conservação; restantes edifícios localizados em Lisboa; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919, com número de pavimentos igual a 3 ou da classe 5 a 7. Todos eles possuem o R/C com espaço interior amplo na sua maior parte devido à existência de lojas. . 175
- Figura 5.8 – Maquete de uma gaiola Pombalina [Farinha, 1997]..... 175
- Figura 5.9 – Exemplos de edifícios Gaioleiros; em cima: fachadas e tardo de Gaioleiros localizados em Lisboa; em baixo: interior de Gaioleiro em Lisboa e fachadas em Lagos e na Figueira da Foz; classificados nos Censos 2001 como ASP.. 177
- Figura 5.10 – Exemplo de edifícios antigos na região Norte do Continente; esquerda: edifícios localizados em Guimarães; centro: correnteza de edifícios no centro histórico do Porto; direita: estrutura de prédios geminados [Amaral & Aguilar, 2005]; classificados nos Censos 2001 como ASP. .... 178
- Figura 5.11 – Exemplo de edifícios de «placa»; da esquerda para a direita: edifícios localizados em Lisboa, Alcobaça e Nazaré, respectivamente; classificados nos Censos 2001 como ACP; da esquerda para a direita: edifícios das classes 5 a 7 pavimentos, 4 pavimentos e 3 pavimentos, respectivamente; os edifícios no centro e à direita possuem R/C com espaço interior amplo na sua maior parte..... 179

Figura 5.12 – Exemplo de edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada no concelho de Anadia; classificados nos Censos 2001 como ACP com 2 pavimentos; esquerda: edifício da época 1945-60 ou 1961-70; direita: edifício posterior a 2001. ....	180
Figura 5.13 – Exemplo de edifícios de BA; esquerda: prédio da época 1961-70 localizado em Alcobaça; centro: estrutura em pórtico posterior a 2001, localizada em Lisboa; direita: estrutura mista pórtico parede, com lajes fungiformes, posterior a 2001, situada em Lisboa. ....	183
Figura 5.14 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade FEMA & NIBS. ....	188
Figura 5.15 – Mapas de vulnerabilidade sísmica do Continente de acordo com a classificação FEMA & NIBS. ....	191
Figura 5.16 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade da escala EM-98. ....	194
Figura 5.17 – Mapas de vulnerabilidade sísmica do Continente de acordo com a classificação EMS-98. ....	196
Figura 5.18 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade da escala MSK. ....	198
Figura 5.19 – Mapas de vulnerabilidade sísmica do Continente de acordo com a classificação MSK. ....	199
Figura 5.20 – Exemplo de curvas de capacidade, fragilidade e limiares de estados de dano da tipologia «ATAPS + Outros» com 1 pavimento [Campos Costa <i>et al.</i> , 2005].	201
Figura 5.21 – Curvas de fragilidade de tipologias representativas das classes de vulnerabilidade EMS-98 do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. ....	203
Figura 5.22 – Matriz de probabilidade de dano; exemplo da classe de vulnerabilidade «A» do modelo de danos de Di Pasquale & Orsini. ....	204
Figura 5.23 – Coeficientes da distribuição binomial do modelo Di Pasquale & Orsini e ajustes respectivos. ....	206
Figura 5.24 – Curvas de fragilidade ajustadas e originais do modelo de danos de Di Pasquale & Orsini. ....	206
Figura 5.25 – Matriz de probabilidade de dano; exemplo da classe de vulnerabilidade «A» do modelo de danos de Zuccaro & Papa. ....	207
Figura 5.26 – Coeficientes da distribuição binomial do modelo Zuccaro & Papa e ajustes respectivos. ....	208

Figura 5.27 – Curvas de fragilidade ajustadas e originais do modelo de danos de Zuccaro & Papa. ....	208
Figura 5.28 – Envolvente das curvas de vulnerabilidade para Portugal Continental de acordo com a metodologia Tiedemann.....	209
Figura 5.29 – Factores que influenciam o potencial de mortalidade; situações histórica e actual.....	214
Figura 5.30 – Modelos que relacionam o número de mortos com o de feridos e observações relativas a sismos ocorridos entre 1980 e 2004. ....	215
<b>6. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS SÍSMICOS.....</b>	<b>219</b>
Figura 6.1 – Fluxograma do Simulador de Cenários Sísmico (IM = Intensidade Macrossísmica; ER = Espectro de Resposta). ....	221
Figura 6.2 – (a - g) Exemplo de operação e (h) resultados globais do Simulador.....	230
Figura 6.3 – Resultado da operação do Simulador de Cenários Sísmicos integrado num SIG.....	231
Figura 6.4 – Sismo de 1755 em Lisboa. Imagens NISEE [2004]. ....	234
Figura 6.5 – Percentagem de «casas lançadas por terra e inabitáveis» em Lisboa em consequência do sismo de 1755. Resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1755.....	238
Figura 6.6 – Percentagem de feridos em Lisboa em consequência do sismo de 1755 e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1755. ....	239
Figura 6.7 – Percentagem de mortos em Lisboa em consequência do sismo de 1755 e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1755. ....	239
Figura 6.8 – Danos nos edifícios de Benavente e vista desta localidade após o sismo de 1909 [Choffat & Bensaúde, 1913].....	240
Figura 6.9 – Cenário de ocorrência de 1909: a) percentagem de edifícios no estado de dano 5, modelo de danos de Di Pasquale & Orsini; b) percentagem de edifícios no estado de dano 4 nas freguesias correspondentes às localidades mencionadas no quadro 6.6, modelo de danos de Zuccaro & Papa; c) percentagem de mortos, modelos FEMA & NIBS. ....	244
Figura 6.10 – Percentagem de edifícios com reparações importantes ou colapsados em consequência do sismo de 1909 nas localidades de Benavente e Santo Estêvão e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909. ....	244

Figura 6.11 – Percentagem de fogos danificados em consequência do sismo de 1909 na região epicentral (localidades mencionadas no quadro 6.5) e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.....	244
Figura 6.12 – Percentagem de feridos em consequência do sismo de 1909 nas localidades de Benavente, Santo Estêvão, Samora Correia e Salvaterra de Magos e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.....	245
Figura 6.13 – Percentagem de mortos em consequência do sismo de 1909 nas localidades de Benavente, Santo Estêvão, Samora Correia e Salvaterra de Magos e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.....	245
Figura 6.14 – Sismo de 1969 [texto e fotografias em Marécos & Castanheta, 1970]. .....	246
Figura 6.15 – Cenário de ocorrência de 1969: em cima, mapa de intensidades macrossísmicas, por concelho, no distrito do Algarve; em baixo, número de mortos no Algarve de acordo com a metodologia de avaliação de perdas humanas Coburn & Spence combinada com o modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. ....	248
Figura 6.16 – Resultados do Simulador: percentagem de edifícios que sofreram danos estruturais moderados, severos, ou colapso no Algarve, para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969.....	249
Figura 6.17 – Resultados do Simulador: percentagem de feridos no Algarve, para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969.....	249
Figura 6.18 – Percentagem de mortos no Algarve em consequência do sismo de 1969 e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969. ....	250
Figura 6.19 – Intensidades macrossísmicas dos sismos de a) 1755 e b) 1909; representadas para as freguesias de Portugal Continental.....	252
Figura 6.20 – Distribuição geográfica de danos e perdas para cenários sísmicos de ocorrência semelhantes aos de 1755 e 1909.....	255
Figura 6.21 – Efeito da variável Necessidade de reparações na estrutura sobre os danos no edificado para os cenários de ocorrência semelhantes aos de 1755 e 1909. ..	256
Figura 6.22 – Comparação da mortalidade obtida com o Simulador com a observada em sismos ocorridos entre 1980 e 2004. ....	258
<b>7. AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO .....</b>	<b>261</b>
Figura 7.1 – Distribuições probabilísticas de perdas económicas específicas de todos os concelhos do País, medidas em termos de percentagem de área habitacional perdida. ....	266

Figura 7.2 – Distribuições probabilísticas de perdas económicas absolutas de todos os concelhos do País, medidas em termos de percentagem do PIB de 2001. ....	266
Figura 7.3 – Perdas económicas, por concelho, para os períodos de retorno de 475 e 975 anos.....	267
Figura 7.4 – Distribuição probabilística de perdas humanas para todos os concelhos do País.....	269
Figura 7.5 – Perdas humanas, por concelho, para os períodos de retorno de 475 e 975 anos.....	270
Figura 7.6 – Variáveis envolvidas na avaliação do risco sísmico, por concelho.....	272
Figura 7.7 – Perdas económicas esperadas anuais, por concelho.....	273
Figura 7.8 – Perdas humanas esperadas anuais, por concelho.....	274
Figura 7.9 – Valores de <i>AELR</i> nos 278 concelhos de Portugal Continental em função das variáveis explicativas perigosidade e vulnerabilidade; modelo de risco sísmico e tendências bidimensionais. ....	276
Figura 7.10 – Histogramas das perdas esperadas anuais, económicas e humanas, por concelho.....	277
Figura 7.11 – Valores esperados anuais das perdas económicas, para os 18 concelhos de Portugal Continental que incluem as capitais de distrito.....	279
Figura 7.12 – Valores esperados anuais das perdas humanas, para os 18 concelhos de Portugal Continental que incluem as capitais de distrito.....	279
Figura 7.13 – Curvas de risco sísmico minorantes, majorantes e médias para as perdas económicas das NUTS II.....	292
Figura 7.14 – Curvas de risco sísmico minorantes, majorantes e médias para as perdas humanas das NUTS II.....	293
Figura 7.15 – Mapas de perigosidade sísmica em aceleração para os Estados Unidos da América [FEMA, 2001] e para Portugal Continental; 1000 e 975 anos de período de retorno.....	296
Figura 7.16 – <i>AEL</i> [USD × 10 <sup>6</sup> ] avaliadas para unidades geográficas de nível estadual dos EUA; adaptado de FEMA [2001]......	297
Figura 7.17 – <i>AELR</i> [%] avaliadas para unidades geográficas de nível estadual dos EUA; adaptado de FEMA [2001]. ....	297
Figura 7.18 – <i>AELC</i> [USD <i>per capita</i> ] avaliadas para unidades geográficas de nível estadual dos EUA; adaptado de FEMA [2001]. ....	298

**ANEXO A – MAPAS DE UNIDADES TERRITORIAIS DE PORTUGAL CONTINENTAL**

Figura A.1 – Portugal Continental em termos de NUTS II e III (à esquerda), distritos e alguns concelhos (à direita). ..... A.3

**ANEXO C – PARÂMETROS DOS MODELOS DE DANOS**

Figura C.1 – Parâmetros das curvas de capacidade do modelo de danos FEMA & NIBS [gráfico do quadrante superior esquerdo em Campos Costa *et al.*, 2005]. .....C.3

Figura C.1 (cont.) – Parâmetros das curvas de capacidade do modelo de danos FEMA & NIBS [Campos Costa *et al.*, 2005]. ..... C.4

Figura C.2 – Parâmetros das curvas de fragilidade do modelo de danos FEMA & NIBS [Campos Costa *et al.*, 2005]. ..... C.5

Figura C.2 (cont.) – Parâmetros das curvas de fragilidade do modelo de danos FEMA & NIBS [Campos Costa *et al.*, 2005]. .....C.6

Figura C.3 – Matrizes de probabilidade de danos da metodologia Di Pasquale & Orsini. ..C.8

Figura C.4 – Matrizes de probabilidade de danos da metodologia Zuccaro & Papa.....C.9

## ÍNDICE DE QUADROS

<b>2. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO .....</b>	<b>7</b>
Quadro 2.1 – Exemplo de matriz de probabilidade de dano [Solares, 2001]. .....	33
Quadro 2.2 – Quadro de Vulnerabilidade da EMS-98 [traduzido de Grüntal, 1998]. .....	45
Quadro 2.3 – Correspondência entre os indicadores de dano do método mecanicista e dos métodos estatísticos. ....	48
Quadro 2.4 – Modelo de vulnerabilidade da escala EM-98 para edifícios da classe de vulnerabilidade B [Giovinazzi & Lagomarsino, 2004]. ....	49
Quadro 2.5 – Escala de gravidade de ferimentos [FEMA & NIBS, 1999]. ....	59
Quadro 2.6 – <i>M3</i> : Percentagem média de ocupantes aprisionados devido ao colapso de edifícios de alvenaria com nº de pisos inferior a 3 [Coburn & Spence, 2002].	63
Quadro 2.7 – <i>M4</i> : Distribuição dos feridos devido ao colapso de edifícios (% de ocupantes aprisionados) [Coburn & Spence, 2002]. ....	64
Quadro 2.8 – <i>M5</i> : Percentagem de sobreviventes aprisionados em edifícios colapsados que morrem posteriormente [Coburn & Spence, 2002]. ....	65
Quadro 2.9 – Conversão de indicadores de dano em perdas económicas. ....	72
Quadro 2.10 – Matriz dos indicadores do risco sísmico esperado anual utilizados neste trabalho. ....	74
Quadro 2.11 – Exemplos de incerteza aleatória e epistémica nos estudos de risco sísmico [adaptado de EERI, 2000 e de McGuire, 2004]. ....	77
<b>3. PERIGOSIDADE SÍSMICA E CENÁRIOS DE OCORRÊNCIA.....</b>	<b>83</b>
Quadro 3.1 – Magnitude máxima de cada zona e valores de $b_k$ da lei de Gutenberg Richter [adaptado de Sousa, 1996]. .....	90
Quadro 3.2 – Modelos de atenuação da intensidade macrossísmica [adaptado de Sousa, 1996]. .....	93
Quadro 3.3 – Síntese da organização da secção 3.5. ....	99
Quadro 3.4 – Valores modais da desagregação geográfica para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos; valores esperados condicionais de $M$ e $\epsilon$ . ....	107
Quadro 3.5 – Cenários de ocorrência para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e para as probabilidades de excedência de 10% em 10 e 50 anos e de 5% em 50 anos. .	117

<b>4. INVENTÁRIO DOS ELEMENTOS EM RISCO .....</b>	<b>123</b>
Quadro 4.1 – Factores de vulnerabilidade e respectivas modalidades obtidos nos Censos 2001. ....	126
Quadro 4.2 – Modalidades das variáveis Necessidade de Reparações e Estado de conservação. ....	127
Quadro 4.3 – Valores totais das existências dos elementos em risco em Portugal Continental.....	128
Quadro 4.4 – Variação das existências entre os Censos 91 e 2001. ....	131
Quadro 4.5 – Percentagem de existências em edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento de projecto sismo-resistente.....	134
Quadro 4.6 – Existências em edifícios de Betão armado construídos durante a vigência dos regulamentos de projecto sismo resistente. ....	134
Quadro 4.7 – Distribuição de elementos em risco por número de pavimentos.....	136
Quadro 4.8 – Tipos de estruturas predominantes em cada época de construção dos edifícios do Continente Português.....	143
Quadro 4.9 – Ordenação dos tipos de estruturas e épocas de construção mais representativos no universo de edifícios, alojamentos familiares clássicos e ocupantes do Continente Português.....	143
<b>5. VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS ELEMENTOS EM RISCO.....</b>	<b>165</b>
Quadro 5.1 – Síntese da organização das secções do capítulo 5 relativas à classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica.....	166
Quadro 5.2 – Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).....	185
Quadro 5.3 – Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias FEMA & NIBS.....	187
Quadro 5.4 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas tipologias FEMA & NIBS e número de pavimentos.....	188
Quadro 5.5 – Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias EMS-98 e com as classes de vulnerabilidade desta escala. ....	193
Quadro 5.6 – Grelha de classificação do número de pavimentos das tipologias EMS-98...	194
Quadro 5.7 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas tipologias EMS-98 e número de pavimentos.....	194

Quadro 5.8 – Parâmetros, $p(I)$ , da distribuição binomial ajustada às matrizes de probabilidade de dano do modelo Di Pasquale & Orsini. ....	205
Quadro 5.9 – Coeficientes do ajuste polinomial aos parâmetros da distribuição binomial do modelo de danos de Di Pasquale & Orsini. ....	205
Quadro 5.10 – Coeficientes do ajuste polinomial aos parâmetros da distribuição binomial do modelo de danos de Zuccaro & Papa. ....	207
Quadro 5.11 – Valores adoptados para o factor $M5$ . ....	213
<b>6. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS SÍSMICOS.....</b>	<b>219</b>
Quadro 6.1 – Estatísticas de danos no edificado de Lisboa no sismo de 1755. ....	236
Quadro 6.2 – Estatísticas de perdas humanas em Lisboa no sismo de 1755. ....	236
Quadro 6.3 – Legenda das figuras de danos no edificado e perdas humanas.....	238
Quadro 6.4 – Estatísticas de danos no edificado no sismo de 1909 nas localidades de Benavente e Santo Estêvão. ....	241
Quadro 6.5 – Intensidade EMS-92 num conjunto alargado de localidades muito afectadas pelo sismo de 1909; número e percentagem de fogos danificados na região [Choffat, 1912]. ....	242
Quadro 6.6 – Estatísticas de danos humanos no sismo de 1909. ....	242
Quadro 6.7 – Danos e tipologias dos edifícios na região epicentral do sismo de 1909 de acordo com Choffat & Bensaúde [1913]. ....	243
Quadro 6.8 – Danos por tipologia de edifícios na região mais afectada pelo sismo de 1969 de acordo com Marécós & Castanheta [1970]. ....	248
Quadro 6.9 – Síntese dos resultados do Simulador para um cenário sísmico de ocorrência semelhante ao de 1755. ....	253
Quadro 6.10 – Síntese dos resultados do Simulador para um cenário sísmico de ocorrência semelhante ao de 1909. ....	254
<b>7. AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO .....</b>	<b>261</b>
Quadro 7.1 – Probabilidade anual de um indivíduo morrer [adaptado de Coburn <i>et al.</i> , 1994]. ....	262
Quadro 7.2 – Estatísticas de risco sísmico para os 278 concelhos de Portugal Continental...	278
Quadro 7.3 – Ordenação dos concelhos de Portugal Continental, que incluem as 18 capitais de distrito, pelo valor de reposição do seu parque habitacional ( <i>VRPH</i> ), indivíduos residentes, e índices de perigosidade e vulnerabilidade sísmica. .	281

Quadro 7.4 – Ordenação dos concelhos de Portugal Continental, que incluem as 18 capitais de distrito, pelos valores esperados anuais do seu risco sísmico medido em termos económicos. ....	282
Quadro 7.5 – Ordenação dos concelhos de Portugal Continental, que incluem as 18 capitais de distrito, pelos valores esperados anuais do seu risco sísmico medido em termos de vítimas mortais. ....	283
Quadro 7.6 – Valores esperados anuais do risco sísmico na AML, NUTS II e Portugal Continental (designado de PT). ....	286
Quadro 7.7 – Comparação dos valores esperados anuais do risco sísmico entre as regiões de LX, AML, LVT e PT. ....	288
Quadro 7.8 – Médias anuais das perdas em Portugal Continental simulando o catálogo sísmico. ....	289
Quadro 7.9 – Cenários de perigosidade sísmica majorantes e perdas económicas para regiões de Portugal Continental. ....	294
Quadro 7.10 – Cenários de perigosidade sísmica majorantes e perdas humanas para regiões de Portugal Continental. ....	295
Quadro 7.11 – Probabilidade anual de um indivíduo morrer em consequência de sismos. ...	299

## **ANEXO C – PARÂMETROS DOS MODELOS DE DANOS**

Quadro C.1 – Classificação das modalidades da variável Necessidades de reparação na estrutura dos edifícios apurada nos Censos 2001 de acordo com o estado de conservação do modelo de danos Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004]. .C.6	C.6
Quadro C.2 – Valores dos índices de vulnerabilidade de Giovinazzi & Lagomarsino [2003] para estruturas de alvenaria existentes no parque habitacional de Portugal Continental. ....	C.7
Quadro C.3 – Valores do índice de vulnerabilidade adaptados de Giovinazzi & Lagomarsino [2003] para estruturas de betão armado e metálicas existentes no parque habitacional de Portugal Continental. ....	C.7
Quadro C.4 – Parâmetros, $p(I)$ , da distribuição binomial do modelo de danos Zuccaro & Papa. ....	C.9
Quadro C.5 – Probabilidade de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos, tipologias e estados de dano [adaptado de FEMA & NIBS, 1999]. ....	C.10
Quadro C.6 – Probabilidade de colapso no estado de Dano Total. ....	C.10

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_1(I), a_2(I)$	Parâmetros do modelo de regressão da razão de danos médios.
$a, b, p$ e $q$	Parâmetros da função de distribuição beta que traduz a fragilidade.
ACP	Edifícios com tipo de estrutura de paredes de alvenaria argamassada, com placa.
AED	Valor esperado anual das perdas humanas em consequência de sismos.
AEDR	Valor esperado anual das perdas humanas normalizadas pela população total, residente na região.
AEL	Valor esperado anual das perdas económicas em consequência de sismos.
AELC	Valor esperado anual das perdas económicas normalizadas pela população total, residente na região.
AELR	Valor esperado anual das perdas económicas normalizadas pelo valor de reposição global do parque habitacional da região.
$a_k$	Ordenada da lei de Gutenberg-Richter, da zona de geração $k$ , para $M = mmin_k$ .
ASP	Edifícios com tipo de estrutura de paredes de alvenaria argamassada, sem placa.
ATAPS	Edifícios com tipo de estrutura de paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta.
$A_v$	Superfície média dos edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade $V = v$ .
BA	Edifícios com tipo de estrutura de betão armado.
$b_k$	Inclinação da lei de Gutenberg-Richter da zona de geração $k$ .
$C$	Constante da lei de atenuação espectral.
$c_1, c_2, c_3$ e $c_4$	Coefficientes do modelo de atenuação da intensidade macrossísmica.
$C_{1f}, C_{2f}, C_{3f}, C_{4f}, h_0$	Coefficientes a serem ajustados na lei de atenuação espectral, para a frequência $f$ .
$C_s$	Coefficiente sísmico.
$d$	Menor distância entre a estação e a projecção à superfície da rotura da falha.

$D \times C$	Código do modelo de avaliação de danos de Di Pasquale & Orsini [1997] combinado com o modelo de avaliação de perdas humanas de Coburn & Spence [2002].
$D, d$	Nível, grau ou estado de dano.
$DF_d$	Factor de dano para o estado de dano $d$ .
$DR$	Razão de danos.
$E$	Exposição ou valor dos elementos em risco.
$E[.]$	Valor esperado de [.]
$F \times C$	Código do modelo de avaliação de danos FEMA & NIBS [1999] combinado com o modelo de avaliação de perdas humanas de Coburn & Spence [2002].
$F_D(d, I)$	Fragilidade sísmica.
$F \times F$	Código do modelo de avaliação de danos FEMA & NIBS [1999] combinado com o modelo de avaliação de perdas humanas de Coburn & Spence [2002].
$f_X(x)$	Função densidade de probabilidade da variável aleatória $X$ .
$G \times C$	Código do modelo de avaliação de danos de Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004] combinado com o modelo de avaliação de perdas humanas de Coburn & Spence [2002].
$\mathcal{H}$	Função de Heaviside.
$H$	Altura média dos edifícios de uma dada tipologia.
$H_e$	Valor médio da intensidade do movimento do solo estimado pelo modelo de atenuação.
$H, h$	Perigosidade, perigo ou ameaça (sísmica).
$I$	Intensidade macrossísmica.
$I_0$	Intensidade macrossísmica de referência.
$Imin_j, Imax_j, \alpha_j$ e $\beta_j$	Parâmetros da função de distribuição beta que traduz a perigosidade sísmica de um dado local $j$ .
$K$	Perdas humanas resultantes de um sismo.
$K_c$	Perdas humanas resultantes de fenómenos colaterais induzidos pelos sismos (tsunamis, fogos, etc).
$K_{ns}$	Perdas humanas em consequência de danos não estruturais.
$K_s$	Perdas humanas em consequência de danos estruturais.

$K_{sV}$	Perdas humanas em edifícios colapsados de uma dada tipologia de edifícios de vulnerabilidade $V$ .
$L, l$	Perda em consequência de sismos.
$M2$ a $M5$	Factores que afectam a mortalidade das pessoas que se encontram, no instante do sismo, nos edifícios que colapsam.
$M_{cen}$	Magnitude do cenário de perigosidade sísmica.
$MDR$	Razão de danos médios.
$M, m$	Grandeza do sismo ou magnitude.
$mmin_k, mmax_k$	Limites inferior e superior de truncatura da lei de Gutenberg-Richter, para a zona de geração $k$ .
$MPD$	Matriz de probabilidade de dano.
$\sqrt{MSE}$	Raiz quadrada do erro quadrático médio do ajuste.
$n$	Número de sismos.
$n_1, n_2$	Realizações da variável aleatória $N$ .
$n_1(t), n_2(t), \dots$	Realizações de um processo estocástico $N(t)$ .
$N_D$	Número de níveis de dano.
$Ne_{D5V}$	Número de edifícios que colapsaram e que pertencem a uma dada tipologia de vulnerabilidade $V$ .
$Ne_T$	Número total de edifícios na região em análise.
$N(m)_k$	Número de sismos com magnitude maior ou igual a $m$ que ocorre na região analisada, para um dado período de observação.
$N_{pe}$	Número médio de pessoas por edifício.
$N_{pT}$	População total, residente na região.
$N_{pV}$	Número médio de pessoas por tipologia de edifícios.
$N_S$	Número de locais de uma região em que se analisam as perdas.
$N_t$	Número de eventos sísmicos desde o intervalo de tempo $t$ .
$N(t)$	Processo estocástico.
$N_{Vmortos}$	Número esperado de mortos numa dada tipologia de edifícios de vulnerabilidade $V$ .
$N_Z$	Número de zonas de geração da região sísmica.
$P_0, P_1, P_2, P_3, P_4$	Coeficientes do ajuste polinomial ao parâmetro da distribuição binomial.

$P[\cdot]$ e $P_A$	Probabilidade do acontecimento $[\cdot]$ e probabilidade do acontecimento $A$ .
$p(I)$	Parâmetro da distribuição binomial condicional à intensidade $I$ e válido para uma dada classe de vulnerabilidade $V$ .
$PML$	Perdas máximas prováveis ou valores de acumulação de risco.
$PM_V$	Potencial de mortalidade efectivo por tipologia de edifício.
$p_\beta(x)$	Função densidade de probabilidade da distribuição beta.
$R$	Distância entre a fonte e o local em análise.
$\mathcal{R}$	Risco (sísmico) absoluto ou risco (sísmico).
$\mathbf{R}$	Vector distância entre a célula $i$ e o local em análise $j$ .
$R_{cen}$	Distância entre a localização do cenário de perigosidade sísmica e o local em análise.
$RP_0$	Período de retorno.
$\mathcal{R}_S$	Risco (sísmico) específico.
$TF$	Taxa de feridos.
$TM$	Taxa de mortos.
$SA$	Aceleração espectral.
$SA_{max}$	Aceleração espectral no ponto de resposta máxima.
$S_A, S_S$	Condições geológicas do local em análise.
$SA_u$	Aceleração espectral no ponto de resposta última.
$SA_y$	Aceleração espectral no ponto de cedência.
$SD$	Deslocamento espectral.
$\overline{SD}_d$	Valor mediano do deslocamento espectral para o qual um edifício, representativo de uma dada tipologia, atinge o limiar do estado de dano $d$ .
$SD_{max}$	Deslocamento espectral no ponto de resposta máxima.
$SD_u$	Deslocamento espectral no ponto de resposta última.
$SD_y$	Deslocamento espectral no ponto de cedência.
$T_e$	Período do modo de vibração fundamental do edifício ou tipologia.
$T \times T$	Código do modelo de avaliação de danos Tiedemann [1992] combinado com o modelo de avaliação de perdas humanas Tiedemann [1992].
$T, t$	Intervalo de tempo.

$\bar{V}$	Vulnerabilidade sísmica média de cada concelho.
$V_I$	Índice de vulnerabilidade.
$\bar{V}_I$	Índice de vulnerabilidade total.
$V_I^*$	Índice de vulnerabilidade mais provável.
$V_{Imin}, V_{Imax}$	Limites inferior e superior da gama dos valores possíveis do índice de vulnerabilidade.
$V_I^-, V_I^+$	Limites inferior e superior da gama dos valores plausíveis do índice de vulnerabilidade.
$VRPH$	Valor de reposição do parque habitacional da região em análise.
$V, v$	Vulnerabilidade (sísmica) dos elementos em risco.
$\mathbf{W}$	Vector de variáveis que, na lei de atenuação, caracterizam a fonte, ou a propagação ou as condições locais.
$\hat{X}$	Valor modal da distribuição da variável aleatória $X$ .
$\mathbf{X}, \mathbf{x}$	Vector de variáveis aleatórias.
$(X, Y)_{cen}$	Localização do cenário de perigosidade sísmica.
$(X, Y), (x, y)$	Variáveis que determinam a localização geográfica da fonte de sismicidade.
$Z \times C$	Código do modelo de avaliação de danos Zuccaro & Papa [2002] combinado com o modelo de avaliação de perdas humanas Coburn & Spence [2002].
$\alpha_1$	Fracção do peso do edifício, representativo de uma dada tipologia, que participa no seu modo de vibração fundamental.
$\alpha_2$	Fracção da altura do edifício, representativo de uma dada tipologia, que participa no seu modo de vibração fundamental.
$\beta_d$	Desvio padrão do logaritmo neperiano do deslocamento espectral para o estado de dano $d$ .
$\beta_k$	Produto de $b_k$ por $\ln(10)$ .
$\gamma_1$	Factor de sobre resistência que relaciona a capacidade de cedência real com a capacidade de cálculo.
$\gamma_2$	Factor de sobre resistência que relaciona a capacidade última com a capacidade de cedência.
$\Gamma(\cdot)$	Função gama.
$\delta_d$	Coefficiente de deslocamento relativo entre pisos correspondente ao estado de dano $d$ .

$\Delta m, \Delta r, \Delta \varepsilon$	Dimensão de uma célula num espaço tridimensional em $M-R-\varepsilon$ .
$\Delta m, \Delta x, \Delta y, \Delta \varepsilon$	Dimensão de uma célula num espaço a quatro dimensões em $M-(X,Y)-\varepsilon$ .
$\Delta V_m$	Modificador do comportamento sísmico dos edifícios.
$\Delta V_R$	Índice de vulnerabilidade regional.
$\varepsilon$	Variável aleatória que representa a incerteza na intensidade do movimento do solo, ou desvio em relação ao valor previsto pela lei de atenuação.
$\varepsilon_{cen}$	Desvio a adicionar ao valor mediano do modelo de atenuação para previsão do movimento do solo no local utilizando os parâmetros do cenário.
$(\lambda_{H > h})$	Taxa média de ocorrência de sismos que originam no local em análise, intensidades superiores a um determinado nível de referência $h$ .
$\mu$	Factor de ductilidade.
$\mu_D$	Grau de dano médio.
$\nu$	Taxa média de ocorrência de sismos.
$\xi$	Amortecimento.
$\rho_{jj'}$	Coefficiente de correlação entre as perdas dos locais $j$ e $j'$ .
$\sigma$	Desvio padrão.
$\tau$	Período de tempo de exposição.
$\Phi$	Função cumulativa de uma distribuição Gaussiana reduzida.
$\chi$	Função de pertença.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Justificação do tema

O risco sísmico de uma região é medido pelas perdas esperadas que os elementos dessa região sofrerão, como resultado de sismos futuros, e pela probabilidade das mesmas ocorrerem para um certo período de tempo de exposição [Coburn & Spence, 2002; EERI, 1989].

Os elementos expostos ao risco sísmico possuem um certo grau de susceptibilidade para serem afectados por este tipo de fenómenos naturais, ou seja, são caracterizados por uma determinada vulnerabilidade à acção dos sismos. Um elemento em risco pode ser definido como um edifício, conjunto de edifícios, cidade, país, população que nele habita, sistema de infra-estruturas ou equipamentos, actividade económica, etc.

São assim identificáveis três factores principais e interligados que contribuem para o risco sísmico de uma região: (i) o perigo potencial de ocorrência de sismos na região, (ii) a exposição, ou o valor dos elementos em risco e a sua distribuição geográfica, e (iii) a vulnerabilidade sísmica dos elementos expostos e a extensão e grau da sua danificação, face à acção dos sismos.

Desta forma, é compreensível que a variação de qualquer dos três factores mencionados condicione a severidade do risco sísmico.

Por exemplo, é razoável que uma dada região sujeita a sismos intensos, mas escassamente habitada, tenha um risco sísmico reduzido e que regiões diferentes, com exposição semelhante e sujeitas a sismos da mesma severidade, possuam riscos tanto mais elevados quanto mais vulneráveis forem as estruturas nelas existentes [Sousa *et al.*, 2000b].

A propósito de vulnerabilidade, veja-se o exemplo elucidativo que consta da figura 1.1, em que é possível comparar o comportamento de dois edifícios vizinhos, quando sujeitos a uma acção sísmica semelhante. O edifício da esquerda, que tinha sido reforçado pouco antes do sismo, não sofreu danos, enquanto que o da direita colapsou totalmente [Sousa *et al.*, 2000b].



Fotografia de Jorge Rodrigues, 1998

*Figura 1.1 – Danos em edifícios no local de Espalhafatos; sismo do Faial de 1998.*

A nível mundial as estatísticas confirmam que, apesar da ameaça sísmica se ter mantido aproximadamente constante ao longo do tempo, as perdas materiais em consequência da actividade sísmica sofreram um aumento gradual ao longo de todo o século XX.

Coburn & Spence [2002] justificam o aumento das consequências adversas dos fenómenos sísmicos pelo crescimento da população mundial e pela sua concentração em centros urbanos potencialmente ameaçados por eventos sísmicos severos. Situações deste tipo originam a expansão de infraestruturas, de sistemas tecnológicos e de actividades económicas de complexidade crescente, verificando-se que a taxa de redução da vulnerabilidade sísmica de aglomerados urbanos, devida, por exemplo, à disseminação de práticas construtivas sísmo-resistentes, não é suficiente para acompanhar o incremento da exposição dos elementos em risco.

Também a nível mundial se verificou que, ao longo do século XX, poucos progressos foram conseguidos na redução das perdas humanas em consequência de sismos, embora se constate que existe um diferencial crescente entre (i) os montantes de vítimas de sismos que afectam países que investem de forma efectiva na mitigação do risco e (ii) os montantes análogos verificados em países que não o fazem.

Em Portugal, os relatos dos efeitos dos sismos ocorridos até à actualidade, o estado actual dos conhecimentos sobre a perigosidade sísmica do País e a existência de construções não dimensionadas para resistir a sismos, indiciam que parte da população portuguesa vive em situações de risco sísmico considerável.

Acresce que Portugal se situa numa região sísmica cujo padrão de ocorrências se caracteriza por uma frequência reduzida de acontecimentos com grande impacto. A baixa probabilidade de ocorrência destes fenómenos, aliada à sua imprevisibilidade, conduz a síndromas designados no âmbito das ciências sociais [Silva, 2002] de «atenuação social do risco» com uma consequente «atrofia da vigilância», e «desprotecção em relação a eventualidades indesejáveis», resultantes da reduzida distribuição de recursos para a sua mitigação.

Se em geral a população portuguesa não tem a percepção adequada para o problema sísmico no território nacional, exceptuando provavelmente os habitantes do arquipélago dos Açores, é certo que a comunidade técnica e científica é conhecedora da existência de riscos sísmicos no nosso território e da possibilidade de os minorar, caso se tomem, antecipadamente, medidas preventivas para a redução da vulnerabilidade sísmica [SPES & GECORPA, 2001].

Urge assim avaliar a dimensão actual do problema do risco sísmico em Portugal, para posteriormente se proceder de forma fundamentada e antecipada à redução do risco de perdas humanas e materiais causadas por este tipo de fenómenos naturais, bem como ao planeamento de procedimentos para minimizar as suas consequências. Em suma, é fundamental tomar medidas efectivas para mitigar o risco sísmico em Portugal e evitar que os sismos, que constituem perigos naturais pouco frequentes, resultem em desastres com repercussões económicas e sociais adversas, ou mesmo catastróficas, principalmente em áreas urbanas.

## **1.2. Objectivos**

O objectivo principal do presente trabalho de investigação é o de avaliar o risco sísmico em Portugal Continental.

À semelhança do que acontece na maioria dos estudos de risco sísmico, é possível identificar três objectivos parcelares que conduzem ao cumprimento do objectivo principal acima mencionado: (i) a avaliação da perigosidade sísmica, (ii) a inventariação dos elementos expostos ao risco sísmico, a sua georeferenciação e valorização e (iii) a classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica destes elementos.

No presente caso, e relativamente a trabalhos anteriores [Sousa, 1996], a perigosidade sísmica apenas necessitou de ser reavaliada, com ligeiras alterações metodológicas e de dados. Assim, redefiniu-se o objectivo desta primeira etapa do processo, que passou a ser o de efectuar a análise de desagregação da perigosidade sísmica, com vista a melhorar a compreensão dos factores envolvidos na sua avaliação e a identificar os cenários de ocorrência que a dominam.

No entanto, o objectivo último dos estudos de avaliação do risco sísmico de estruturas ou sistemas é o de fornecer uma base racional para a tomada de decisões fundamentadas relativas à segurança sísmica e à eventual redução do risco para níveis aceitáveis [McGuire, 2004].

Por esta razão, um estudo de avaliação do risco sísmico não constitui um fim em si mesmo, sendo desejável a sua integração num programa nacional efectivo de gestão do risco sísmico. Vejam-se exemplos possíveis de trabalhos de mitigação do risco sísmico em que é fundamental a análise prévia dos níveis de risco da região: (i) a definição de estratégias de planeamento e gestão da emergência, (ii) a definição de prioridades para o reforço e reabilitação sísmica, (iii) o desenvolvimento de códigos de construção, (iv) a defesa do património e a segurança de instalações críticas, (v) o ordenamento do território e o planeamento urbanístico, (vi) a definição de políticas de seguros, (vii) o aumento da percepção dos cidadãos face ao risco sísmico, etc.

Tendo em vista integrar os resultados deste estudo em trabalhos de âmbito mais alargado, tais como os exemplificados, identificam-se três objectivos operacionais. O primeiro está ligado à manutenção do sistema desenvolvido com informação actualizada e exaustiva sobre os elementos em risco. Adianta-se que, actualmente, os quantitativos habitacionais e populacionais utilizados foram apurados nos Censos 2001 [INE, 2002a] para a unidade geográfica das freguesias e integrados num Sistema de Informação Geográfica (SIG). O segundo refere-se à flexibilização das alterações de dados e metodologias. Para o efeito, desenvolveram-se procedimentos com carácter modular, também integrados no SIG, visando potenciar futuras actualizações. Finalmente, o terceiro objectivo passa pela compreensão da influência dos três factores envolvidos (perigosidade, exposição e vulnerabilidade) sobre os níveis de risco sísmico de Portugal Continental.

### 1.3. Organização

O presente estudo encontra-se organizado em oito capítulos que se enquadram no fluxograma da figura 1.2, excepção feita para os capítulos 1, 2 e 8, referentes à introdução metodologias, e conclusões.

Este fluxograma, além de sintetizar a organização do trabalho, explicita o encadeamento e as inter-relações dos três factores já mencionados que integram um estudo de risco: (i) a perigosidade, (ii) a exposição e (iii) a vulnerabilidade. O estudo culmina na avaliação do risco sísmico, ou do risco sísmico específico, resultando este último da normalização do risco sísmico pelo valor dos elementos em risco.

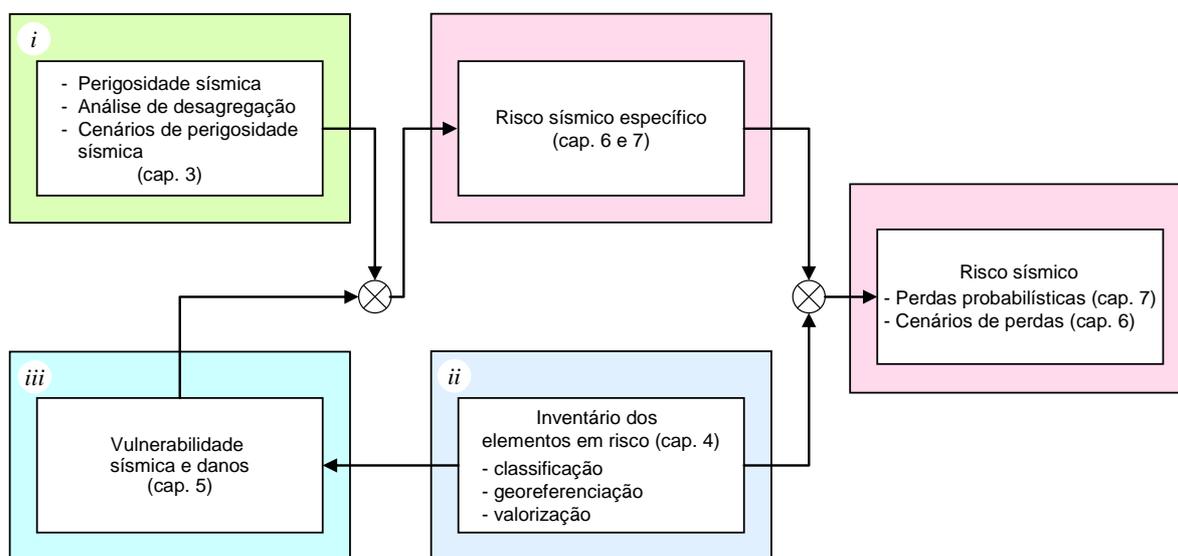


Figura 1.2 – Componentes do procedimento para avaliação do risco sísmico.

Assim, nesta *Introdução* apresenta-se o tema a desenvolver, salienta-se a importância deste domínio científico e justifica-se a necessidade de realizar um trabalho de investigação em que se procede à avaliação do risco sísmico em Portugal Continental. Sintetizam-se ainda os objectivos estritos e alargados da pesquisa efectuada, bem como a estrutura do trabalho.

O capítulo 2, *Metodologias para a avaliação do risco sísmico* constitui uma abordagem teórica dos temas tratados, englobando a pesquisa bibliográfica efectuada sobre o estado da arte nestas matérias, onde se apresentam e justificam os modelos seleccionados para aplicação às várias etapas de avaliação do risco sísmico.

No capítulo 3 procede-se à reavaliação da *Perigosidade sísmica* em Portugal Continental, com dois propósitos correlacionados: (i) modelar analiticamente a perigosidade sísmica para cumprir a primeira etapa do processo de avaliação do risco e (ii) efectuar a *análise de desagregação* da perigosidade sísmica para identificar os cenários de ocorrência que a dominam. Os cenários assim identificados são utilizados na subsequente avaliação do risco sísmico e incerteza respectiva, em regiões extensas de Portugal Continental.

O *Inventário dos elementos em risco* em termos de quantitativos habitacionais e populacionais é realizado no capítulo 4, adoptando cada freguesia de Portugal Continental como unidade de análise elementar. Como já foi referido, este levantamento é efectuado com base na informação estatística dos Censos 2001 [INE, 2003] tendo em consideração a distribuição geográfica dos elementos expostos ao risco sísmico e os factores de vulnerabilidade sísmica possíveis de apurar nestes recenseamentos.

A classificação e a caracterização da *Vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco* é abordada no capítulo 5. A necessidade de adequar a classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional à realidade construtiva de Portugal Continental conduziu à caracterização dos principais tipos de construção que subsistem ou se praticam neste território. Por sua vez, a classificação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios é feita de forma consentânea com o inventário disponível dos elementos em risco e a caracterização da sua vulnerabilidade é condicionada pelos métodos adoptados para a avaliação de danos.

O capítulo 6 dedica-se à apresentação do programa automático de *Simulação de cenários sísmicos* e do trabalho conducente à sua aferição em termos de danos no edificado e perdas humanas. Efectuam-se simulações de cenários sísmicos, para acções semelhantes à de eventos que, no passado, afectaram Portugal Continental, mas com impacto sobre elementos actualmente expostos ao risco sísmico.

A *Avaliação do risco sísmico* é efectuada no capítulo 7 concretizando três abordagens diferentes de modelação de perdas em consequência de sismos. Neste capítulo analisa-se o papel dos vários factores envolvidos sobre as avaliações do risco sísmico, comparam-se os valores obtidos das perdas esperadas entre regiões do Continente Português e com valores respeitantes a outras regiões do globo. Reúnem-se também algumas conclusões sobre o risco sísmico a que o território de Portugal Continental se encontra exposto.

Finalmente, o capítulo 8, das *Conclusões*, é construído nos moldes de um resumo alargado sobre o trabalho desenvolvido, pois nele é feita uma retrospectiva global do estudo, tecem-se algumas considerações sobre os principais resultados obtidos, sintetizam-se as principais conclusões sobre as várias etapas do estudo e sugerem-se linhas de investigação futura, perspectivando a continuidade da presente pesquisa.



## 2. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO

### 2.1. Introdução

No presente trabalho procede-se à avaliação de forma integrada e multidisciplinar do risco sísmico do Continente Português. A pesquisa realizada recorreu a informação actualizada e exaustiva, no universo considerado, dotada de um nível de análise geográfica apreciável, mas também a ferramentas informáticas adequadas e a metodologias alternativas, com vários níveis de sofisticação.

Muitos foram os estudos que, directa ou indirectamente, contribuíram para que este trabalho fosse desenvolvido, pois dificilmente seria possível realizá-lo sem o acervo actual de conhecimentos em Portugal, cujo progresso foi iniciado em meados do século XX e do qual resultou o surgimento de uma verdadeira escola nacional de sismologia e engenharia sísmica.

Por isso, este capítulo começa com a apresentação de uma resenha de publicações de autores nacionais sobre o tema do risco sísmico, encarado no seu sentido mais lato e abrangente, ressaltando-se que não existe, actualmente, uma abordagem uniforme aplicável a este tipo de avaliações.

De acordo com Oliveira [1998], até meados da década de 90 do século XX, a maioria das aplicações na área de mitigação do risco sísmico eram realizadas na perspectiva do estudo do impacto de cenários sísmicos com a finalidade de se definirem planos de emergência, incidindo sobretudo sobre a cidade de Lisboa [Mendes Victor *et al.*, 1993; Oliveira *et al.*, 1993; Pais & Ribeiro, 1994; Pais *et al.*, 1996a; Pais *et al.*, 1996b; Vicêncio, 1996 citado por Oliveira, 1998 e Vicêncio, 1997 citado por Oliveira, 1998].

Mais recentemente, e dentro da mesma classe de aplicações saliente-se o estudo de «Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras», promovido pelo Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil [Carvalho *et al.*, 2002a e Carvalho *et al.*, 2003].

Foram estes estudos de impacto, ou de avaliação de cenários sísmicos, que despoletaram a necessidade de utilização de ferramentas SIG (Sistemas de Informação Geográfica). Estas ferramentas facilitam o armazenamento de grandes volumes de informação, a sua constante actualização, a manipulação e análise de informação georeferenciada. Os SIG possuem capacidades de mapeamento sofisticadas, podendo ser utilizados, em áreas de actuação como as da protecção civil, para a obtenção das estimativas de perdas resultantes de um ou mais sismos, conhecidas a sua magnitude, localização do seu epicentro, data e hora de ocorrência.

Também ao nível internacional o recurso a ferramentas SIG constitui uma tendência global neste campo de aplicações [e.g. Caicedo *et al.*, 1994; Eguchi *et al.*, 1997; Erdik 1996; FEMA & NIBS, 1999; King *et al.*, 1997; Mihailov & Siderovski 1999; Rojahn *et al.*, 1997; Whitman *et al.*, 1997 e Zonno *et al.*, 1999], pois são instrumentos preferenciais para a disseminação dos resultados de estudos de risco sísmico e para apoiar decisões informadas em processos mais abrangentes de gestão do risco.

Oliveira [1998] lista ainda outros estudos que constituem contribuições para a avaliação do risco sísmico, entendido em sentido lato e de incidência local, designadamente: (i) as aplicações específicas ao comportamento sísmico de centros históricos, tais como o de Évora [Ferreira *et al.*, 1996 citado por Oliveira 1998], a colina do Castelo de S. Jorge [Pais *et al.*, 1997] e o bairro de Alfama em Lisboa [D'Alaya *et al.*, 1997], (ii) o estudo do comportamento sísmico de redes hospitalares (projecto HOPE [Oliveira & Guedes, 1996]) e (iii) o projecto de investigação *Avaliação do Comportamento Sísmico de Estruturas Monumentais - Aplicação à Portaria de S. Vicente de Fora* [Campos Costa *et al.*, 1997; Oliveira & Pinto, 1995 e Vaz, 1997].

Metodologias que adoptaram a via probabilística para avaliar o risco, aqui entendidas como modelos de risco em sentido estrito, foram iniciadas no passado em Portugal [Campos Costa *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 1995 e Sousa *et al.*, 1997a]. Nestes trabalhos os dados disponíveis apenas permitiam discriminar a vulnerabilidade das tipologias de forma grosseira, e os modelos de danos adoptados, as curvas de vulnerabilidade de Tiedemann [1992], eram muito simplificados. Todavia, estes estudos constituíram a génese da presente pesquisa.

Ao nível das contribuições parcelares para o estudo do risco sísmico de Portugal Continental importa referir, sem se pretender ser exaustivo, os trabalhos que incidem sobre as componentes da perigosidade, do inventário de elementos em risco e da vulnerabilidade sísmica.

Para começar, o estudo probabilístico da perigosidade sísmica que é um domínio de investigação com longa tradição no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, como o comprova a extensa lista de bibliografia nesta matéria publicada por autores deste Laboratório [e.g. Campos Costa, 1993; Campos Costa & Sousa, 1998a; Campos Costa & Sousa, 1998b; Coelho *et al.*, 1992; Coelho & Marcelino, 1997; Correia, 1996; Oliveira, 1977; Oliveira *et al.*, 1990; Sousa, 1996; Sousa & Campos Costa, 1998 e Sousa & Oliveira, 1997].

Em 1977, Oliveira introduziu em Portugal a metodologia de Cornell [Cornell, 1968] para a análise probabilística da perigosidade sísmica que, neste domínio, constitui a metodologia de maior divulgação e utilização a nível mundial. A aplicação dessa metodologia a Portugal serviu de base ao estabelecimento das acções sísmicas regulamentares no nosso País [RSA, 1983]. Desde essa data que a análise probabilística da perigosidade sísmica tem vindo a sofrer sucessivas actualizações em consequência da disponibilização de novos dados [Sousa, 1996], da implementação de novos métodos, como o do espectro de resposta uniforme [Sousa & Campos Costa, 1998], ou da utilização de novas ferramentas informáticas [Campos

Costa & Pinto, 1997]. Também a extensão e a resolução geográfica das aplicações é bastante variável, incluindo desde a avaliação da perigosidade sísmica dependente do sítio [Coelho & Marcelino, 1997], até à avaliação da perigosidade sísmica ao nível Europeu [Campos Costa & Pinto, 1997], passando, por exemplo, pela avaliação da perigosidade sísmica de Portugal Continental [Campos Costa, 1993; Oliveira, 1977; Oliveira *et al.*, 2000; Sousa, 1996 e Sousa *et al.*, 1997b], do Grupo Central do Arquipélago dos Açores [Sousa & Carvalho, 2001] e da ilha de S. Miguel nos Açores [Oliveira *et al.*, 1990].

Entre os trabalhos mais recentes sobre este tema merecem menção especial os estudos de perigosidade sísmica de Vilanova [2004] e de Teves Costa & Viegas [2004], que incidiram fundamentalmente sobre a região do vale inferior do Tejo.

Os desenvolvimentos sobre a desagregação da perigosidade sísmica foram iniciados em Portugal no âmbito do projecto promovido pelo Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil atrás referido [Carvalho *et al.*, 2002a], sendo posteriormente actualizados e melhorados [Campos Costa *et al.*, 2002; Sousa & Carvalho, 2001 e Sousa *et al.*, 2001], culminando, nesta data, com os procedimentos e resultados exibidos no capítulo 3 desta dissertação.

Por outro lado, o inventário do parque habitacional ao nível de Portugal Continental, com vista à caracterização da sua vulnerabilidade sísmica, terá sido iniciado no âmbito do projecto «Mitigação do risco sísmico em Portugal», patrocinado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia» [Sousa *et al.*, 2000a e 2003] constituindo o trabalho de base para o desenvolvimento do capítulo 4 desta dissertação. Importa referir outros trabalhos de incidência local, em que o inventário é realizado edifício a edifício, recorrendo a fichas de caracterização que visam identificar as suas principais características estruturais, de que é exemplo os estudos realizados para algumas freguesias das cidades de Lisboa [Aguiar *et al.*, 1992; Oliveira *et al.*, 1985 e Oliveira *et al.*, 1994] e de Faro [Dias *et al.*, 2001].

Já no que concerne aos estudos de vulnerabilidade sísmica, eles têm sido fundamentalmente efectuados sob a óptica da análise estrutural [*e.g.* Bento, 1996; Borges & Castanheta, 1985; Campos Costa, 1993; Carvalho, 1980; Coelho, 1992; Duarte, 1978; Pinto, 1997 e Ravara, 1968] ou têm incidido sobre casos de estudo de avaliação do comportamento sísmico de estruturas individuais, ou de tipologias específicas, [*e.g.* Candeias *et al.*, 2004; Candeias & Coelho, 2001; Cardoso, 2002; Cardoso *et al.*, 2001; Coelho & Campos Costa, 2004; Estêvão, 1998; Lopes & Azevedo, 1997; Pinto *et al.*, 2002; Ramos, 2002 e Ramos & Lourenço, 2000]. Este tipo de estudos é de difícil extrapolação para avaliações regionais do risco, com manifesta excepção do trabalho de Carvalho *et al.* [2002a], já sobejamente referido.

Ao nível de iniciativas conducentes à mitigação do risco sísmico merecem destaque especial: (i) a proposta conjunta apresentada pela Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) e pelo Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico (GECORPA) relativa a um *Programa Nacional de Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado* que já sofreu uma ampla discussão no seio da comunidade técnica e científica nacional [SPES & GECORPA, 2001], (ii) o projecto integrado Europeu *LESSLOSS*

– *Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides* [Campos Costa *et al.*, 2005; Calvi & Pinho, 2004 e Sousa *et al.*, 2005] que tem o objectivo de avaliar o risco sísmico, o seu impacto ambiental, urbano e nas infra-estruturas, de delinear estratégias de prevenção e de protecção, prevendo-se a sua aplicação a diversas áreas metropolitanas, entre elas a de Lisboa e (iii) o *Workshop on Reduction Earthquake Risk in Europe* em que se discutiram propostas para a redução do risco sísmico ao nível Europeu [Spence, 2005 e Spence *et al.*, 2005].

São ainda de realçar os *Encontros Nacionais sobre Sismologia e Engenharia Sísmica* promovidos pela SPES tendo sido realizada, em 2004, a sua sexta edição.

Mais recentemente, e a propósito dos 250 anos do sismo de 1755, surgiram uma série de publicações alusivas ao evento [FLAD & Público, 2005; Fonseca, 2004 e Pereira, 2005], mas também sobre sismos e tsunamis em geral [Teves Costa, 2005]. É de assinalar a ênfase dada pela comunicação social à temática [Alexandra *et al.*, 2005; Gastão *et al.*, 2005; Fernandes, 2005; Naves, 2005; Neves, 2005 e Ribeiro, 2005], bem como a realização de algumas conferências internacionais que marcaram a efeméride: *250<sup>th</sup> anniversary of the 1755 Lisbon earthquake* e *O terramoto de 1755. Impactos históricos*.

Para terminar esta introdução sistematiza-se a organização do presente capítulo.

Com o objectivo de facilitar a exposição do trabalho e de o tornar consistente, reúnem-se, na secção 2.2, as definições que foram adoptadas no quadro desta pesquisa, sobre o tema do risco sísmico.

Nas restantes secções efectua-se a exposição detalhada da pesquisa bibliográfica efectuada e reúnem-se os modelos seleccionados para serem aplicados nas diversas etapas de avaliação do risco sísmico.

Assim, na secção 2.3 descrevem-se os modelos de avaliação da perigosidade sísmica e sua desagregação, passando pela discussão das vantagens e desvantagens da utilização de cenários sísmicos, de ocorrência, determinísticos ou probabilísticos.

Na secção 2.4 expõe-se o estado da arte relativo à avaliação da vulnerabilidade sísmica e danos no edificado e na secção 2.5 apresentam-se os modelos sobre a vulnerabilidade sísmica e perdas humanas.

Por último, na secção 2.6, para além de se apresentarem modelos probabilísticos de avaliação do risco sísmico, abordam-se temas relativos ao processo de gestão do risco sísmico, à sua acumulação a um nível regional, à avaliação de incertezas e adiantam-se os quatro procedimentos que serão utilizados neste trabalho para modelar as perdas em consequência de sismos.

## **2.2. Definição de conceitos**

A definição de conceitos é essencial num estudo de risco sísmico de modo a tornar o texto mais conciso, explícito e matematicamente consistente. Efectivamente, apesar dos

principais conceitos já se encontrarem definidos por convenções internacionais eles têm sido utilizados ao longo do tempo com diversos significados, quer em sentido lato quer em sentido estrito [McGuire, 2004], provavelmente devido à interdisciplinaridade da matéria, ao facto do tema ser relativamente recente e de, muitas vezes, os termos técnicos não chegarem a ser formalizados matematicamente.

Os conceitos principais utilizados em trabalhos de avaliação do risco sísmico são também comuns a outros tipos de catástrofes naturais. Os esforços para a harmonização destes conceitos culminaram em 1979, quando um grupo de trabalho patrocinado pelas Nações Unidas estabeleceu uma convenção que inclui um conjunto de definições básicas neste domínio [UNDRO, 1979, citado por Barbat & Pujades, 2004; Caicedo *et al.*, 1994; Coburn *et al.*, 1994 e Sandi, 1986].

Com base nas referências acima mencionadas, mas também em aplicações efectuadas em Portugal no domínio dos fenómenos sísmicos [Campos Costa, 1993; Campos Costa *et al.*, 1997; Campos Costa *et al.*, 1999; Campos Costa & Sousa, 1998a; Campos Costa & Sousa, 1998b; Oliveira, 1977; Oliveira *et al.*, 1995; Sousa, 1996; Sousa *et al.*, 1997a e b; Sousa & Campos Costa, 1998; Sousa & Oliveira, 1997; etc.], apresentam-se as principais definições adoptadas nesta dissertação aplicáveis ao tema da avaliação do risco de qualquer tipo de fenómeno natural:

1. *Perigosidade, perigo* ou *ameaça, H*, é entendida como a probabilidade de excedência de um determinado nível de severidade do fenómeno natural, num local e período de tempo de exposição especificados.
2. Os elementos expostos ao risco de uma catástrofe natural, ou simplesmente os *elementos em risco* são as existências susceptíveis de serem adversamente afectadas pelo fenómeno natural numa região determinada.
3. A *exposição, E*, dos elementos em risco, reflecte o valor dos elementos expostos ao risco ou é traduzida por uma medida quantitativa das existências dos mesmos.
4. A *vulnerabilidade, V*, reflecte a capacidade que um determinado elemento em risco tem para resistir, ou para ser afectado, pelo fenómeno natural, sendo condicionada pelo nível de severidade do fenómeno.
5. O *risco específico,  $\mathcal{R}_S$* , é a probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas relativas, em consequência da ocorrência do fenómeno natural na região e período de exposição especificados, sendo uma função da perigosidade e da vulnerabilidade. O risco específico é muitas vezes expresso pelo valor esperado das perdas sofridas por um elemento em risco num intervalo de tempo, normalizado pelo valor global do elemento em risco.
6. O *risco* ou *risco absoluto,  $\mathcal{R}_A$*  refere-se à probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas absolutas em consequência da ocorrência do fenómeno natural na região e num período de tempo de exposição especificado, sendo uma função da perigosidade, da vulnerabilidade e do valor dos elementos em risco (exposição).

Face a estas definições, convencionou-se que a formulação matemática geral do risco específico se exprime pela convolução das distribuições de probabilidade da perigosidade e da vulnerabilidade. Esta formulação apresenta-se na equação 2.1 de acordo com o conceito de Barbat & Pujades [2004], Caicedo, *et al.* [1994] e Yépez *et al.* [1995], justificado, por exemplo, em Melchers [1999]. Também o risco absoluto resulta da convolução do risco específico pela exposição,  $E$ :

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_S \otimes E = (H \otimes V) \otimes E \quad (2.1)$$

A acumulação do risco para todas as existências da região em análise é um problema complexo, que exige o conhecimento da distribuição geográfica das três variáveis envolvidas, bem como das suas correlações (ver secção 2.6.3).

Para clarificar os conceitos anteriormente apresentados, Barbat & Pujades [2004] referem-se à perigosidade, ou ameaça, como sendo um perigo potencial, ou um factor de risco externo aos elementos expostos, enquanto que a vulnerabilidade, consistindo na propensão intrínseca para os elementos em risco serem danificados, é entendida como um factor de risco interno ao sistema em análise.

Aplicando os conceitos expostos ao domínio dos fenómenos sísmicos e estendendo a lista mencionada a outros conceitos associados, sistematiza-se um conjunto de definições necessárias ao enquadramento e compreensão do trabalho que se segue. A formulação matemática subjacente será detalhada nas secções 2.3 a 2.6.

Seguindo a proposta de Sandi [1986] o primeiro conceito que deve ser definido no âmbito de uma análise de risco sísmico é o de *ambiente* ou *sistema construído*<sup>1</sup>. Este pode ser composto por estruturas individuais, como edifícios, ou englobar um sistema integrado de estruturas que incluam diversas componentes como as redes de água, energia, comunicações e transportes de uma região urbana. Neste caso, para além de se caracterizar os elementos constituintes do sistema é também necessário localizá-los e identificar a sua função e inter-relações.

Os *elementos em risco* ou *existências* são as entidades que poderão ser afectadas adversamente em caso de sismo, devido ao desempenho do sistema construído. Os habitantes de uma determinada região são exemplo de elementos em risco que podem ser afectados pelos edifícios construídos. Por outro lado, esses edifícios são exemplo de elementos em risco que se confundem com o próprio sistema construído. Num estudo de risco sísmico é necessário quantificar a *exposição* desses elementos, ou seja o seu valor. Para o efeito, procede-se a um inventário georeferenciado das existências e do seu valor, evidenciando factores capazes de caracterizar a vulnerabilidade dessas existências face à acção sísmica. A definição dos

---

<sup>1</sup> No original: *built system*.

elementos em risco condicionará a forma como é avaliado o risco e terá implicações nas variáveis que o quantificam.

Os *danos* correspondem aos efeitos físicos adversos causados por um sismo de determinada intensidade sobre o sistema construído e que podem ser directamente observados num levantamento após a ocorrência do evento [Sandi, 1986]. Os procedimentos de avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico requerem a quantificação da severidade dos danos, por meio de *indicadores de dano*, e a descrição da natureza dos mesmos. Muito resumidamente, os indicadores de dano podem incidir sobre o sistema como um todo, ou sobre os danos confinados aos seus componentes individuais. Podem ainda englobar os dois níveis de definição ou seja, o global e o local [FEMA & NIBS, 1999], ou incluir níveis intermédios, como os danos relativos a uma parte de um sistema, por exemplo, um piso de um edifício [Estêvão, 1998]. Os indicadores de danos podem ser quantificados numa escala contínua, de razões, dos quais são exemplo os índices de dano que variam entre 0 e 1, reflectindo uma gama de variação entre a ausência de danos e o colapso, ou ser classificados numa escala ordinal em que a severidade do dano é descrita de forma qualitativa, mas enquadrada em categorias com a propriedade da ordem. Em estudos de risco sísmico essas categorias designam-se de *estados de dano*, *níveis de dano* ou ainda *graus de dano* e variam entre um estado que descreve a ausência de dano e o que descreve o colapso do sistema, existindo diversos estados intermédios. A definição dos estados de dano é em geral efectuada para classes específicas de sistemas construídos ou tipologias construtivas.

*Tipologias* são subconjuntos de sistemas construídos com características idênticas em termos da sua vulnerabilidade à acção sísmica. No caso do sistema construído ser um conjunto de edifícios, o critério empregue na classificação das tipologias de edifícios encontra-se explicado em Costa [1990], que sustenta a distinção das tipologias com base no seu desempenho sísmico, o qual é condicionado basicamente pelas respectivas soluções estruturais. Nesta perspectiva, as classes de edifícios serão também designadas de *tipologias estruturais* ou de *tipologias construtivas*. Nos métodos de avaliação da vulnerabilidade é corrente agrupar as tipologias construtivas em categorias mais abrangentes, designadas de *classes de vulnerabilidade*. Estas classes agrupam tipologias construtivas seleccionadas, nomeadamente tipologias que descrevem edifícios com o mesmo tipo de estrutura, pertencentes a épocas de construção próximas e englobando diversas classes de número de pavimentos. Espera-se que os edifícios pertencentes a uma dada classe de vulnerabilidade apresentem, grosso modo, um desempenho idêntico face à acção dos sismos, embora com maiores variações que os edifícios pertencentes a uma determinada tipologia construtiva, decorrentes das classes de vulnerabilidade englobarem diversas tipologias construtivas.

As *perdas* correspondem aos efeitos económicos e sociais adversos estimados a partir do conhecimento dos níveis da acção sísmica ou dos níveis de dano. Os *indicadores de perdas* medem a severidade das consequências adversas produzidas pela ocorrência de um sismo sobre os elementos em risco. São exemplos de indicadores de perdas, o número de mortos, feridos ou desalojados, o valor de reposição de danos em edifícios, os custos da interrupção de

uma dada actividade económica, os custos da rotura do funcionamento de uma infra-estrutura, etc., números estes avaliados face a um determinado nível de severidade da acção sísmica.

Quanto à *natureza das perdas*, dependendo dos autores, podem ser classificadas em tangíveis e intangíveis [Coburn *et al.*, 1994] ou em directas e indirectas [FEMA & NIBS, 1999].

Segundo a classificação de Coburn *et al.* [1994] as *perdas tangíveis* são aquelas cujos efeitos podem ser quantificados em termos de valores económicos, enquanto que as *intangíveis* são dificilmente convertíveis em valores monetários equivalentes. Por exemplo, analisando as consequências de um sismo na população de um região, um possível indicador de perdas será o número de pessoas mortas, a perda tangível corresponderá ao valor da riqueza perdida em consequência da morte de indivíduos economicamente activos e as perdas intangíveis medem os efeitos psicológicos e sociais das mortes sobre a população sobrevivente.

As *perdas directas* são as que resultam directamente dos danos físicos causados por um sismo, constituindo apenas uma pequena parte das perdas económicas totais causadas por este tipo de fenómeno [McGuire, 2004]. As *perdas indirectas* surgem em sectores que não experimentaram danos físicos directos, mas que dependem de outros sectores que sofreram rotura de operações em consequência dos danos directos causados pelo sismo. As perdas económicas indirectas poderão surgir a médio e longo prazo, sendo exemplificadas por reduções no investimento, reduções nas exportações, por perdas de postos de trabalho, redução da procura turística, etc. [Davidson, 1997].

Outro tipo de classificação de perdas categoriza, por um lado, as que resultam das *formas primárias de perigo* sísmico, tais como as vibrações e a rotura da falha à superfície<sup>2</sup> e, por outro, as que resultam dos *perigos e efeitos colaterais ou induzidos*. São exemplo de perigos e efeitos colaterais os deslizamentos de terreno, a liquefacção, os tsunamis, os fenómenos do tipo seiche, os incêndios pós-sismo, as inundações causadas por tsunamis, seiches, ou rotura de barragens, a libertação de materiais perigosos e a produção de grandes quantidades de destroços.

A *vulnerabilidade* e a *fragilidade sísmicas* traduzem uma característica intrínseca do sistema construído que é a sua susceptibilidade para sofrer danos ou perdas em consequência da acção de um sismo de dada severidade. Importa desde já distinguir estes dois conceitos; assim, uma *curva de fragilidade sísmica* fornece a probabilidade condicional de um determinado nível de dano ou perda ser igualado ou excedido, para uma dada severidade da

---

<sup>2</sup> De acordo com Coelho [2005a] ocorre rotura da falha à superfície se o movimento da falha cortar toda a espessura da crosta sismogénica causando um deslocamento permanente à superfície. É um tipo de perigo muito menos frequente que o movimento vibratório do solo. Este está sempre associado a qualquer sismo, com maior ou menor intensidade, enquanto que, normalmente, a rotura de uma falha à superfície apenas ocorre em sismos de magnitude elevada.

acção sísmica, enquanto que uma *curva de vulnerabilidade sísmica* é definida pelos valores esperados da variável dano ou perda em função da severidade da acção sísmica [Chen & Scawthorn, 2003]. As curvas de fragilidade e vulnerabilidade são normalmente específicas de uma determinada tipologia construtiva. Este tema será abordado com maior detalhe na secção 2.4.2. Como se verá no capítulo 5 a vulnerabilidade e a fragilidade sísmica dependem de muitos factores, sendo exemplo de *factores de vulnerabilidade* de um sistema construído o seu dimensionamento sismo-resistente e o seu processo construtivo.

A análise da *perigosidade sísmica* consiste na avaliação, para um dado local e período de tempo de exposição, da probabilidade de excedência de um determinado nível da acção sísmica, traduzido geralmente por variáveis que medem o movimento do solo (intensidade macrossísmica, aceleração máxima do solo, etc.), ou a resposta estrutural dos edifícios (espectro de resposta, etc.). Em muitas aplicações a perigosidade sísmica é quantificada, de forma aproximada, não pela probabilidade, mas pela frequência (ou número de eventos por unidade de tempo) com que se espera que valores seleccionados do movimento do solo sejam excedidos [McGuire, 2004].

O *risco sísmico específico* exprime-se pela convolução das distribuições de probabilidade da perigosidade e da vulnerabilidade sísmicas. Nesta situação, o que distingue a vulnerabilidade sísmica do risco sísmico específico é que a primeira é avaliada pelo grau de dano ou perda resultante de um dado nível da acção sísmica, enquanto que o risco específico integra os danos ou perdas esperadas para todos os níveis da acção sísmica, tendo em consideração a respectiva probabilidade de ocorrência, ou seja, a perigosidade sísmica [Coburn *et al.*, 1994].

O *risco sísmico* ou o *risco sísmico absoluto* exprime a probabilidade de ocorrência ou excedência de um determinado valor absoluto de danos ou perdas que um dado elemento em risco sofrerá, como resultado de sismos futuros. O risco sísmico absoluto depende do risco sísmico específico, do valor dos elementos em risco na região e do período de tempo de exposição especificado.

Os valores esperados das perdas económicas e humanas (mortos feridos e desalojados) para um intervalo de tempo de exposição e região sísmica são exemplos de *indicadores de risco sísmico* absoluto correntemente utilizados. Os indicadores de risco sísmico específico resultam da normalização dos indicadores de risco absoluto pelo valor total dos elementos em risco.

Para terminar explicita-se o significado dos termos risco sísmico em sentido estrito e em sentido lato, que já foram empregues neste trabalho. Quando se fala de risco sísmico em sentido estrito dever-se-á estabelecer o paralelo com o conceito formalizado nesta secção, enquanto que o termo risco sísmico em sentido lato abrange todos os procedimentos enquadráveis num processo mais geral de mitigação, nomeadamente abordagens determinísticas, ou avaliações parcelares de algum dos factores que compõem o risco.

## 2.3. Perigosidade sísmica

### 2.3.1. Modelação probabilística da perigosidade sísmica

O modelo matemático desenvolvido por Cornell [Cornell, 1968 e 1971], para o cálculo da perigosidade sísmica baseia-se no *teorema da probabilidade total*:

$$P(A) = \int_{\mathbf{X}} P(A | \mathbf{x}) f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2.2)$$

em que  $A$  é o acontecimento cuja probabilidade se pretende calcular e  $\mathbf{X}$  é um vector de variáveis aleatórias contínuas das quais  $A$  depende. Por outras palavras, a probabilidade,  $P(A)$ , do acontecimento  $A$  ocorrer, pode ser calculada multiplicando a probabilidade condicional de  $A$ , dado um valor,  $\mathbf{x}$ , de  $\mathbf{X}$ , pela função densidade de probabilidade conjunta das variáveis do vector  $\mathbf{X}$  e integrando para todos os valores possíveis de  $\mathbf{X}$ , para os quais  $A$  ocorre.

No caso particular do cálculo da perigosidade sísmica, o acontecimento  $A$  representa o facto da intensidade de um efeito qualquer do sismo, designada por  $H$ , exceder um dado nível de intensidade  $h$ , pelo menos uma vez, num dado local, durante um sismo, ou seja,  $A \equiv H > h$ , e a integração é feita para todos os valores de  $\mathbf{X}$  para os quais a intensidade  $H$  excede  $h$ .

Os efeitos dos sismos,  $H$ , avaliados em estudos de perigosidade sísmica poderão ser o pico da aceleração do movimento do solo no local, o nível de intensidade macrossísmica, a duração do movimento vibratório, ou o deslocamento causado pela rotura de uma falha à superfície, ou mesmo um espectro dos movimentos sísmicos à superfície.

Considere-se o caso em que  $H$  representa a intensidade do movimento vibratório, que geralmente constitui o perigo sísmico causador de maiores danos. As variáveis aleatórias do vector  $\mathbf{X}$ , do qual  $H$  depende, são aquelas que caracterizam o sismo, desde a sua origem até ao local em estudo, bem como a sua interacção com o local em estudo, ou seja, o vector  $\mathbf{X}$  inclui todas as variáveis explicativas contabilizadas num modelo geral de atenuação do movimento sísmico.

Um modelo de atenuação pretende traduzir os processos físicos relacionados com a variação da intensidade do movimento do solo, nomeadamente o seu crescimento derivado do aumento da energia libertada na fonte (magnitude do sismo), ou a sua diminuição resultante do aumento da distância ao epicentro, uma vez que as ondas sísmicas são atenuadas no meio em que se propagam. Um modelo de atenuação exprime-se genericamente, por:

$$H \equiv H(M, R, \epsilon, \mathbf{W})_k = H_e(M, R, \mathbf{W})_k + \epsilon \quad (2.3)$$

em que,

$k$  é o índice que designa arbitrariamente uma dada zona de geração para a qual a lei de atenuação é válida;

$H$  é a intensidade do movimento do solo que se pretende prever;

$H_e(M, R, \mathbf{W})_k$  é o valor médio fornecido pelo modelo matemático;

$M$  é a variável aleatória que descreve a grandeza do sismo que pode ser a magnitude ou a intensidade epicentral;

$R$  é a distância entre a fonte e o local em análise;

$\mathbf{W}$  é um vector de variáveis que podem caracterizar a fonte, a propagação das ondas no meio, ou mais usualmente as condições do local onde a intensidade é medida;

$\varepsilon$  é uma variável aleatória que representa as flutuações em  $H$  não explicadas pelas variáveis do modelo, bem como os erros de medição da variável dependente.

Admite-se que os vários valores de  $\varepsilon$  se distribuem independentemente uns dos outros, são independentes das variáveis explicativas do modelo e seguem uma distribuição normal de média nula e variância constante,  $\varepsilon \sim N(0, \sigma_k^2)$ . Desta forma assume-se que a distribuição da variável  $H$  em torno do valor central,  $H_e(M, R, \mathbf{W})_k$ , é Gaussiana e independente da grandeza do sismo e da distância do seu hipocentro ao local analisado.

Resta definir *zonas de geração sísmica*, também designadas neste trabalho por *zonas* ou *fontes de sismogénese*, como regiões da crosta terrestre que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas. Neste contexto, uma zona de geração sísmica delimita regiões cujos processos de ocorrência dos sismos se regem pelas mesmas distribuições de probabilidade.

Considere-se que os acontecimentos capazes de afectar o local em análise ocorrem numa região sísmica constituída por  $N_Z$  zonas de geração.

Considere-se ainda, que um sismo, com origem numa dada zona  $k$ , é capaz de causar o efeito genérico traduzido pela intensidade  $H$ , num dado local; então o teorema da probabilidade total permite calcular a probabilidade de excedência do nível  $h$  de intensidade nesse local, sendo válido para uma determinada fonte  $k$ :

$$P(H > h)_k = \int_{\mathbf{X}} P(H > h | \mathbf{x})_k f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})_k d\mathbf{x} \quad (2.4)$$

Se a escolha das variáveis aleatórias contidas no vector  $\mathbf{X}$ , recair, exclusivamente, sobre a magnitude  $M$  e a distância hipocentral  $R$ , e assumindo-se que essas duas variáveis são estatisticamente independentes, a equação anterior reduz-se a:

$$P(H > h)_k = \int_{RM} \int P(H > h | m, r)_k f_M(m)_k f_R(r)_k dm dr \quad (2.5)$$

Para se calcular a taxa média de ocorrência de sismos na zona de geração  $k$ ,  $(\lambda_H > h)_k$ , que originam no local intensidades superiores a um determinado nível de referência  $h$ , bastará

multiplicar a probabilidade dada pela expressão anterior por  $v_k$ , que representa o número médio de ocorrências, na unidade de tempo, nessa zona geração sísmica, ou seja:

$$(\lambda_{H>h})_k = v_k \cdot P(H > h)_k = v_k \cdot \int_{RM} \int P(H > h|m, r)_k f_M(m)_k f_R(r)_k dm dr \quad (2.6)$$

sendo esta a expressão mais corrente utilizada nos estudos de avaliação probabilística da perigosidade sísmica.

Nestas expressões, a probabilidade condicional dada por  $P(H > h|m, r)_k$  para cada zona de geração sísmica, depende, exclusivamente, dos diferentes tipos de leis de atenuação das intensidades dos movimentos sísmicos e das incertezas a elas associadas (expressão 2.3).

A função  $f_R(r)_k$  é a função densidade de probabilidade da distância hipocentral obtida a partir da distribuição espacial dos epicentros da zona  $k$  e da relação desta zona com o local em análise. Esta função densidade de probabilidade reflecte as incertezas relativas à localização dos epicentros na zona sendo muitas vezes assumida uniforme no interior das zonas de geração.

A função densidade de probabilidade  $f_M(m)_k$ , ou a distribuição da magnitude dos sismos, é deduzida a partir das relações de frequência-magnitude, determinadas para cada zona de geração a partir das respectivas leis de Gutenberg-Richter [Richter, 1958]. A lei de Gutenberg-Richter estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes, para uma dada zona  $k$ , que se presume homogénea em termos de sismicidade:

$$\log N(m)_k = a_k - b_k \cdot m \quad (2.7)$$

em que,

$N(m)_k$  é o número de sismos com magnitude maior ou igual a  $m$  que ocorre na região analisada, para um dado período de observação;

$a_k$  é a actividade sísmica da zona de geração  $k$ , que se relaciona com a taxa de ocorrência total dessa zona, no período de observação considerado, ou seja, com  $10^{a_k}$  ;

$b_k$  é um coeficiente que descreve a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e menor magnitude na zona  $k$ .

Assumindo que a grandeza de eventos sucessivos de uma dada zona de geração são independentes, que os sismos com magnitude inferior a um determinado valor  $m_{min}_k$ , que ocorrem na zona de geração  $k$  não causam estragos do ponto de vista da engenharia e que em cada zona existe um valor de magnitude  $m_{max}_k$  que não pode ser ultrapassado, então a função densidade de probabilidade da magnitude para essa zona,  $f_M(m)_k$ , que se adequa à lei de Gutenberg-Richter, truncada inferior e superiormente, escreve-se [Araya & Der Kiureghian, 1988]:

$$f_M(m)_k = \frac{\beta_k e^{-\beta_k(m-mmin_k)}}{1 - e^{-\beta_k(mmax_k - mmin_k)}}, \quad mmin_k \leq m \leq mmax_k \quad (2.8)$$

sendo  $\beta_k = \ln(10) \cdot b_k$ .

Foram assim explicitados todos os factores que constituem o integrando da expressão 2.6. Saliente-se que nesta equação, embora o problema de avaliação da perigosidade sísmica tenha sido descrito por três variáveis aleatórias,  $M$ ,  $R$  e  $\epsilon$ , a última delas, a aleatoriedade do movimento do solo já tinha sido integrada. É conveniente, pela utilidade que será revelada na secção 2.3.3, rescrever a equação 2.6 de acordo com outra notação, mais genérica, em que as funções de densidade de probabilidade de todas as variáveis aleatórias são explicitadas [Bazzurro & Cornell, 1999 e McGuire, 1995]:

$$(\lambda_{H>h})_k = \nu_k \cdot \int \int \int \mathcal{H}[H(M, R, \epsilon)_k - h] f_M(m)_k f_R(r)_k f_\epsilon(\epsilon)_k dm dr d\epsilon \quad (2.9)$$

em que  $\mathcal{H}[H(M, R, \epsilon)_k - h]$  é a função de Heaviside que assume o valor nulo se  $H(M, R, \epsilon)_k$  for inferior a  $h$  e igual à unidade no caso contrário.

Nesta nova notação a função cumulativa de distribuição condicional  $P(H > h | m, r)_k$  foi substituída por:

$$P(H > h | m, r)_k = \int_{\epsilon} \mathcal{H}[H(M, R, \epsilon)_k - h] f_\epsilon(\epsilon)_k d\epsilon \quad (2.10)$$

A partir da expressão 2.9 conhece-se a taxa média de ocorrência de sismos na zona de geração  $k$ ,  $(\lambda_{H>h})_k$ , que originam no local intensidades superiores a um determinado nível de referência  $h$ , pelo que resta efectuar o cálculo da distribuição de probabilidade do evento  $A \equiv H > h$ , para um dado período de tempo, compatível com a taxa de excedência,  $\lambda_{H>h}$ , de toda a região sísmica<sup>3</sup>.

O cálculo dessa distribuição de probabilidade envolve a modelação da ocorrência temporal do processo sísmico. Considera-se o fenómeno de ocorrência de sismos, como uma série de acontecimentos que ocorrem aleatoriamente ao longo do tempo e que fazem parte de um processo estocástico. Tal como as observações de um variável aleatória  $N$  são números,  $n_1, n_2, \dots$ , as realizações dum processo estocástico  $N(t)$  são funções do tempo,  $n_1(t), n_2(t), \dots$ , e representam o número aleatório de eventos sísmicos que ocorreram desde o instante  $t = 0$  [Benjamin & Cornell, 1970].

<sup>3</sup> Note-se que o cálculo da perigosidade sísmica poderia ficar pela avaliação da taxa de excedência em cada zona, não sendo necessário progredir para a modelação da distribuição de probabilidade dos eventos no tempo.

Entre os modelos estocásticos utilizados para modelar a ocorrência temporal dos sismos têm-se, por exemplo, os modelos de Poisson, de Poisson não homogêneos, e os do tipo Markoviano. O modelo de Poisson é o mais divulgado devido à simplicidade da sua formulação e aplicação, sendo uma aproximação razoável para a maioria dos estudos de perigosidade sísmica [Araya & Der Kiureghian, 1988].

Se, numa zona  $k$ , o processo estocástico de ocorrência de sismos,  $N(t)$ , for um processo de Poisson com uma taxa média de ocorrência igual a  $(\lambda_{H>h})_k$ , ao fixar-se um valor genérico,  $t$ , para o parâmetro tempo, o número de eventos ocorridos nessa zona até ao instante considerado,  $N_t = n$ , é uma simples variável aleatória discreta, cuja distribuição de probabilidades é a de Poisson com parâmetro  $(\lambda_{H>h})_k \cdot t$ :

$$P[N_t = n, (\lambda_{H>h})_k \cdot t] = \frac{e^{-(\lambda_{H>h})_k \cdot t} [(\lambda_{H>h})_k \cdot t]^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (2.11)$$

Neste caso o valor esperado,  $E(N_t)$ , do número de ocorrências no intervalo de tempo  $t$  e a sua variância,  $\sigma_{N_t}^2$ , são ambos iguais a  $(\lambda_{H>h})_k \cdot t$ .

Para que o processo sísmico de ocorrências seja um processo de Poisson, além do número de ocorrências,  $N_t$ , em cada intervalo  $t$ , seguir a distribuição de Poisson, é necessário que o mecanismo físico de geração de ocorrências satisfaça os pressupostos de estacionariedade, não multiplicidade e independência ou ausência de memória [Benjamin & Cornell, 1970 e Lapin, 1973].

Recorrendo às propriedades do processo de Poisson atrás enunciadas, é possível demonstrar que os intervalos de tempo entre ocorrências sucessivas do mesmo processo são independentes e que se distribuem exponencialmente, com função cumulativa de distribuição:

$$P_T(T \leq t) = 1 - e^{-(\lambda_{H>h})_k \cdot t} \quad t \geq 0 \quad (2.12)$$

em que  $T$  é a variável aleatória que descreve o intervalo de tempo até ocorrer o primeiro evento.

Note-se que  $e^{-(\lambda_{H>h})_k \cdot t}$  é a mesma probabilidade que seria dada pela distribuição de Poisson de não ocorrer nenhum sismo num intervalo de tempo de duração  $t$ , ou seja:

$$P_T(T > t) = P(N_t = 0) \quad (2.13)$$

Desta forma, o modelo estocástico de ocorrência de sismos conduz a que a probabilidade de ocorrer, pelo menos uma vez, um evento sísmico, capaz de gerar, no local em análise, intensidades  $H$  superiores a  $h$ , num intervalo de tempo unitário seja dada por:

$$P(H > h) = 1 - \exp \left[ \sum_{k=1}^{N_Z} (\lambda_{H>h})_k \right] \quad (2.14)$$

em que esta probabilidade de excedência na unidade de tempo é devida à ocorrência aleatória de sismos em qualquer das  $N_Z$  zonas de geração que contribuem para a sismicidade sentida no local e baseia-se na propriedade do processo de Poisson de não ser afectado pela agregação de  $N_Z$  processos de Poisson independentes [Hillier & Lieberman, 1990]. Deste modo, supondo que o processo de ocorrências no tempo é independente de zona para zona, isto é, o facto de ter ocorrido um sismo numa determinada zona de geração  $k$  não condiciona o processo de ocorrências em qualquer outra zona de geração, justifica-se a operação de adição das taxas de ocorrência de cada zona para se obter a taxa de ocorrência de um processo geral de Poisson do acontecimento  $H > h$ .

Se não for elevado o número esperado de sismos por unidade de tempo, capazes de causar no local, pelo menos uma vez, intensidades superiores ou iguais a um determinado nível de referência  $h$ , então esse número é uma boa aproximação<sup>4</sup>, conservadora, para a perigosidade associada à intensidade de referência, ou seja:

$$P(H > h) \cong \sum_{i=1}^{N_Z} (\lambda_{H>h})_k = \lambda_{H>h} \quad (2.15)$$

A quantificação da perigosidade pela frequência de excedência, apesar de aproximada, tem algumas vantagens, nomeadamente o facto da frequência de fontes múltiplas ser aditiva e o facto da frequência de excedência poder ser comparada com a de outros perigos, sendo imediata a conversão para um período de tempo de exposição comum. Nesta aproximação, uma curva de perigosidade exprime-se pela frequência de excedência em função da amplitude de um determinado perigo sísmico, por exemplo o movimento vibratório do solo [McGuire, 2004].

Quando a unidade de tempo é o ano a expressão anterior fornece a probabilidade anual de excedência. A este propósito define-se *período de retorno*,  $RP_0$ , como sendo o inverso da probabilidade anual de ser excedido, pelo menos uma vez, no local em análise, um determinado nível de intensidade,  $h$ , o que matematicamente se traduz por:

$$RP_0 \equiv RP(h) = \frac{1}{P(H > h)} \cong \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_Z} (\lambda_{H>h})_k} \quad (2.16)$$

---

<sup>4</sup>Esta aproximação resulta do desenvolvimento em série de Taylor de  $e^{-x}$ , ou  $1 - e^{-x} = 1 - (1 - x + \frac{x^2}{2!} - \dots) \cong x$ , se  $x$  pequeno.

A transformação da distribuição de probabilidade anual  $P(H \leq h)$  na distribuição de probabilidade relativa a um intervalo de tempo de exposição de  $\tau$  anos,  $P_\tau(H \leq h)$ , é feita de acordo com a equação seguinte [Oliveira, 1977], assumindo que as excedências do movimento do solo em anos sucessivos são independentes [McGuire, 2004]:

$$P_\tau(H \leq h) = [1 - P(H > h)]^\tau = \left(1 - \frac{1}{RP_0}\right)^\tau \quad (2.17)$$

Esta expressão também permite obter, de uma forma expedita, a probabilidade, para um determinado período de tempo de exposição  $\tau$  (ou período de vida), em função do período de retorno e vice-versa. Por exemplo, para assegurar uma probabilidade de excedência de 10%, durante um período de vida  $\tau = 10$  anos, é necessário considerar a acção sísmica com intensidade correspondente ao período de retorno de cerca de 95 anos. Assegurando a mesma probabilidade de excedência de 10%, mas alterando o intervalo de tempo de exposição  $\tau$  para 50 anos, é necessário considerar a acção sísmica com intensidade correspondente ao período de retorno de cerca de 475 anos. Alterando agora a probabilidade de excedência para 5% e mantendo o período de vida  $\tau$  em 50 anos, é necessário considerar a acção sísmica com intensidade correspondente ao período de retorno de cerca 975 anos. Os períodos de retorno exemplificados de 95, 475 e 975 serão utilizados ao longo de presente trabalho para ilustrar algumas das suas aplicações, sendo a sua escolha justificada na secção 3.4.

### 2.3.2. Cenários sísmicos

Nesta secção discutem-se as vantagens e as desvantagens de se caracterizar a acção sísmica recorrendo a abordagens probabilísticas ou a cenários de ocorrência seleccionados, *a priori*, de forma determinística analisando-se as consequências de uma ou outra opção sobre a modelação das perdas em consequência de sismos.

Para o efeito, começa por se distinguir os cenários sísmicos que caracterizam a acção sísmica num território, aqui denominados de *cenários de ocorrência*, daqueles que descrevem o impacto dos sismos nesse território, ou seja, os que descrevem os efeitos da acção sísmica e as perdas subsequentes, aqui designados de *cenários de risco sísmico* ou de *perdas*.

Uma das vantagens de se utilizar a análise probabilística da perigosidade sísmica para caracterizar a acção sísmica num local, é que esta fornece uma descrição compacta e envolvente de todas as possíveis contribuições da sismicidade para esse local. Com efeito, a análise probabilística da perigosidade sísmica integra os efeitos potenciais de todas as fontes sísmicas para estimar a taxa média de excedência de um determinado nível da acção sísmica no local em estudo [McGuire, 1995].

No entanto, dada a natureza integradora desta análise, deixa de ser possível caracterizar, com base num único evento, a ameaça sísmica para o local [Bazzurro & Cornell, 1999; Chapman, 1995 e McGuire, 1995], existindo diversas áreas de actuação em que continua a ser imprescindível modelar a acção e as perdas a partir de cenários postulados à partida.

A modelação de perdas a partir de cenários de ocorrência determinísticos constitui uma via possível para contornar dificuldades que surgem, nomeadamente na avaliação da distribuição de perdas acumuladas numa região, ou no dimensionamento de recursos a afectar a um sistema de gestão de emergência, etc., mas peca pela inexistência de um critério objectivo para a selecção do cenário.

Por exemplo, quando se pretende dimensionar os recursos a afectar a um sistema de gestão da emergência, é tradicional escolher o *sismo máximo credível*<sup>5</sup>, ou escolher o evento catastrófico mais severo que ocorreu na história sísmica da região, a partir do qual se simula o cenário de perdas. Contudo, é difícil garantir que os eventos históricos catalogados incluam o sismo máximo que cada zona tem o potencial de gerar e que afecta o local em análise. Por outro lado, a caracterização de um cenário sísmico por um evento de grande magnitude, mas com frequência de ocorrência reduzida, poderá apontar para um dimensionamento de recursos inoportável. Em contrapartida, se as operações de emergência forem dimensionadas para um cenário com frequência de ocorrência elevada poderá conduzir a uma sub-estimativa dos recursos necessários para eventos menos frequentes.

Acresce que a escolha de um único cenário de ocorrência não trata o problema na perspectiva de especificar níveis de risco aceitáveis e assegurar, como seria desejável, uma protecção sísmica uniforme para todos os cidadãos. Já a via probabilística tornaria exequível o critério do risco uniforme.

Dificuldades deste tipo também surgem quando se pretende estimar as *perdas máximas prováveis (PML)* ou *valores de acumulação de risco* para uma carteira de seguros de uma dada região, ou sintetizar sismogramas para serem utilizados nos processos de dimensionamento ou de verificação de segurança de estruturas.

Neste trabalho propõe-se uma abordagem possível à resolução do problema de selecção do cenário de ocorrência, que passa pela sua identificação com base na desagregação da perigosidade sísmica (secção 2.3.3), passando os cenários de ocorrência assim identificados a ser apelidados de *cenários de perigosidade sísmica*. Este procedimento constitui um compromisso entre a opção por cenários de ocorrência seleccionados *a priori*, de forma determinística, e a opção pela caracterização da acção com base nos resultados da análise probabilística da perigosidade sísmica.

---

<sup>5</sup> O *sismo máximo credível* constitui uma idealização do sismo máximo que uma falha pode fisicamente gerar, assumindo-se que a rotura se produz, em todo o comprimento da falha, num só evento. Na realidade este comprimento resulta da acumulação de inúmeras roturas ao longo de toda a história da falha [Coelho, 2005a].

### 2.3.3. Desagregação da perigosidade sísmica

Nas últimas décadas têm surgido diversos métodos para contornar os problemas mencionados na secção 2.3.2 como os que estimam os valores esperados da magnitude e distância focal [Campos Costa, 1993; Campos Costa *et al.*, 1992; Ishikawa & Kameda; 1988 e McGuire & Shedlock, 1981], ou a técnica da desagregação da perigosidade sísmica em função das variáveis aleatórias envolvidas.

Em 1995, McGuire aborda a *desagregação da perigosidade sísmica* como o elemento de ligação entre a análise probabilística da perigosidade sísmica e uma representação simples da ameaça sísmica por um ou mais eventos, caracterizados por um conjunto de variáveis, capazes de reproduzir no local o movimento sísmico resultante dessa ameaça.

A desagregação da perigosidade sísmica é o procedimento em que se examinam as contribuições relativas para um dado nível de perigosidade das diferentes variáveis aleatórias envolvidas no processo, ou seja, como o próprio nome indica, este procedimento permite analisar a perigosidade sísmica de forma desagregada. Para as condições específicas de um dado local, a magnitude e a distância à fonte de um evento sísmico são algumas das variáveis principais envolvidas no processo e que permitem caracterizar o movimento do solo nesse local [Chapman, 1995].

Apesar deste tipo de análise ser recente tem vindo a ser largamente discutida e aplicada, nomeadamente por Bazzurro, 1998, Bazzurro & Cornell [1999], Campos Costa *et al.* [2002], Carvalho *et al.* [2001a], Chapman [1995], Cramer & Petersen [1996], Frankel *et al.* [1996], Frankel *et al.* [2000], Harmsen & Frankel [2001], Harmsen *et al.* [1999], McGuire [1995], Montilla [2000], Montilla *et al.* [2002], Sousa & Carvalho [2001] e Sousa *et al.* [2001]. Também alguns livros especializados [Kramer, 1996 e Pinto *et al.*, 2004] já abordam esta temática, embora de forma breve.

Este procedimento foi também recomendado pela SSHAC [1997] como uma oportunidade para a melhor compreensão dos resultados da perigosidade sísmica, nomeadamente das fontes que a dominam num determinado local.

Esta técnica tem vindo principalmente a ser explorada para a identificação do designado *sismo de controlo* [Montilla *et al.*, 2002 citando Bernreuter, 1992], ou *sismo de dimensionamento* [McGuire, 1995], ou *evento modal* [Chapman, 1995] ou *evento dominante* [Bazzurro & Cornell, 1999] ou *cenário sísmico* [Pinto *et al.*, 2004] (lista de designações adaptada de Montilla *et al.* [2002]). A partir deste evento é possível, por exemplo, estimar a duração do movimento sísmico, gerar séries temporais e espectros compatíveis com o nível de perigosidade do local, estabelecer cenários para o planeamento de emergência, ou estimar perdas em consequência de sismos.

A desagregação da perigosidade sísmica é, portanto, uma via para ultrapassar a arbitrariedade da escolha de cenários de ocorrência, caracterizando-os pelo conjunto de

variáveis atrás referidas, de forma consistente com o nível de perigosidade especificado para o local.

É neste último contexto que a desagregação da perigosidade sísmica surge no presente trabalho, em que critérios de base probabilística são aplicados na identificação de um, ou mais, cenários de perigosidade sísmica. Estes cenários são condicionados pela excedência de um nível  $h$  do movimento do solo, podendo esse nível, por sua vez, ser associado a uma certa probabilidade de excedência, especificada à partida, passando o cenário de perigosidade sísmica a ser representativo dessa probabilidade, ou período de retorno.

A definição de cenários de perigosidade sísmica é efectuada pela sua magnitude  $M_{cen}$ , pela sua distância relativamente ao local em análise,  $R_{cen}$ , ou, em alternativa, pelas coordenadas geográficas do seu epicentro  $(X, Y)_{cen}$ , e pelo desvio,  $\epsilon_{cen}$ , a adicionar ao valor mediano do modelo de atenuação para previsão do movimento do solo no local.

O procedimento que conduz à identificação dos cenários de perigosidade sísmica confere-lhes a particularidade de, quando substituídos na lei de atenuação respectiva, reproduzirem, por excesso, dentro de uma aproximação bastante razoável, o nível de perigosidade sísmica no local em análise (ver capítulo 3), daí estes cenários de ocorrência específicos serem designados de eventos dominantes, ou seja, são os eventos que controlam a perigosidade num dado local. Os cenários de perigosidade sísmica serão utilizados na subsequente selecção de cenários de risco sísmico para a avaliação do risco sísmico acumulado em algumas regiões de Portugal Continental (ver capítulo 7).

Para formalizar matematicamente a análise de desagregação recorre-se às expressões 2.9 e 2.15, exprimindo a perigosidade sísmica em função da taxa anual de excedência do acontecimento  $H > h$ :

$$\lambda_{H>h} = \sum_k v_k \cdot \int \int \int \mathcal{H}[H(M, R, \epsilon)_k - h] f_M(m)_k f_R(r)_k f_\epsilon(\epsilon)_k d\epsilon dr dm \quad (2.18)$$

Tal análise de desagregação é concretizada pela função densidade de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias envolvidas na análise de perigosidade sísmica, condicional à excedência de um nível de intensidade  $h$  no local, ou seja, por  $f_{M,R,\epsilon}(m, r, \epsilon | H > h)$ . Segundo Bazzurro & Cornell [1999], esta função densidade de probabilidade obtém-se somando as taxas médias de ocorrência  $v_k$ , de cada zona de geração  $k$ , ponderadas pelo integrando da expressão 2.18 e normalizando o somatório pela taxa anual de excedência,  $\lambda_{H > h}$ :

$$f_{M,R,\epsilon}(m, r, \epsilon | H > h) = \frac{\sum_k v_k \cdot \mathcal{H}[H(M, R, \epsilon)_k - h] f_M(m)_k f_R(r)_k f_\epsilon(\epsilon)_k}{\lambda_{H>h}} \quad (2.19)$$

Na prática, a desagregação da perigosidade, resultante da combinação de  $N_Z$  zonas de geração, é obtida durante a integração numérica da expressão 2.18, acumulando, em cada

célula tridimensional, a contribuição para a taxa anual de excedência  $\lambda_{H > h}$  e normalizando, no final, o valor acumulado pela frequência anual de excedência total no local [Bazzurro & Cornell, 1999]. Obtém-se assim a função densidade de probabilidade conjunta atrás mencionada, condicional à excedência do nível do movimento  $h$  no local.

Objectivamente, no processo de desagregação separam-se as contribuições para a taxa de excedência total em células elementares do espaço das variáveis aleatórias nele envolvidas. Na formulação especificada, as dimensões de base dessas células, são a magnitude, a distância e a aleatoriedade do movimento sísmico no local em análise.

Porém, a perigosidade sísmica pode ser desagregada em espaços de variáveis aleatórias com dimensões distintas. Por exemplo, as contribuições para a perigosidade podem ser acumuladas em células unidimensionais da variável aleatória magnitude, em células bidimensionais das variáveis  $M-R$ , ou em células tridimensionais das variáveis  $M-R-\epsilon$ . Bazzurro & Cornell [1999] designaram estas técnicas de desagregação 1D, 2D e 3D, respectivamente.

Formalmente, a desagregação nos espaços 1D e 2D obtém-se pela marginalização da distribuição conjunta condicional das três variáveis aleatórias mencionadas, expressa por 2.19. Por exemplo, as distribuições marginais de  $M$  e de  $\epsilon$ , condicionadas pela excedência de um nível de perigosidade  $h$ , são definidas, respectivamente, por:

$$f_M(m|H > h) = \int \int_{R \epsilon} f_{M,R,\epsilon}(m,r,\epsilon|H > h) d\epsilon dr \quad (2.20)$$

$$f_\epsilon(\epsilon|H > h) = \int \int_{M R} f_{M,R,\epsilon}(m,r,\epsilon|H > h) dr dm \quad (2.21)$$

e a distribuição conjunta marginal de  $M-R$ , condicionada pela excedência de um nível de perigosidade  $h$ , é definida por:

$$f_{M,R}(m,r|H > h) = \int_{\epsilon} f_{M,R,\epsilon}(m,r,\epsilon|H > h) d\epsilon \quad (2.22)$$

Bazzurro & Cornell [1999] aperfeiçoaram o procedimento da desagregação avaliando as contribuições relativas para a perigosidade não só em termos de  $M$  e  $\epsilon$ , como também em termos das variáveis *latitude* e *longitude*, por substituição da variável  $R$ . Propõem assim a chamada desagregação geográfica que resulta da generalização da variável aleatória,  $R$ , que representa a distância entre o local em análise e o centro da célula em que a taxa de ocorrência é acumulada, para uma variável aleatória vectorial,  $\mathbf{R} \equiv (X, Y)$ . Esta técnica permite efectuar a análise de desagregação sobre um mapa que inclui o local estudado, auxiliando, por exemplo, a determinação da localização de uma fonte mais provável que contribui para a perigosidade sísmica [Bazzurro & Cornell, 1999] (ver exemplo na figura 2.1).

Formalmente a distribuição conjunta marginal de  $(X, Y)$ , condicionada pela excedência de um nível de perigosidade, é definida por:

$$f_{X,Y}(x, y|H > h) = \int_M \int_{\mathcal{E}} f_{M,(X,Y),\mathcal{E}}(m, (x, y), \mathcal{E}|H > h) d\mathcal{E} dm \quad (2.23)$$

A conjugação da desagregação geográfica com as restantes variáveis aleatórias de base constitui uma análise a quatro dimensões denominada de desagregação 4D em  $M$ -( $X, Y$ )- $\mathcal{E}$ .

Os trabalhos Bazzurro & Cornell são obras de referência no tema da desagregação da perigosidade sísmica. Efectivamente, estes autores discutem de forma muito completa as diferentes técnicas de desagregação da perigosidade sísmica, abordando os diversos problemas envolvidos, como sejam a escolha de distribuições de massa de probabilidade ou de densidade de probabilidade, a escolha do tipo de variáveis aleatórias envolvidas, por exemplo  $R$  ou  $\ln(R)$ , a dimensão do espaço dessas variáveis, o tamanho das células utilizadas no cálculo e a análise das consequências destas opções nos resultados finais da desagregação.

Muitas vezes os resultados da desagregação são resumidos em medidas estatísticas de tendência central, como a moda ou o valor médio, visando a identificação de cenários ocorrência específicos para serem utilizados nas aplicações atrás mencionadas.

Bazzurro & Cornell [1999] também analisaram as vantagens e desvantagens de se definir o cenário recorrendo aos valores médios,  $E[M]$ ,  $E[R]$ ,  $E[\mathcal{E}]$ , ou aos valores modais  $\hat{M}$ ,  $\hat{R}$ ,  $\hat{\mathcal{E}}$  da distribuição de probabilidade conjunta que descreve a desagregação. Harmsen *et al.* [1999] sintetizaram a desagregação por ambas as medidas de tendência central, salientando que os resultados em termos de valores modais dependem da dimensão das células, enquanto que, em termos de valores médios, podem especificar um evento que não seja realizável fisicamente e que contribui de forma desprezável para a perigosidade. A comparação entre valores médios e modais é uma maneira simples e rápida de determinar quando é que as fontes geradoras da perigosidade numa dada região são muitas e heterogéneas, pois nesse caso os valores médios e modais surgirão distintos [Montilla *et al.*, 2002].

Bazzurro & Cornell [1999] advogam a utilização da moda da distribuição conjunta para definir o evento dominante, pois esta medida representa o evento que mais provavelmente produzirá, no local em análise, a excedência do nível  $h$  do movimento do solo, associado à probabilidade especificada.

Estes autores salientam, porém, que a escolha de um único parâmetro estatístico para sintetizar a desagregação, pode constituir uma limitação em ambientes sismotectónicos complexos, em que mais do que uma fonte, com importância comparável, contribui para a perigosidade. Nesses casos, a distribuição de probabilidade será multi-modal, sendo recomendável que se considerem cenários de perigosidade sísmica múltiplos, bem como a estimativa da sua contribuição relativa.

Organizações, como a U. S. Geological Survey (USGS), apresentam, na sua página da *internet*, a possibilidade de efectuar a desagregação da perigosidade sísmica, de forma interactiva, para qualquer local dos EUA, diversos período de retorno e várias frequências do movimento.

As figuras 2.1 e 2.2 ilustram o tipo de resultado obtido na página de desagregação interactiva do USGS [USGS, 2005] reportando a um local com a latitude e longitude de Los Angeles, nos EUA, e ao nível de perigosidade correspondente à probabilidade excedência de 10% em 50 anos, para uma frequência do movimento de 1Hz. Esta representação, sendo efectuada em termos de uma função massa de probabilidade conjunta, depende das dimensões das células tridimensionais utilizadas, que consequentemente deverão ser reportadas, tendo no presente caso as dimensões de  $\Delta m = 0,2$ ,  $\Delta r = 10\text{km}$  e  $\Delta \epsilon = 1,0$ .

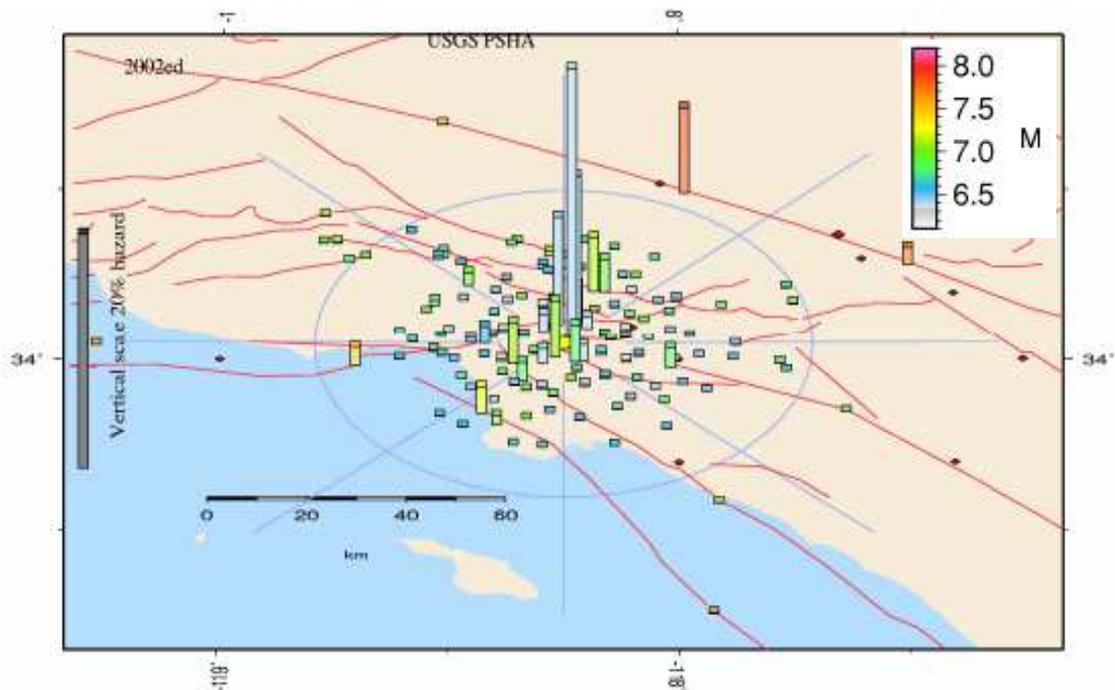


Figura 2.1 – Exemplo de desagregação geográfica obtido em USGS [2005].

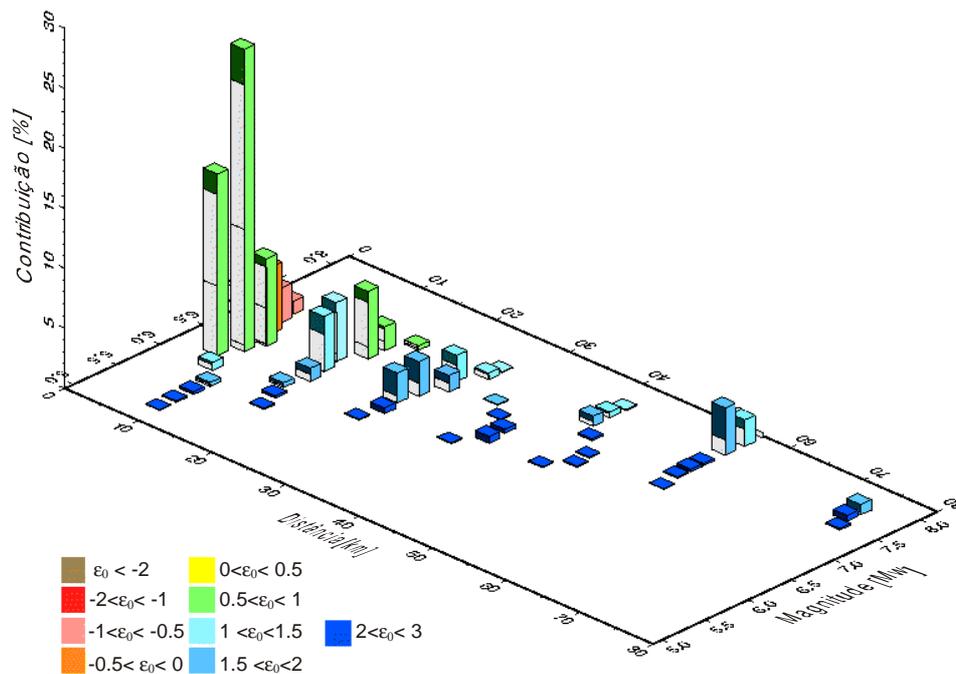


Figura 2.2 – Exemplo de desagregação 3D (M-R- $\epsilon$ ) obtido em USGS [2005].

## 2.4. Vulnerabilidade sísmica e danos de edifícios

### 2.4.1. Classificação dos métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica

A sistematização dos estudos de avaliação da vulnerabilidade sísmica tem vindo a ser efectuada de acordo com múltiplos autores e critérios, o que revela a existência de alguma arbitrariedade e dificuldade nestas classificações, nomeadamente sobreposições na definição de categorias e classificações não unívocas de métodos [Holmes, 1996].

Neste contexto, sobressaem na literatura da especialidade duas grandes categorias de métodos de avaliação de vulnerabilidade, embora com designações e âmbitos ligeiramente diferentes consoante os autores que os classificam:

1. Os métodos de *vulnerabilidade calculada* [Barbat & Pujades, 2004 e Caicedo *et al.*, 1994], também designados de métodos *analíticos* ou *teóricos* de avaliação da vulnerabilidade e danos [Caicedo *et al.*, 1994; Calvi *et al.*, 2005 e McGuire, 2004], de métodos *mecanicistas* [Dolce *et al.*, 1995 e Moroux *et al.*, 2004], e de métodos de *previsão ou indutivos* [Reitherman, 1985]. Quando aplicados a estruturas individuais estes métodos seguem procedimentos semelhantes aos da análise estrutural, envolvendo a caracterização do desempenho esperado das estruturas, tendo por vezes o objectivo de identificar as necessidades de intervenção que lhes confirmam a segurança estrutural necessária ao desempenho das suas funções [Coelho, 2003]. Quando a escala de aplicação é a regional torna-se inviável a inspecção individual de um elevado número de estruturas. Os desenvolvimentos recentes no domínio da avaliação da vulnerabilidade sísmica de grandes populações de estruturas contornam as dificuldades mencionadas recorrendo a modelos mecanicistas simplificados, essencialmente do tipo do *método do espectro de capacidade* [ATC, 1996, Bonett *et al.*, 2004; Candeias, 2000; Carvalho *et al.*, 2002a; Falcão & Bento, 2001; FEMA & NIBS, 1999 e Freeman, 1999], descrito adiante na secção 2.4.3.
2. Os métodos de vulnerabilidade *observada* ou *subjectivos* [Barbat & Pujades, 2004 e Caicedo *et al.*, 1994], baseados na inspecção de um grande número de estruturas, conduzindo ao desenvolvimento de estatísticas de natureza fundamentalmente empírica e/ou contando com a experiência e opinião de especialistas na matéria. Estes métodos, também designados de *métodos estatísticos* ou *empíricos* [Calvi *et al.*, 2005; Dolce *et al.*, 1995 e McGuire, 2004], são os mais divulgados em estudos de risco sísmico de larga escala, em que se pretende estimar os danos num elevado número de estruturas, devido à sua relativa facilidade de aplicação e baixo custo. São métodos particularmente adequados a estruturas não regulamentares, para as quais, ao contrário das projectadas, existe um grande volume de informação estatística, que correlaciona intensidades macrossísmicas com danos ocorridos em sismos do passado. Entre estes métodos têm-se:

- i. Os métodos baseados em *levantamentos de danos*, que organizam os elementos em risco em classes de vulnerabilidade. Para cada classe de vulnerabilidade elaboram-se matrizes de probabilidade de dano, curvas de fragilidade ou de vulnerabilidade sísmicas, a partir da inspecção ou descrição de danos em estruturas após um sismo, ou, na ausência de dados, com base na experiência e opiniões emitidas por painéis de especialistas, ou ainda com base na combinação das duas modalidades [ATC, 1985; Braga *et al.*, 1982; Carvalho *et al.*, 2001c; Chávez, *et al.*, 1999; Coburn & Spence, 2002; Di Pasquale & Orsini, 1997; Di Pasquale *et al.*, 1999; Lucantoni *et al.*, 2002; Sabetta *et al.*, 1999; Sandi, 1986; Solares, 2001; Tiedemann, 1992; Whitman, 1973 e Zuccaro & Papa, 2002].
- ii. Os métodos *indirectos* e de *indexação* que avaliam, numa primeira fase, a capacidade dos edifícios resistirem aos sismos e posteriormente a sua correlação com os danos. Entre os mais divulgados tem-se o *método do índice de vulnerabilidade* que teve a sua génese em Itália na sequência do sismo de Friuli de 1976, encontrando-se amplamente divulgado em Itália e em Espanha [Benedetti & Petrini, 1984 e GNDT, 1986, citados por Caicedo *et al.*, 1994; Calvi *et al.*, 2005; Moya *et al.*, 1996 e Barbat & Pujades, 2004]. O método incide maioritariamente sobre a avaliação da vulnerabilidade dos edifícios de alvenaria, a partir da informação resultante de inspecções das estruturas, com o recurso a fichas de inquérito normalizadas, que qualificam onze parâmetros responsáveis pela resposta sísmica dos edifícios (*e.g.* a organização do sistema resistente, o tipo de diafragmas horizontais, etc.). Assim, numa primeira etapa, a capacidade sísmica dos edifícios é quantificada por um índice de vulnerabilidade, medido numa escala contínua, que se obtém mediante a utilização de coeficientes de ponderação que reflectem a importância de cada um dos onze parâmetros no sistema resistente do edifício. Numa segunda etapa, o método utiliza funções de vulnerabilidade, parametrizadas para vários níveis de intensidade da acção sísmica, para relacionar o índice de vulnerabilidade com o grau de dano global que a estrutura tem susceptibilidade de sofrer [Barbat & Pujades, 2004 e Caicedo *et al.*, 1994].
- iii. As *abordagens híbridas*, de que é exemplo o método publicado por Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004] que combina as características dos métodos tipológicos com os de indexação<sup>6</sup>, recorrendo à classificação de vulnerabilidade da escala EMS-98 e a índices de vulnerabilidade que podem ser refinados com base em alguns factores capazes de modificar o comportamento sísmico dos edifícios.

Na figura 2.3 apresenta-se a classificação apresentada. O esforço subjacente a esta sistematização não se prende com uma tentativa de estabelecer um novo critério de

---

<sup>6</sup> No original: *typological-rating approach* [Giovinazzi & Lagomarsino, 2003].

classificação de metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica, mas antes com a necessidade de sistematizar as metodologias que serão utilizadas neste trabalho (assinaladas a negrito), e de referir e classificar outras metodologias de ampla divulgação neste domínio. No desenrolar do presente capítulo, e dos capítulos que se seguem, os modelos de danos assinalados a negrito serão designados simplesmente pelos nomes dos seus autores, omitindo-se as datas das respectivas referências.

A análise crítica destas metodologias é efectuada na última secção deste capítulo em que se tecem algumas considerações sobre as metodologias apresentadas, mas principalmente no capítulo 5 (secção 5.5) onde se examinam os aspectos operacionais da sua aplicação.

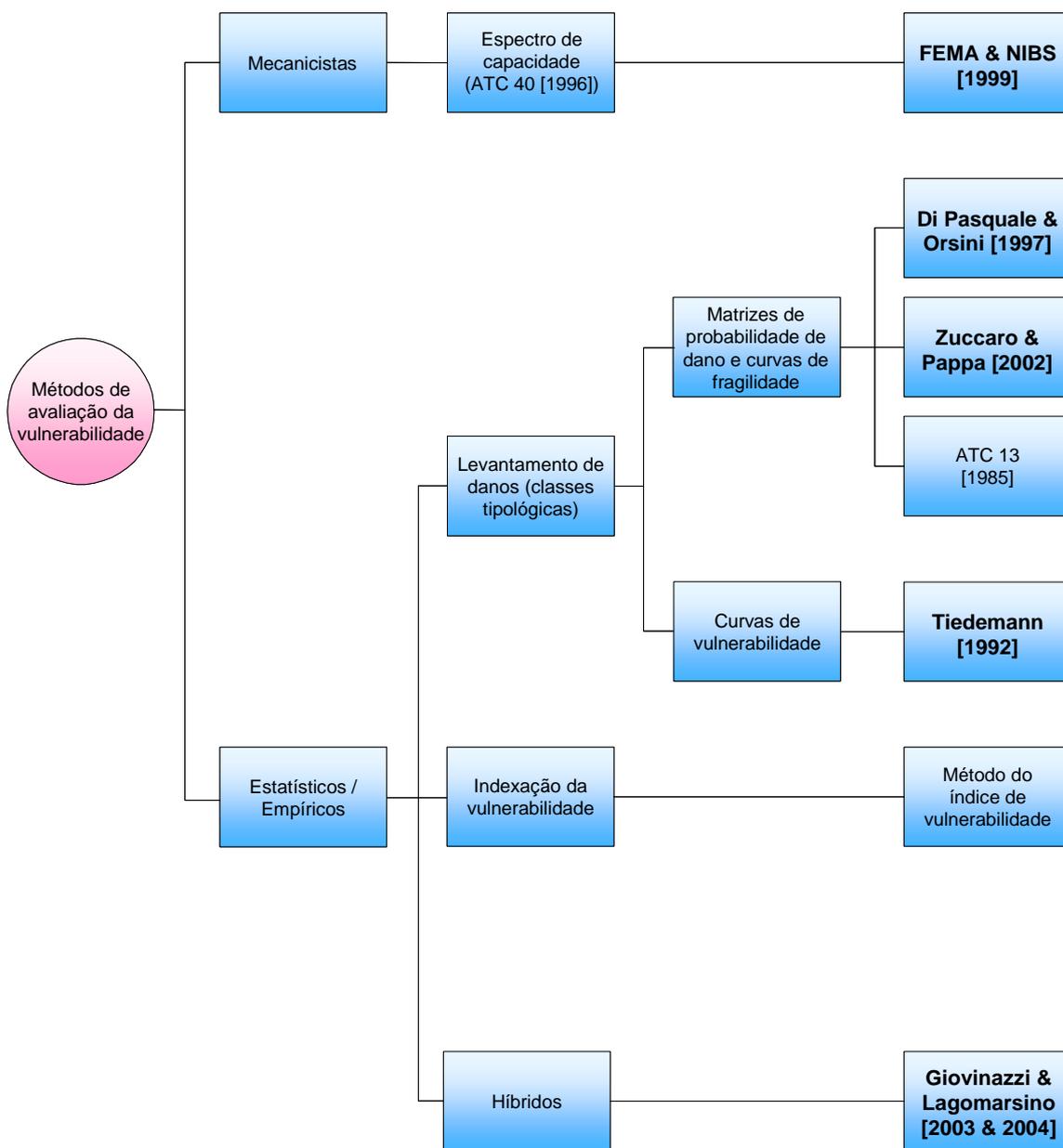


Figura 2.3 – Sistematização das metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica.

## 2.4.2. Definição de vulnerabilidade e fragilidade sísmicas

Nesta secção formaliza-se matematicamente os conceitos de vulnerabilidade e fragilidade sísmicas, de forma genérica e independente dos aspectos específicos das metodologias de avaliação de danos que se desenvolvem nas secções seguintes.

A fragilidade sísmica é uma forma de caracterizar a vulnerabilidade intrínseca de uma tipologia construtiva tendo em conta as incertezas que existem na sua avaliação, nomeadamente a que decorre da generalização do modelo de um edifício para uma tipologia construtiva, e as incertezas inerentes aos processos físicos relacionados com a capacidade resistente dos edifícios e estados de dano, dada a intensidade da acção sísmica. A descrição da fragilidade sísmica por meio de distribuições de probabilidade é a forma apropriada para incorporar as fontes de incerteza acima referidas na variabilidade total das avaliações de risco.

Retomando a definição de *fragilidade sísmica* constante da secção 2.2 para uma dada tipologia construtiva com vulnerabilidade  $V$ , foi referido que essa fragilidade, aqui designada de  $F_D(d, I)$ , traduz a probabilidade de um determinado nível de dano  $d$  ser atingido ou excedido, condicionada por um dado nível da acção sísmica, traduzido, por exemplo, por uma intensidade macrossísmica  $I$ . Nesta etapa, os níveis de dano exprimem-se numa escala discreta de 0 a  $N_D$  e as  $N_D+1$  curvas de fragilidade são descritas por:

$$F_D(d, I) = P_D(D \geq d | I), \quad \text{tal que } D \in \{0, 1, \dots, N_D\} \quad (2.24)$$

Os  $N_D+1$  estados de dano em que uma tipologia se pode encontrar, depois de experimentar um evento sísmico de intensidade  $I$ , são mutuamente exclusivos e colectivamente exaustivos [Chen & Scawthorn, 2003].

A função massa de probabilidade do dano  $D$ , condicionada pela intensidade  $I$ , e válida para uma dada tipologia construtiva com vulnerabilidade  $V$ , vem dada por [Chen & Scawthorn, 2003]:

$$P_D(D=d | I) = \begin{cases} 1 - F_D(d+1, I) & d = 0 \\ F_D(d, I) - F_D(d+1, I) & 1 \leq d < N_D \\ F_D(N_D, I) & d = N_D \end{cases} \quad (2.25)$$

Dependendo do tipo de método de avaliação da vulnerabilidade sísmica escolhido, os valores das probabilidades da expressão anterior são obtidos pelo processamento da informação sobre levantamentos de danos pós-sismo e/ou pelo recurso à opinião de especialistas, ou ainda como resultados de modelos analíticos de análise estrutural, etc.

Em estudos de risco sísmico a função massa de probabilidade indicada em 2.25 é usualmente descrita por uma *matriz de probabilidade de dano*,  $MPD$ , válida para uma tipologia construtiva de vulnerabilidade  $V$ :

$$MPD(d, I) = P_D(D=d|I) \quad (2.26)$$

O conceito de uma matriz de probabilidade de dano, proposto pela primeira vez por Whitman [1973], está associado à ideia de que os edifícios pertencentes a uma dada tipologia estrutural têm a mesma probabilidade de se encontrar num determinado estado de dano, face ao mesmo nível de acção sísmica [Calvi *et al.*, 2005].

As primeiras matrizes de probabilidade de dano construídas na Europa, devem-se a Braga *et al.*, [1982] e basearam-se nos levantamentos de dano em edifícios após o sismo de Irpinia de 1980 [Calvi *et al.*, 2005], em Itália.

A título de exemplo, ilustra-se no quadro 2.1 a matriz de probabilidade de dano construída por Solares [2001] para sintetizar os efeitos do sismo de 1755 sobre os edifícios correntes existentes em cerca de cinco centenas localidades de Espanha, conhecido o nível de intensidade macrossísmica nessas localidades.

Quadro 2.1 – Exemplo de matriz de probabilidade de dano [Solares, 2001].

Int.	Nível de dano									
	0	1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5
V	0,932	0,068	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
V-VI	0,712	0,169	0,093	0,026	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VI	0,598	0,061	0,183	0,073	0,073	0,0	0,012	0,0	0,0	0,0
VI-VII	0,220	0,011	0,044	0,110	0,176	0,330	0,098	0,011	0,0	0,0
VII	0,0	0,0	0,0	0,0	0,167	0,333	0,389	0,111	0,0	0,0
VII-VIII	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,062	0,125	0,250	0,375	0,188
VIII	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,167	0,0	0,167	0,666

Cada linha da matriz de probabilidade de dano representa a função massa de probabilidade dos danos, para uma dada tipologia de edifícios, condicionada por um nível de intensidade, de tal forma que:

$$\sum_d MPD(d, I) = 1 \quad (2.27)$$

A função de distribuição cumulativa, ou a função de fragilidade sísmica, obtém-se acumulando os valores da matriz de probabilidade de dano em cada linha de intensidade fixa.

Graficamente as matrizes de probabilidade de dano costumam ser ilustradas por gráficos de barra segundo as linhas ou as colunas da matriz de probabilidade de dano, ou seja, com os níveis de dano em abcissas, para uma dada intensidade macrossísmica, ou com as intensidades macrossísmicas em abcissas, para um nível de dano fixo (ver figura 2.4). Também as curvas

de fragilidade podem ser representadas em função do dano ou das intensidades, embora, neste caso, seja mais comum a acção sísmica surgir nas abcissas.

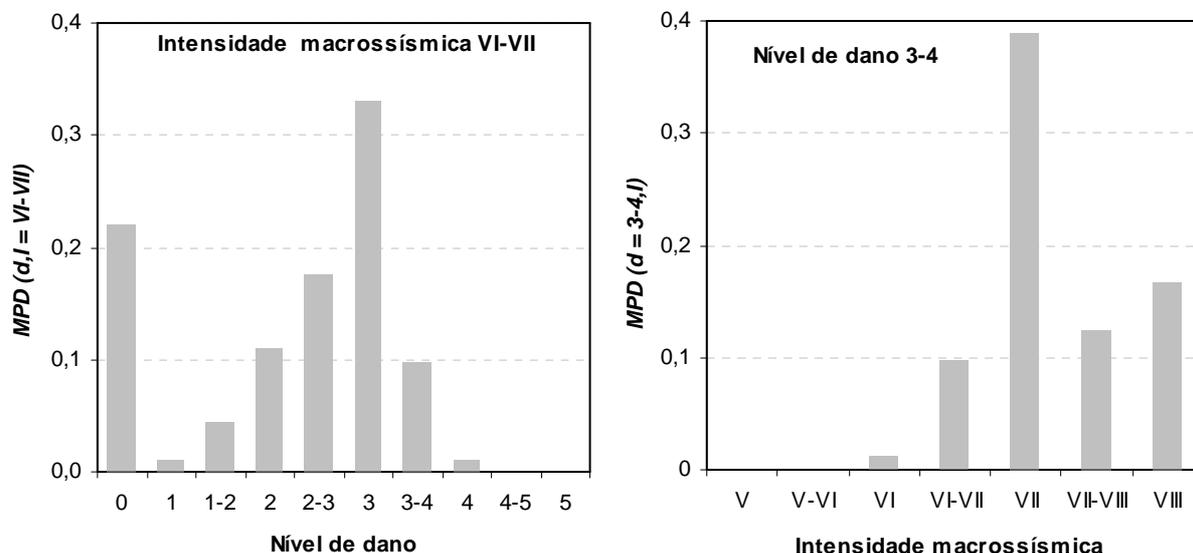


Figura 2.4 – Representação da matriz de probabilidade de dano de Solares [2001] para a intensidade VI-VII e para o nível de dano 3-4.

Em estudos de risco sísmico é procedimento corrente utilizar distribuições de probabilidade teóricas para descrever as estatísticas recolhidas em levantamentos de dano pós-sismo. Por exemplo, a distribuição binomial foi ajustada com sucesso aos dados coligidos após o sismo de 1980 em Irpinia, Itália [Braga *et al.*, 1982], sendo utilizada com frequência em estudos posteriores [Chávez *et al.*, 1999; Dolce, 1984 (citado por Sandi, 1999); Sabetta *et al.*, 1999, Sandi 1986 e Zuccaro & Papa, 2002]. Também a função de distribuição beta [ATC, 1985; Giovinazzi & Lagomarsino, 2003 e 2004 e Sigbjörnsson *et al.*, 1999], ou ainda a lognormal [FEMA & NIBS, 1999 e McCormack & Rad, 1997] têm vindo a ser utilizadas neste tipo de análises.

Retomando agora a definição de *curva de vulnerabilidade sísmica* que consta da secção 2.2, para uma dada tipologia construtiva com vulnerabilidade  $V$ , foi referido que esta representa o valor esperado das variáveis dano ou perda condicionado pela severidade da acção sísmica. Exemplificando para a variável dano, uma curva vulnerabilidade sísmica exprime-se por:

$$E[D|I] = \sum_{d=0}^{N_D} d \cdot MPD(d, I) \tag{2.28}$$

### 2.4.3. Método mecanicista

#### 2.4.3.1. Método FEMA & NIBS [1999]

A «Metodologia para a estimativa de perdas em consequência de sismos»<sup>7</sup> desenvolvida pela *Federal Emergency Management Agency*, dos Estados Unidos da América (EUA), em cooperação com o *National Institute of Building Sciences*, também dos EUA, aqui designada de metodologia FEMA & NIBS, é um método baseado em modelos mecanicistas de avaliação da vulnerabilidade sísmica de grande divulgação nesse País [Whitman *et al.*, 1997].

A metodologia FEMA & NIBS tem por objectivo principal estabelecer procedimentos e orientações para a obtenção, a uma escala regional, de estimativas de perdas resultantes da ameaça sísmica, ou de estimativas de perdas após a ocorrência de um desastre desta natureza, que serão utilizadas para fundamentarem estratégias de mitigação do risco sísmico e decisões relativas ao planeamento e à gestão da emergência. Esta metodologia é correntemente conhecida por HAZUS<sup>®</sup>99<sup>8</sup>, pois esta é a designação do pacote informático que a implementa e que recorre a dados e variáveis com valores de defeito válidos para o território dos EUA.

Recentemente a metodologia FEMA & NIBS tem vindo a ser aplicada noutros países [Campos Costa *et al.*, 2004; Campos Costa *et al.*, 2005; Carvalho *et al.*, 2000; Carvalho *et al.*, 2002a; Loh *et al.*, 2000; Moroux *et al.*, 2004; Sousa *et al.*, 2004 e Yeh *et al.*, 2000], embora na Europa se verifique alguma dificuldade na calibração de alguns dos seus parâmetros, por exemplo os que traduzem a vulnerabilidade e a fragilidade das tipologias construtivas, em particular no que toca à construção em alvenaria.

A metodologia é composta por seis módulos principais: (i) perigosidade sísmica, (ii) inventário, (iii) danos físicos directos, (iv) danos físicos induzidos, (v) perdas económicas e sociais directas e (vi) perdas económicas indirectas. Os módulos encontram-se interligados uma vez que os resultados de alguns deles constituem os dados necessários ao funcionamento de outros.

A presente secção dedica-se a expor o método mecanicista utilizado neste trabalho para a avaliação do desempenho sísmico de edifícios e dos respectivos danos estruturais. O método é semelhante ao adoptado no módulo de danos físicos directos da metodologia FEMA & NIBS [Kircher *et al.*, 1996], embora com algumas alterações introduzidas por Carvalho *et al.* [2002b] e Campos Costa *et al.* [2005]. Com efeito, para além de calibrarem os parâmetros do método por forma a contemplarem as especificidades do ambiente sismotectónico de Portugal Continental e dos processos construtivos aqui praticados ao longo dos tempos, estes autores

---

<sup>7</sup> No original *Earthquake Loss Estimation Methodology* [FEMA & NIBS, 1999].

<sup>8</sup> HAZUS significa *Hazard in the United States*.

também optimizaram o processo de avaliação da resposta da estrutura face à acção dos sismos.

Na essência do módulo de danos físicos directos da metodologia FEMA & NIBS tem-se duas etapas fundamentais:

1. A avaliação do desempenho sísmico de um edifício com base em análises estáticas não lineares com imposição de deslocamentos horizontais, que passa pela definição de *curvas de capacidade resistente* dos edifícios (secção 2.4.3.2), de *spectros de solicitação reduzidos* (secção 2.4.3.3) e de um processo iterativo para a convergência de ambos. Este processo iterativo de *avaliação da resposta sísmica* máxima das estruturas (secção 2.4.3.3) baseia-se no *método do espectro de capacidade*<sup>9</sup> [ATC, 1996 e Freeman, 1999] que compara a capacidade das estruturas resistirem a forças laterais com as exigências impostas pelo movimento sísmico do solo.
2. A avaliação dos quantitativos de danos em edifícios que envolve a definição de *curvas de fragilidade sísmica* para vários estados de dano, em função do deslocamento relativo entre pisos, no ponto de resposta máxima do edifício determinado na etapa anterior (secção 2.4.3.4).

### **2.4.3.2. Curvas de capacidade resistente**

O procedimento analítico ou experimental utilizado para a obtenção das curvas de capacidade, vulgarmente conhecido por análise *pushover*, é uma análise pseudo-estática não linear com imposição, na direcção horizontal, de forças ou deslocamentos monotonicamente crescentes.

As curvas de capacidade caracterizam a resistência global dos edifícios e exprimem a relação entre um campo de deslocamentos horizontais, numa certa direcção, ao longo da altura do edifício e o esforço transversal global ao nível da fundação, na mesma direcção.

Os deslocamentos ao longo da altura do edifício são proporcionais à configuração do modo de vibração com factor de participação mais elevado face a movimentos horizontais da base, na direcção pretendida. Para imposições monotónicas crescentes é determinada uma relação entre o esforço transversal na base e o deslocamento relativo para uma determinada altura de referência do edifício. Essa relação de referência define a curva de capacidade desse edifício [Carvalho *et al.*, 2002a].

Segundo Falcão & Bento [2001] e Campos Costa [1993] a utilização do modo de vibração fundamental baseia-se na hipótese de que este condiciona a resposta da estrutura, o que constitui uma hipótese válida para edifícios regulares e pouco flexíveis.

---

<sup>9</sup> No original: *capacity spectrum method* [ATC, 1996 e Freeman, 1999].

A aplicação do método do espectro de capacidade requer que as curvas de capacidade dos edifícios sejam representados num espaço de aceleração espectral,  $SA$ , versus deslocamento espectral,  $SD$ . Para o efeito, é necessário normalizar as curvas de capacidade em relação à massa do edifício convertendo a resistência em aceleração, conforme pormenorizado no relatório ATC-40 [ATC, 1996]. Neste novo formato as curvas de capacidade passam a ser designadas de *espectros de capacidade*.

Na avaliação da vulnerabilidade sísmica de grandes populações de estruturas os procedimentos do método do espectro de capacidade não obrigam, necessariamente, que as curvas de capacidade resistente sejam obtidas por análises *pushover* para cada estrutura individual [Giovinazzi & Lagomarsino, 2004]. Por exemplo, a metodologia FEMA & NIBS engloba regras expeditas para a construção de curvas de capacidade, directamente no espaço de aceleração espectral versus deslocamento espectral, válidas para tipologias construtivas.

Para tal, são considerados aspectos ligados ao dimensionamento sísmico das estruturas e as curvas de capacidade são definidas por três troços distintos, delimitados por dois pontos de controlo representativos da *capacidade de cedência* ( $SD_y, SA_y$ ) e da *capacidade última* ( $SD_u, SA_u$ )<sup>10</sup>, conforme se exemplifica na figura 2.5 e se explica de seguida [Carvalho *et al.*, 2002a]:

1. Até ao ponto de cedência, a curva de capacidade do edifício é praticamente linear com uma rigidez estimada a partir do período real do edifício.
2. No ponto de cedência ( $SD_y, SA_y$ ) a curva representa a resistência lateral do edifício antes deste iniciar uma resposta não linear.
3. Entre o ponto de cedência e o ponto de capacidade última a inclinação da curva de capacidade evolui de um estado essencialmente elástico para um estado totalmente plástico. A forma da curva de capacidade entre estes dois pontos não é especificada nem em FEMA & NIBS [1999] nem por Kircher *et al.* [1997]. Chen & Scawthorn [2003] adiantam que o HAZUS assume uma transição elíptica entre os dois pontos.
4. No ponto de capacidade última ( $SD_u, SA_u$ ) a curva representa a resistência máxima do edifício a forças laterais. A aplicação de forças horizontais superiores a esta capacidade acarreta necessariamente o colapso do edifício.
5. Para além do ponto de capacidade última a curva de capacidade mantém-se praticamente horizontal podendo aplicar-se acréscimos de deslocamento sem grande aumento de aceleração espectral, caracterizando um comportamento plástico até à rotura.

---

<sup>10</sup> As capacidades de cedência e última são designadas no original por *yield* e *ultimate capacity* [FEMA & NIBS, 1999].

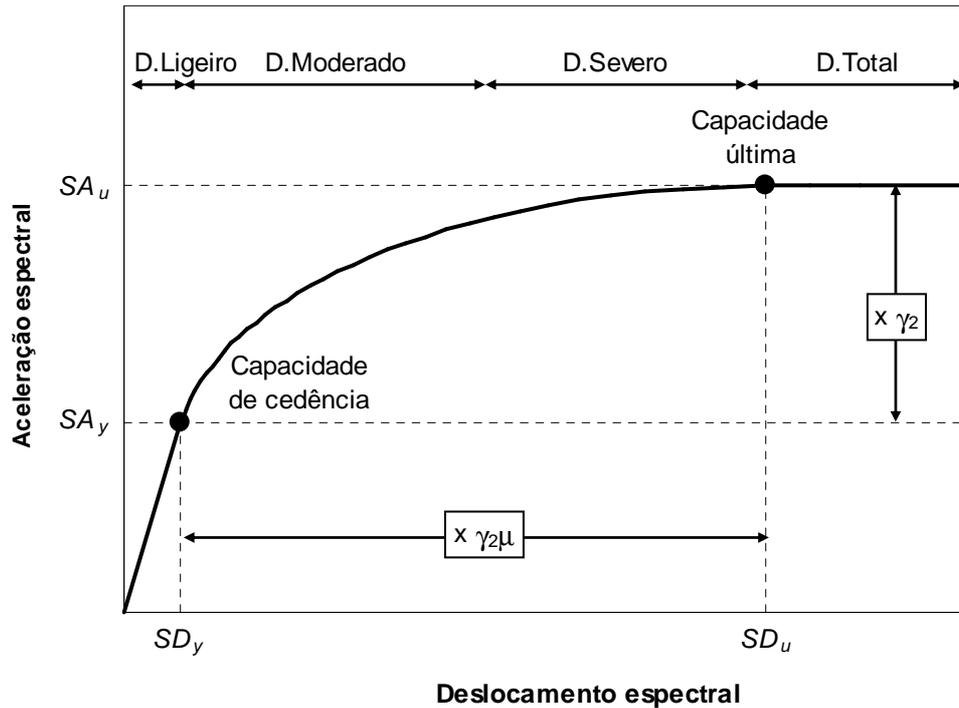


Figura 2.5 – Construção do espectro de capacidade [adaptado de Kircher et al., 1997 e de McGuire, 2004].

Assim, de acordo com FEMA & NIBS [1999] e Kircher *et al.* [1997] os valores das capacidades de cedência ( $SD_y$ ,  $SA_y$ ) e da capacidade última ( $SD_u$ ,  $SA_u$ ) exprimem-se por:

$$SA_y = C_s \gamma_1 / \alpha_1 \qquad SD_y = SA_y T_e^2 / (2\pi)^2 \qquad (2.29)$$

$$SA_u = \gamma_2 SA_y \qquad SD_u = \gamma_2 \mu SD_y \qquad (2.30)$$

em que,

$C_s$  é o coeficiente sísmico que corresponde ao valor estimado para a resistência de cálculo a forças horizontais, normalizada pelo peso total dos edifícios de dada tipologia (fracção do peso do edifício);

$T_e$  é o período do modo de vibração fundamental dos edifícios de dada tipologia;

$\alpha_1$  é a fracção do peso dos edifícios de dada tipologia que participa no seu modo de vibração fundamental;

$\gamma_1$  é o factor de sobre-resistência que relaciona a capacidade de cedência real com a capacidade de cálculo;

$\gamma_2$  é o factor de sobre-resistência que relaciona a capacidade última com a capacidade de cedência;

$\mu$  é o factor de ductilidade que relaciona o deslocamento último com  $\gamma_2$  vezes o deslocamento correspondente à cedência.

Na metodologia FEMA & NIBS os parâmetros  $C_s$  e  $\mu$  dependem do nível de segurança preconizado pelo regulamento sísmo-resistente e são função da tipologia construtiva, enquanto que os restantes parâmetros,  $T_e$ ,  $\alpha_1$ ,  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , não dependem do nível de dimensionamento sísmico sendo apenas função da tipologia construtiva.

Note-se que, no contexto dos estudos de risco sísmico a avaliação do desempenho sísmico estrutural é feito através de curvas de capacidade medianas, semelhantes às que constam da figura 2.5, não se considerando distribuições de probabilidade naquelas avaliações. Em geral, nestes estudos, a incerteza nas estimativas de danos causados por sismos é contemplada nas curvas de fragilidade (secção 2.4.3.4).

### 2.4.3.3. Avaliação da resposta sísmica

Tal como foi referido na secção 2.4.3.1 a metodologia FEMA & NIBS [1999] recorre ao método do espectro de capacidade para estimar a resposta sísmica máxima dos edifícios ( $SD_{max}$ ,  $SA_{max}$ ). A metodologia proposta baseia-se na determinação aproximada do valor de pico da resposta de edifícios, actuados por uma dada acção sísmica, sendo um procedimento gráfico expedito para avaliar o *ponto de desempenho sísmico*<sup>11</sup> ou o *ponto de resposta máxima* na eminência do colapso.

Em termos práticos, o ponto de resposta máximo da estrutura localiza-se graficamente na intersecção da curva de capacidade com um espectro de resposta representativo da solicitação sísmica para um determinado valor de amortecimento.

Naturalmente, tal ponto deve satisfazer simultaneamente a duas condições: (i) localizar-se na curva de capacidade, dado que a mesma modela a resposta da estrutura para um dado deslocamento e (ii) localizar-se sobre a curva do espectro de resposta da acção sísmica.

A aplicação do método do espectro de capacidade requer que o espectro de resposta seja representado num espaço de aceleração espectral,  $SA$ , versus deslocamento espectral,  $SD$ , tal como já tinha sido necessário para as curvas de capacidade. Na literatura internacional um espectro de resposta representado neste espaço designa-se de espectro de resposta no formato  $ADSR$ <sup>12</sup>.

Inicialmente a acção sísmica é caracterizada por um espectro de resposta elástico. No entanto, à medida que o movimento sísmico do solo conduz o edifício para um regime não linear a energia introduzida na estrutura pode levar à degradação de alguns dos seus elementos estruturais, pelo que, para além da sua rigidez diminuir, o espectro de resposta

---

<sup>11</sup> No original: *performance point* [ATC, 1996].

<sup>12</sup>  $ADSR = Acceleration Displacement Response Spectra$

elástico deverá ser modificado para ter em consideração a dissipação de energia ocorrida em potenciais mecanismos de histerese, obrigando à implementação de procedimentos iterativos.

A metodologia FEMA & NIBS inclui regras para calcular os factores de redução a serem aplicados ao espectro elástico inicial, de amortecimento  $\xi_0$ , para a obtenção do designado *espectro de solicitação*<sup>13</sup> reduzido. Estes factores de redução são função do amortecimento efectivo, ou real, da estrutura que depende por sua vez, via amortecimento histerético, da duração da acção sísmica. Por outras palavras, ao longo do processo iterativo conducente à resposta máxima da estrutura são estimados espectros de solicitação sucessivos, de amortecimento crescente ( $\xi_0 < \xi_1 < \xi_2 < \xi_f$ ) traduzindo os processos de degradação que ocorrem durante a resposta cíclica dinâmica da estrutura. Sobre os espectros de solicitação determinam-se os pontos da resposta aproximada até se atingir a convergência com a curva de capacidade mediana, conforme se ilustra na figura 2.6.

Mais detalhes sobre o método do espectro de capacidade podem ser encontrados em ATC [1996] e FEMA [1996].

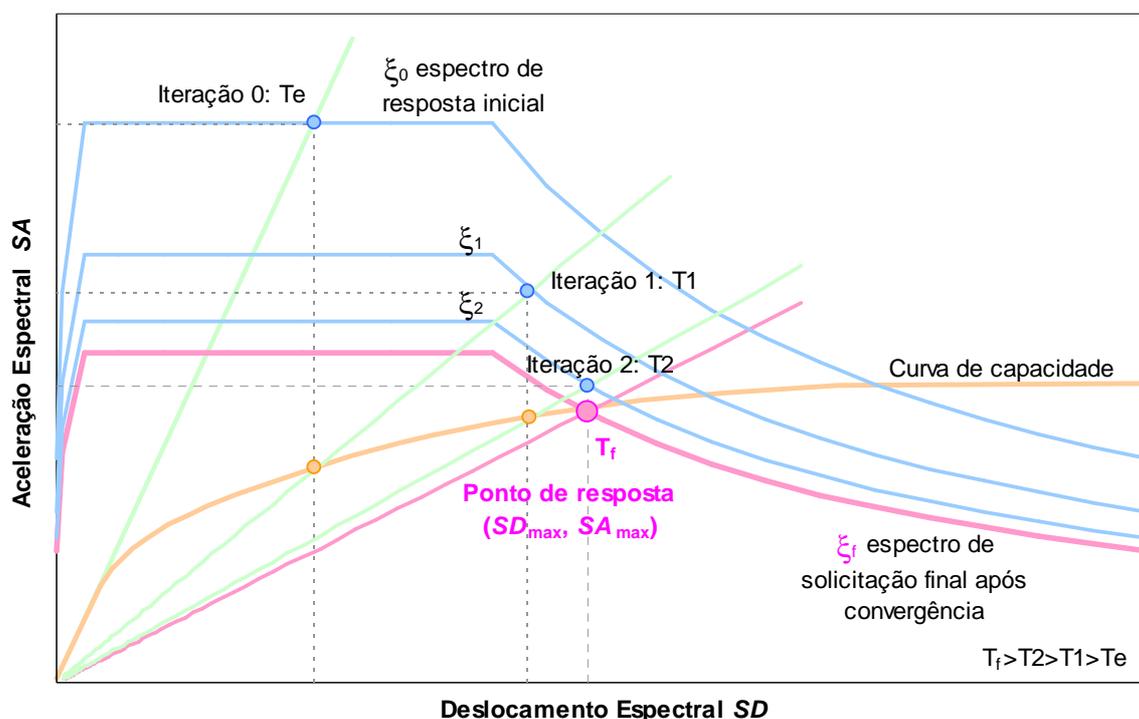


Figura 2.6 – Procedimento iterativo da metodologia FEMA & NIBS conducente à determinação da resposta máxima do edifício

Carvalho *et al.* [2002a] e Campos Costa *et al.* [2005] optimizaram o procedimento iterativo descrito, integrando uma técnica alternativa para a avaliação das respostas sísmicas

<sup>13</sup> No original: *demand spectra* [FEMA & NIBS, 1999].

sucessivas. Estes autores recorreram à teoria dos processos estocásticos para determinar uma função de densidade espectral de potência de aceleração compatível com a resposta sísmica em deslocamento avaliada em cada iteração. Evitaram assim o cálculo repetido dos espectros de resposta e a utilização de factores empíricos para a sua redução. Detalhes sobre este procedimento operacional, que aumenta a eficiência e precisão da avaliação da resposta máxima, podem ser encontrados nas publicações referidas [Campos Costa *et al.*, 2005 e Carvalho *et al.*, 2002a].

#### 2.4.3.4. Curvas de fragilidade sísmica

A metodologia FEMA & NIBS classifica os danos físicos estruturais e não estruturais das tipologias construtivas em quatro estados de dano descritos qualitativamente: *Dano Ligeiro*, *Moderado*, *Severo* e *Total*<sup>14</sup>. Para efeitos de modelação adicionou-se um quinto grau, designado de *Ausência de Dano*, permitindo assim completar as distribuições de danos em edifícios.

Nesta metodologia os estados de dano estruturais apresentam uma descrição específica para cada tipologia construtiva. Por exemplo, para os edifícios com estrutura em pórtico de betão armado, o estado de dano estrutural Dano Total é descrito da seguinte forma: a estrutura colapsou ou encontra-se em perigo eminente de colapso devido à rotura frágil de elementos não-dúcteis do pórtico ou à perda de estabilidade do mesmo. Entre os edifícios com estrutura em pórtico de betão armado que se encontram neste estado de dano espera-se que colapse aproximadamente 20%, 15% e 10% da superfície total dos edifícios de pequeno, médio e grande porte, respectivamente. Por outro lado, a descrição do estado de dano estrutural Dano Total, para estruturas de alvenaria não reforçada, é a seguinte: a estrutura colapsou ou encontra-se em perigo eminente de colapso devido à flexão das paredes para fora do seu plano, ou devido a roturas no próprio plano das paredes. Entre os edifícios de alvenaria não reforçada que se encontram neste estado de dano espera-se que colapse aproximadamente 25% da sua superfície total.

Enquanto que os danos das componentes estruturais condicionam essencialmente as perdas humanas mais graves e a funcionalidade dos edifícios, os danos das componentes não estruturais tendem a dominar as perdas económicas e as perdas humanas de menor gravidade.

A metodologia assume que os estados de dano das componentes estruturais são independentes dos estados de dano das componentes não estruturais. Na aplicação da metodologia FEMA & NIBS efectuada neste trabalho apenas se terá em consideração os danos nas componentes estruturais dos edifícios, não sendo avaliados os danos nas componentes não estruturais dos mesmos, tais como os recheios, os adereços arquitectónicos, as componentes mecânicas, eléctricas, etc.

---

<sup>14</sup> No original: *Slight*, *Moderate*, *Extensive* e *Complete* [FEMA & NIBS, 1999].

Na metodologia FEMA & NIBS os estados de dano são descritos numa escala ordinal, mas os seus limiares são quantificados pela resposta espectral do edifício  $SD_d$ , após sofrer as exigências do movimento vibratório. Por exemplo, o estado Dano Ligeiro é atingido para deslocamentos espectrais superiores a  $SD_{Ligeiro}$  e inferiores a  $SD_{Moderado}$ .

As curvas de fragilidade assumem, nesta metodologia, a forma de funções de distribuição lognormais que visam exprimir a probabilidade de uma determinada tipologia se encontrar em, ou exceder, um determinado estado de dano,  $d$ , dada uma acção sísmica de determinada severidade. Como foi referido, o valor condicional da acção sísmica é fornecido pelo deslocamento espectral,  $SD_{max}$ , correspondente à resposta máxima do edifício, avaliada na secção anterior. Para simplificar a formulação matemática desta secção omite-se o sufixo *max* na variável deslocamento espectral, ou seja,  $SD_{max} \equiv SD$ .

A figura 2.7 (esquerda) apresenta um exemplo de curvas de fragilidade para os quatro estados de dano contemplados pela metodologia e a expressão seguinte define as distribuições de probabilidade condicional utilizadas:

$$P_D(D \geq d | SD) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_d} \ln \left( \frac{SD}{\overline{SD}_d} \right) \right] \quad (2.31)$$

em que,

$\Phi$  representa a função cumulativa de uma distribuição Gaussiana reduzida;

$\overline{SD}_d$  é o valor mediano do deslocamento espectral (ou de outro parâmetro da acção sísmica) para o qual o edifício representativo de dada tipologia tipo atinge o limiar do estado de dano  $d$ ;

$\beta_d$  representa o desvio padrão do logaritmo neperiano do deslocamento espectral para o estado de dano  $d$ . Este descreve a variabilidade total dos estados de dano das curvas de fragilidade e quantifica as fontes de incerteza mencionadas na secção 2.4.2.

Para as componentes estruturais dos edifícios, o valor mediano de uma curva de fragilidade para um estado de dano  $d$ , é estimado a partir do deslocamento relativo entre pisos correspondente ao limiar desse estado de dano, sendo convertido em deslocamento espectral por:

$$\overline{SD}_d = \delta_d \alpha_2 h \quad (2.32)$$

em que,

$\delta_d$  representa o coeficiente de deslocamento relativo entre pisos correspondente ao estado de dano  $d$ . Na metodologia FEMA & NIBS os valores de defeito deste coeficiente são diferentes para cada tipologia estrutural e variam com o nível de dimensionamento sísmico;

$\alpha_2$  é a fracção da altura dos edifícios de dada tipologia que participa no seu modo de vibração fundamental;

$h$  representa a altura média dos edifícios de uma dada tipologia.

As curvas de fragilidade são assim funções que distribuem um conjunto de edifícios pertencentes a uma dada tipologia por cinco estados de dano, conhecida a severidade da acção sísmica [Kircher *et al.*, 1997]. Para o efeito, procede-se à diferenciação das distribuições de probabilidade cumulativas condicionais  $P_D(D < d | SD)$  para se obter, de forma aproximada, as probabilidades discretas da tipologia se encontrar num determinado estado de dano, em que  $d = 0$  corresponde ao estado Ausência de Dano e  $d = N_D$  corresponde ao estado Dano Total:

$$P_D(D=d | SD) = \begin{cases} 1 - P_D(D \geq d+1 | SD) & d = 0 \\ P_D(D \geq d | SD) - P_D(D \geq d+1 | SD) & 1 \leq d \leq N_D \\ P_D(D \geq d | SD) & d = N_D \end{cases} \quad (2.33)$$

Em estudos de risco sísmico é usual interpretar a probabilidade de dada tipologia se encontrar num determinado estado de dano como a percentagem de edifícios, dessa tipologia, que se encontra nesse estado de dano, quando sujeitos a um determinado nível de acção sísmica (ver figura 2.7 direita). Conhecidos os quantitativos dos elementos em risco na região em análise é possível contabilizar o número de edifícios, em cada estado de dano, para a severidade da acção sísmica especificada.

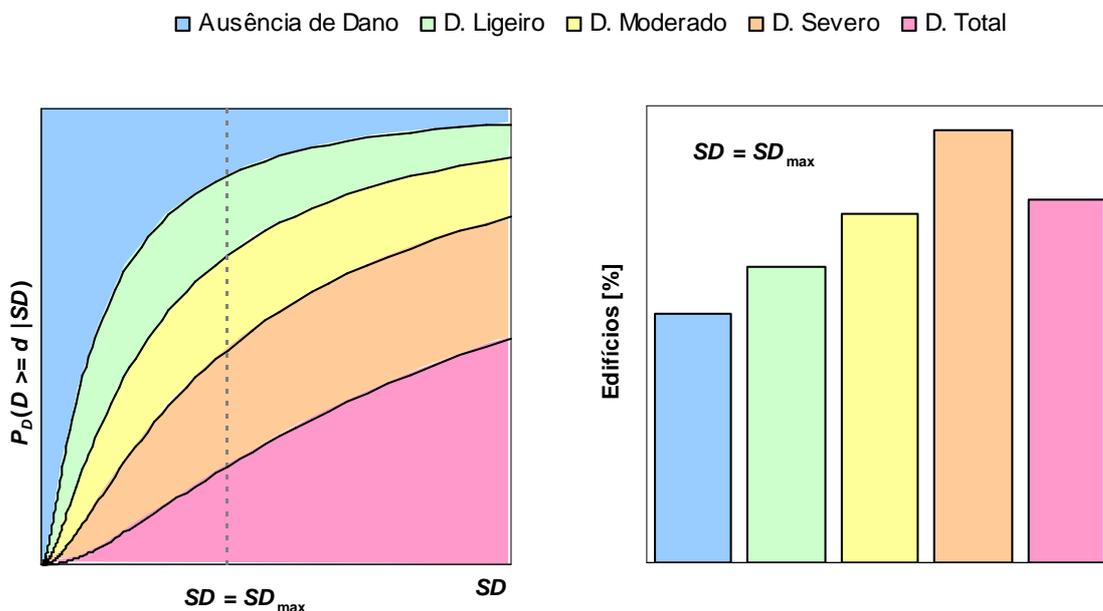


Figura 2.7 – Esquerda: curvas de fragilidade para os estados de dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total; direita: matriz de probabilidade de dano para  $SD = SD_{max}$ .

## 2.4.4. Métodos estatísticos ou empíricos

### 2.4.4.1. Escala Macrossísmica Europeia, EMS-98

A primeira metodologia estatística que vai ser exposta, a de Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004], foi desenvolvida tendo por base a Escala Macrossísmica Europeia, EMS-98, pelo que esta secção se dedica a efectuar uma breve descrição da estrutura desta escala.

A escala de intensidades EM-98, tal como a MSK que a precedeu, pertence a uma família de escalas originárias da de Rossi e Forel com dez graus de intensidade macrossísmica. Esta foi revista por Mercalli, posteriormente expandida por Cancani para doze graus e depois definida integralmente por Sieberg, sendo designada de escala Mercalli-Cancani-Sieberg (MSC) [Grünthal, 1998]. A escala MSC constitui o ponto de partida para várias versões das escalas MSK (MSK-76, MSK-81) e de Mercalli Modificada (MM-31, MM-56). A escala MSK foi publicada pela primeira vez por Medvedev, Sponheuer e Karnik em 1964, sendo posteriormente actualizada nas suas versões de 1976 e 1981. A Escala Macrossísmica Europeia, EMS, resultou de uma revisão radical da escala MSK iniciada pela *European Seismological Commission* em 1988 [Musson, 2003]. Entre 1992 e 1998 a EMS teve primeiro um carácter provisório e depois experimental, até que, em 1998 foi publicada na sua versão final, data que ficou ligada à sua designação actual: EMS-98.

Grünthal [1998] sustenta que a partir da escala MSC, que possui doze graus, a maioria das escalas atrás referidas são aproximadamente equivalentes, variando apenas no grau de sofisticação empregue na sua formulação.

A grande diferença entre a escala EM-98 e as outras escalas de intensidade situa-se ao nível do detalhe com que os diferentes termos são especificados, em particular no que diz respeito às definições de *graus de dano*, das *quantidades* de edifícios nos vários graus de dano e dos *tipos de estrutura de edifícios* e das suas *classes de vulnerabilidade*.

Remete-se a definição de graus de dano para a secção que se segue, pois nela também se referem os graus de dano de outra escala de intensidades e a correspondência com os indicadores de dano dos métodos mecanicistas.

A quantidade de edifícios pertencentes a cada grau de dano, dado um valor de intensidade macrossísmica, é definida pelos termos «Poucos», «Muitos» e «A maioria», aos quais se associam gamas de valores de probabilidade com a finalidade de introduzir um elemento estatístico na escala. No guia da escala as definições de quantidade são apresentadas deliberadamente de forma gráfica (ver figura 2.8), de forma a enfatizar as sobreposições das três classes numéricas de quantidade, assinaladas pela cor mais esbatida.

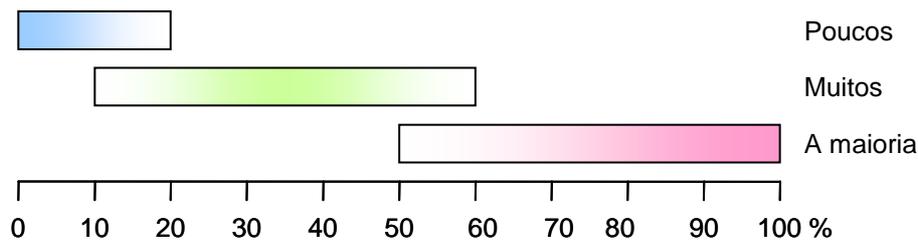


Figura 2.8 – Definição de quantidades na escala EM-98 [Grüntal, 1998].

A classificação da vulnerabilidade dos edifícios, em função do seu tipo de estrutura é um tema abordado com grande detalhe na escala EM-98.

Esta propõe seis classes de vulnerabilidade, decrescentes de «A» a «F», para diferenciar a vulnerabilidade dos tipos de estrutura de edifícios mais comuns existentes na Europa, conforme especificado no seu «Quadro de Vulnerabilidade» (quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Quadro de Vulnerabilidade da EMS-98 [traduzido de Grüntal, 1998].

Tipo de estrutura de edifícios		Classe de vulnerabilidade					
		A	B	C	D	E	F
ALVENARIA	Alvenaria de pedra irregular e solta	○					
	Adobe	○					
	Alvenaria de pedra (aparelhada)		○				
	Pedra aparelhada (monumentos)			○			
	Alvenaria não reforçada de tijolo e blocos de betão		○				
	Alvenaria não reforçada com placa			○			
Alvenaria reforçada ou confinada				○			
BETÃO ARMADO (BA)	Pórtico BA sem DSR ou com DSR mínimo <sup>1</sup>			○			
	Pórtico BA com DSR moderado				○		
	Pórtico BA com DSR elevado					○	
	Parede BA sem DSR ou com DSR mínimo			○			
	Parede BA com DSR moderado				○		
	Parede BA com DSR elevado					○	
METÁLICOS	Estrutura metálica					○	
MADEIRA	Estrutura de madeira				○		

<sup>1</sup> DSR – Dimensionamento Sismo-Resistente



Classe mais provável;



Classe provável;



Classe pouco provável ou casos excepcionais.

Cada entrada horizontal deste quadro corresponde a um tipo de estrutura de edifícios que é classificado, com maior ou menor grau de certeza, numa classe de vulnerabilidade. A incerteza subjacente à classificação de um tipo de estrutura numa dada classe de vulnerabilidade também é ilustrada graficamente no Quadro de Vulnerabilidade da escala EM-98. Este indica, para cada tipo de estrutura, a classe de vulnerabilidade mais provável (circunferência) e as gamas de classes prováveis (linha cheia) e menos prováveis ou excepcionais (linha tracejada). Por exemplo, as estruturas em pórtico de betão armado, as metálicas e as de madeira são aquelas que exibem a maior variação de vulnerabilidade sísmica, podendo ser classificadas numa de quatro classes de vulnerabilidade.

Ao contrário das escalas anteriores, na EMS-98 não existe uma relação unívoca entre um tipo de estrutura e uma classe de vulnerabilidade, pois outros factores, como a qualidade da construção dos edifícios, o seu estado de conservação, a sua regularidade em altura e planta, o nível do seu dimensionamento sísmico, etc., deverão ser tidos em consideração na classificação da sua vulnerabilidade sísmica.

A este propósito vale a pena mencionar a existência de outro género de partição na EMS-98, que se refere ao nível de dimensionamento sísmo-resistente (DSR) das estruturas em betão armado.

No nível mais baixo encontram-se as estruturas não dimensionadas para resistirem a sismos, independentemente de terem ou não sido dimensionadas para cargas gravíticas. Estas estruturas são correntes em regiões de sismicidade baixa em que não existem regulamentos sísmo-resistentes ou, se existem, não têm carácter obrigatório. Este tipo de estruturas também engloba edifícios construídos em regiões de sismicidade mais elevada, mas em data anterior à da entrada em vigor de regulamentação sísmo-resistente.

Num segundo nível encontram-se os edifícios dimensionados e construídos conforme as disposições regulamentares do país a que pertencem. Esta classe de estruturas poderão incorporar um nível mínimo, moderado ou elevado de dimensionamento sísmo-resistente (DSR-Baixo, Moderado ou Elevado, respectivamente).

As estruturas com um nível mínimo de dimensionamento sísmico são correntes em regiões de sismicidade baixa a moderada. Note-se que, por uma questão de simplicidade, as estruturas de betão armado sem dimensionamento sísmo-resistente e aquelas com um nível mínimo de dimensionamento são classificadas como pertencentes ao mesmo tipo de estrutura.

As estruturas com DSR-Moderado são comuns em regiões de sismicidade moderada a elevada, enquanto que as estruturas com DSR-Elevado já exigem métodos dinâmicos de cálculo e medidas especiais de detalhe, de forma a assegurar a construção de um sistema estrutural de ductilidade melhorada. Este nível de dimensionamento é esperado em regiões de sismicidade elevada não sendo correntemente exigido nos países Europeus.

No terceiro e último nível têm-se os edifícios com medidas anti-sísmicas especiais, tais como o isolamento de base. Este tipo de edifícios não pode ser usado na atribuição de intensidades macrossísmicas.

#### 2.4.4.2. Indicadores de dano

Na categoria de métodos estatísticos ou empíricos os efeitos da acção dos sismos sobre os edifícios exprimem-se por um índice de dano global que descreve os danos sofridos pelas estruturas como um todo, semelhante aos níveis ou graus de dano identificados nas escalas de intensidades MSK e EM-98. As metodologias estatísticas, apresentadas nas secções que se seguem, recorrem a indicadores de dano destas duas escalas, pelo que esta secção se dedica a descrevê-los brevemente.

Na escala EM-98 os danos são classificados em 5 graus conforme se especifica no quadro 2.3. Mais uma vez, para completar as distribuições de danos em edifícios adicionou-se um sexto grau, designado de «0» correspondente à Ausência de Dano. Nesta escala as descrições qualitativas dos graus de dano diferem consoante o tipo de estrutura é de alvenaria ou de betão armado, sendo acompanhadas por ilustrações.

Na escala MSK o número e qualificação dos graus de dano é em tudo semelhante à da escala EM-98, excepto que existe uma descrição única dos danos aplicável indiferenciadamente a edifícios de alvenaria e de betão armado.

Para comparar as avaliações de dano produzidas pelos métodos estatísticos e mecanicistas é necessário ter em consideração as diferenças entre os indicadores de dano utilizados e tentar estabelecer uma possível correspondência entre eles. Por exemplo, os métodos estatísticos contemplam avaliações de danos não estruturais (grau 1), ao contrário da aplicação que será efectuada com o método mecanicista FEMA & NIBS que apenas tem em consideração os danos estruturais. Assim, fez-se corresponder o estado Ausência de Dano desta metodologia aos graus 0 e 1 das escalas de intensidade macrossísmicas. Acresce que a restante correspondência de graus de dano não é directa, pois a metodologia FEMA & NIBS utiliza 4+1 estados de dano, enquanto que as metodologias estatísticas fazem referência a 5+1 graus de dano.

No quadro 2.3 apresenta-se a correspondência aplicada no presente trabalho entre os estados de dano da metodologia FEMA & NIBS e os graus ou níveis de dano das metodologias estatísticas.

Ressalve-se a existência de alguma subjectividade nesta correspondência e a possibilidade de outras soluções, como a encontrada pelo projecto *RISK-EU* [Milutinovic & Trendafiloski, 2003] que, tendo recorrido em paralelo a abordagens estatísticas e mecanicistas, efectuou uma correspondência grau a grau, com excepção dos graus 4 e 5 das metodologias estatísticas que foram agrupados e associados ao estado Dano Total da metodologia mecanicista.

Quadro 2.3 – Correspondência entre os indicadores de dano do método mecanicista e dos métodos estatísticos.

Estados de dano FEMA & NIBS	Graus de dano das escalas MSK e EM-98
Ausência de Dano	Grau 0 – ausência de dano
	Grau 1 – dano desprezível ou ligeiro (ausência de danos estruturais, danos não estruturais ligeiros)
Dano Ligeiro	Grau 2 – dano médio (danos estruturais ligeiros, danos não estruturais médios)
Dano Moderado + Severo	Grau 3 – dano substancial ou grave (danos estruturais médios, danos não estruturais graves)
Dano Total	Grau 4 – dano muito grave (danos estruturais graves, danos não estruturais muito graves) + Grau 5 – destruição (danos estruturais muito severos)

#### 2.4.4.3. Modelo de danos baseado na escala EM-98

O método de avaliação de vulnerabilidade sísmica e danos de Giovinazzi & Lagomarsino, atrás classificado como uma abordagem estatística híbrida (secção 2.4.1), pretende estabelecer a ponte entre os métodos de levantamento de danos, ou tipológicos, e os de indexação.

Este método recorre à classificação dos tipos de estruturas da escala EMS-98 e a um índice de vulnerabilidade construído a partir do modelo de vulnerabilidade contido implicitamente nesta escala. Este índice pode ser refinado com base em factores capazes de modificar o comportamento sísmico dos edifícios que, por sua vez, podem ser aferidos a partir de estatísticas de danos [Giovinazzi & Lagomarsino, 2003 e 2004].

Como o objectivo da escala EM-98 é medir a severidade de um sismo a partir da observação dos seus efeitos, ela também pode ser utilizada de forma inversa, fornecendo um modelo de vulnerabilidade capaz de sugerir uma distribuição de probabilidade de dano, para um dado valor da intensidade macrossísmica [Brennet & Badoux, 2002; Giovinazzi & Lagomarsino, 2003 e 2004].

Não obstante, o designado modelo de vulnerabilidade que a escala implicitamente contem baseia-se em matrizes de probabilidade de dano incompletas e ambíguas. De facto, tal como se exemplifica no quadro 2.4, estas matrizes não são exaustivas, pois apenas se referem às situações mais frequentemente observadas, e são vagas, pois a quantidade de edifícios pertencentes a cada grau de dano, dado um valor de intensidade macrossísmica, é definida qualitativamente.

Quadro 2.4 – Modelo de vulnerabilidade da escala EM-98 para edifícios da classe de vulnerabilidade B [Giovinazzi & Lagomarsino, 2004].

Intensidade	Grau de dano				
	1	2	3	4	5
V	Poucos				
VI	Muitos	Poucos			
VII		Muitos	Poucos		
VIII			Muitos	Poucos	
IX				Muitos	Poucos
X					Muitos
XI					A maioria
XII					

O trabalho de Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004] reúne propostas para: (i) completar as matrizes de probabilidade de dano que se encontram implícitas na escala e (ii) interpretar, através da teoria dos conjuntos difusos<sup>15</sup>, a descrição vaga dos quantitativos de edifícios pertencentes a cada grau de dano.

Para resolver o problema da falta de exaustividade do modelo de vulnerabilidade da escala EM-98 os autores recorrem a uma distribuição do tipo beta cuja função densidade de probabilidade é dada por:

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(q)}{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q-p)} \cdot \frac{(x-a)^{p-1} \cdot (b-x)^{q-p-1}}{(b-a)^{q-1}} \quad a \leq x \leq b \quad (2.34)$$

em que  $a$ ,  $b$ ,  $p$  e  $q$  são os parâmetros da distribuição,  $\Gamma(\cdot)$  representa a função gama e  $x$  é uma variável aleatória contínua que varia entre  $a$  e  $b$ .

A utilização da distribuição beta para completar as matrizes de probabilidade de dano da EMS-98 exige que se faça referência ao grau de dano,  $D$ , que nesta escala é uma variável aleatória discreta, tal que  $D \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ . Para o efeito, Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004] propõem que o parâmetro  $a$  da distribuição beta assumo o valor 0 e que o parâmetro  $b$  assumo o valor 6. Acrescentam ainda algumas considerações sobre o valor médio da distribuição beta que lhes permitem correlacionar os parâmetros  $p$  e  $q$  desta distribuição com o grau de dano médio,  $\mu_D$ , através de um polinómio de terceiro grau:

<sup>15</sup> Em inglês: *fuzzy set theory*.

$$p = q \cdot (0,007 \cdot \mu_D^3 - 0,0525 \cdot \mu_D^2 + 0,2875 \cdot \mu_D) \tag{2.35}$$

Giovinazzi & Lagomarsino [2003] advogam que o parâmetro  $q$ , que afecta a dispersão da distribuição beta, assumo o valor 8, caso em que esta distribuição fica semelhante à binomial e, por conseguinte, uma vez conhecido  $\mu_D$  é possível completar o modelo de vulnerabilidade implícito na escala EM-98.

Resta assim resolver o problema da descrição vaga dos quantitativos de edifícios pertencentes a cada grau de dano. De acordo com a teoria dos conjuntos difusos as descrições qualitativas podem ser interpretadas através de uma função  $\chi$ , que define o grau de pertença de valores individuais de uma dada variável a um determinado conjunto, e que se designa de *função de pertença*; se  $\chi$  é igual à unidade então o grau de pertença é *plausível*, ou seja, quase certo; se  $\chi$  se situa entre 0 e 1 indica que o valor da variável é raro, mas *possível*; se  $\chi$  é nulo, significa que o valor da variável não pertence ao conjunto.

Os autores definem funções de pertença trapezoidais para os três atributos, «Poucos», «Muitos» e «A maioria», da variável linguística «edifícios danificados». Assim as faixas de sobreposição das probabilidades da figura 2.8 (reproduzida na figura 2.9), correspondem à gama de valores possíveis da variável referida.

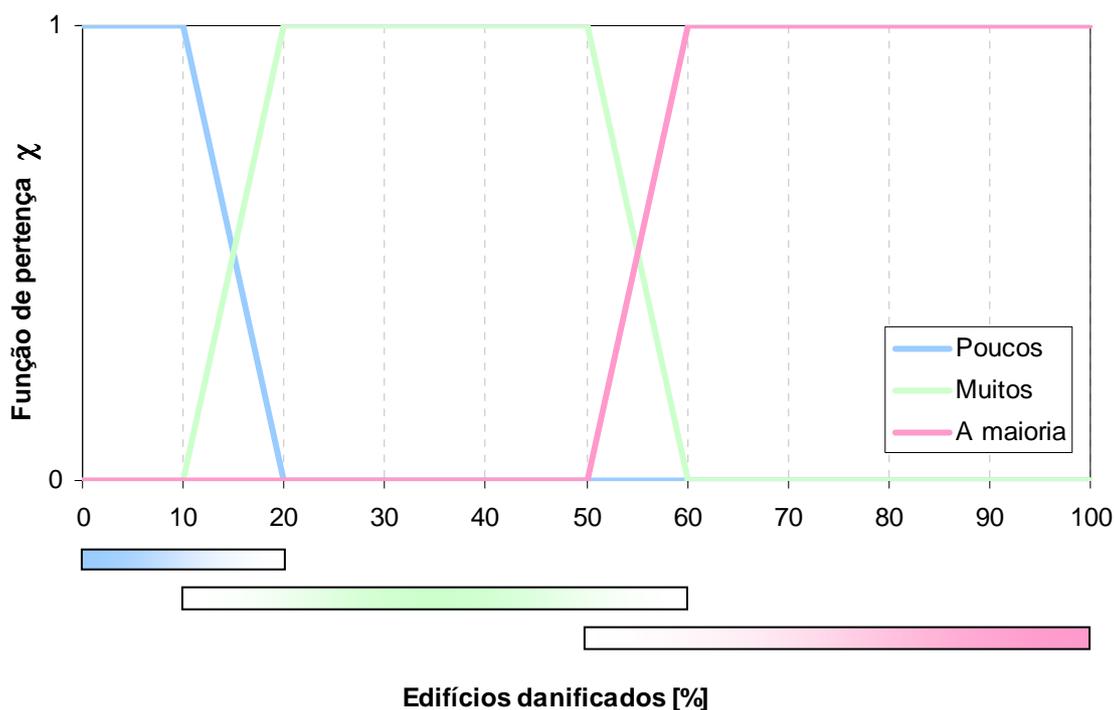


Figura 2.9 – Funções de pertença dos atributos «Poucos», «Muitos» e «A maioria» da variável «edifícios danificados» [Giovinazzi & Lagomarsino, 2003 e 2004].

Remetem-se os detalhes da interpretação dessa descrição vaga, ou qualitativa, através da teoria dos conjuntos difusos, para os trabalhos de Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004].

Salienta-se apenas que os autores conseguem definir funções de vulnerabilidade semi-empíricas através de uma expressão analítica que correlaciona o grau de dano médio,  $\mu_D$ , com a intensidade macro sísmica e com um índice de vulnerabilidade,  $V_I$ :

$$\mu_D = 2,5 \cdot \left[ 1 + \tanh\left(\frac{I + 6,25 \cdot V_I - 13,1}{2,3}\right) \right] \quad (2.36)$$

Como se verá no capítulo 5, os autores fornecem para cada uma das seis classes de vulnerabilidade da escala EM-98, mas também para cada tipologia de edifícios apresentada no Quadro de Vulnerabilidade 2.2, os valores do índice de vulnerabilidade mais provável,  $V_I^*$ , os limites inferior e superior da gama de incerteza ou plausibilidade,  $V_I^-$  e  $V_I^+$ , e os limites inferior e superior da gama de valores possíveis  $V_{Imin}$  e  $V_{Imax}$ .

Porém, de acordo com a escala EM-98 o comportamento sísmico dos edifícios não depende apenas do seu sistema estrutural, sendo também influenciado por outros factores como o seu estado de conservação, número de pisos, etc. Em conformidade com o espírito da escala, os autores sugerem que o índice de vulnerabilidade total,  $\bar{V}_I$ , seja avaliado com base na soma da contribuição de três factores: o *índice de vulnerabilidade tipológico* mais provável,  $V_I^*$ , o *índice de vulnerabilidade regional*,  $\Delta V_R$ , e outros factores de penalização ou despenalização da vulnerabilidade sísmica,  $\Delta V_m$ , designados de *modificadores do comportamento* sísmico dos edifícios:

$$\bar{V}_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m \quad (2.37)$$

O índice de vulnerabilidade tipológico é representativo de uma grande variedade de tecnologias construtivas utilizada nos diferentes países da Europa, razão pela qual os autores introduziram o índice de vulnerabilidade regional que tem em consideração que edifícios pertencentes à mesma tipologia podem ser mais ou menos vulneráveis, em consequência de técnicas construtivas específicas de uma determinada região. Deste modo, o índice de vulnerabilidade regional tem a capacidade de modificar o índice de vulnerabilidade tipológico com base na opinião de especialistas ou na existência de dados históricos.

Os modificadores do comportamento sísmico também representam acréscimos ou decréscimos relativos ao índice de vulnerabilidade tipológico, que se baseiam em factores específicos de cada edifício. Giovinazzi & Lagomarsino [2004] indicam os seguintes modificadores de comportamento sísmico dos edifícios: o estado de conservação, o número de pisos, o sistema estrutural, a irregularidade em planta e em altura, o tipo de cobertura, possíveis intervenções de reforço, a existência de dispositivos anti-sísmicos especiais, o posicionamento do edifício relativamente aos que lhe são adjacentes, a altura relativa entre edifícios adjacentes, o tipo de fundação e a configuração do rés-do-chão.

O índice de vulnerabilidade total terá ainda que ter em conta o limite inferior e o superior,  $V_{I\min}$  e  $V_{I\max}$ , dos valores possíveis do índice de vulnerabilidade tipológico, ou seja:

$$\max(\bar{V}_I; V_{I\min}) \leq \bar{V}_I \leq \min(\bar{V}_I; V_{I\max}) \quad (2.38)$$

Desta forma, recorrendo às expressões 2.34 a 2.38 ficam completamente definidas as curvas de fragilidade a serem utilizadas na modelação de perdas devido à ocorrência de um sismo de intensidade macrossísmica  $I$ :

$$P(D > d | I) = 1 - P_{\beta|I}(d) \quad (2.39)$$

em que  $P_{\beta|I}(d)$  é a função cumulativa da distribuição beta condicionada por  $I$ .

#### 2.4.4.4. Modelos estatísticos baseados em matrizes de probabilidade de dano

A compilação de estatísticas de danos fiáveis acarreta problemas complexos, pois exige a inspeção de todo o tipo de estruturas de edifícios na tentativa de se obter uma amostra com dimensão aceitável, que cubra toda a gama de intensidades, graus de dano, sistemas estruturais, número de pisos e outros factores de vulnerabilidade [Tiedemann, 1992]. Na prática, verifica-se uma grande carência de informação especialmente no que toca aos danos sofridos por edifícios menos vulneráveis em sismos severos, mas também aos quantitativos de edifícios que não experimentaram danos.

Tiedemann, 1992 menciona outros problemas a serem considerados nestes levantamentos, nomeadamente de compatibilização entre as grandezas que medem a intensidade do movimento do solo, por exemplo diferentes escalas de intensidade macrossísmica, ou dificuldades em remover a influência dos efeitos dos solos sobre a intensidade do movimento.

O presente estudo emprega dois métodos estatísticos baseados em levantamento de danos, o de Di Pasquale & Orsini [1997] [citado por Di Pasquale *et al.*, 1999; Lucantoni *et al.*, 2002 e SSN, 1998] e o de Zuccaro & Papa [2002].

Ambos os métodos constroem matrizes de probabilidade de dano baseadas em inspeções após a ocorrência de sismos, nos quais se agrupam os edifícios em classes de vulnerabilidade. Seguindo a proposta de Braga *et al.* [1982], os autores utilizam factores de vulnerabilidade como o ano de construção do edifício e a sua tipologia construtiva para agrupar os edifícios em classes de vulnerabilidade adaptadas da escala MSK.

A escala de intensidades macrossísmica MSK contempla três classes de vulnerabilidade:

«A» – Edifícios de alvenaria de pedra solta, de adobe, argila e casas rurais.

«B» – Edifícios de alvenaria de pedra aparelhada, de tijolo e de blocos de betão; construções mistas de alvenaria e madeira.

«C» – Edifícios de betão armado e construções de boa qualidade em madeira.

Nos dois modelos de danos mencionados, a classe «C» foi ainda subdividida em duas classes, a «C1» e a «C2». Na classe «C1» incluem-se os edifícios de alvenaria de boa qualidade, enquanto que os edifícios de betão armado foram remetidos para a classe «C2».

De acordo com Lucantoni *et al.* [2002] as matrizes de probabilidade de dano de Di Pasquale & Orsini [reproduzidas em SSN, 1998] basearam-se numa amostra estatística de cerca de 50 000 alojamentos inspeccionados após os sismos italianos de Irpinia de 1980 e de Abruzzo de 1984<sup>16</sup>.

Em 2002, Zuccaro & Papa defendem que as matrizes de probabilidade de dano de Di Pasquale & Orsini têm a desvantagem de traduzirem, essencialmente, o comportamento de um conjunto específico de tipologias e técnicas construtivas presentes em Irpinia e Abruzzo, de forma que tentaram actualizá-las para serem representativas de todas as tipologias estruturais do território Italiano.

Para elaborar as novas matrizes de probabilidade de dano os autores seleccionaram 64 concelhos em que foram avaliados danos de um total de 51 774 edifícios. Zuccaro & Papa utilizaram as observações de campo realizadas após os sismos de Irpinia e de Abruzzo e também alguma informação recolhida pelo *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti* (GNDT) relativa a sismos ocorridos em Itália após 1986. Para além da informação obtida neste conjunto de levantamentos os autores adicionaram dados coligidos nos sismos de Izmit e Atenas, em 1999<sup>17</sup>, relativos a edifícios de betão armado, tipologia para a qual as amostras de danos em Itália são particularmente pobres.

#### 2.4.4.5. Curvas de vulnerabilidade sísmica de edifícios

Em 1992, Tiedemann apresenta uma compilação de estatísticas de danos causados por 30 sismos ocorridos em diversas partes do mundo, correspondendo a levantamentos efectuados em mais de 200 000 edifícios. O autor estabeleceu uma correlação geral entre a *razão de danos médios*,  $MDR$ <sup>18</sup>, a intensidade de Mercalli Modificada e a classe de vulnerabilidade dos edifícios, traduzida pelo respectivo coeficiente sísmico de dimensionamento,  $C_s$ , no caso dos edifícios de betão armado (figura 2.10).

Neste contexto, define-se *razão de danos*,  $DR$ , como o custo de reparação dos danos provocados por um sismo sobre um conjunto homogéneo de edifícios pertencentes a uma

---

<sup>16</sup> Segundo Goretti & Di Pasquale [2002] o sismo de Irpinia de 1980 teve uma magnitude de 6,9 e uma intensidade epicentral de IX-X; já o de Abruzzo de 1984 teve uma magnitude de 5,6 e uma intensidade epicentral de VIII.

<sup>17</sup> O sismo de Izmit na Turquia teve uma magnitude de momento  $M_w$  entre 7,3 e 7,6 e o sismo de Atenas na Grécia teve uma magnitude  $M_w$  entre 5,9 e 6,0 [USGS, 2005b].

<sup>18</sup> No original: *Mean Damage Ratio* [Tiedemann, 1992].

dada tipologia construtiva, normalizado pelo valor global desses mesmos edifícios à data do sismo e que também se designará por *custo de reparação normalizado*.

Esta grandeza é uma medida de danos relativos que depende da intensidade do movimento sísmico no local  $I$ , ou seja,  $DR \equiv DR(I)$ , e é válida para uma dada tipologia em risco de vulnerabilidade  $V$ . A razão de danos não é uma grandeza determinística, pois edifícios com vulnerabilidade idêntica e em condições semelhantes, podem sofrer danos diferentes. Desta forma, a variável  $DR$  é aleatória e é descrita, para uma dada tipologia de vulnerabilidade  $V$ , por uma distribuição de probabilidade condicional expressa por  $P_{DR}(DR \leq dr | I)$ .

O valor esperado desta distribuição condicional é vulgarmente conhecido por *razão de danos médios*,  $MDR(I) = E(DR | I)$ , ou seja, é o valor médio do custo de reparação normalizado de um edifício pertencente a uma dada tipologia vulnerável,  $V$ , após a ocorrência de um sismo com intensidade  $I$  no local. As curvas de  $MDR$  em função da intensidade do movimento sísmico traduzem as curvas de vulnerabilidade sísmica de uma dada tipologia.

Apesar das correcções introduzidas pelo autor relativamente à influência das condições do solo é patente a grande dispersão nas correlações traçadas na figura 2.10. Nota-se também a carência de dados para intensidades elevadas e para edifícios de maior qualidade.

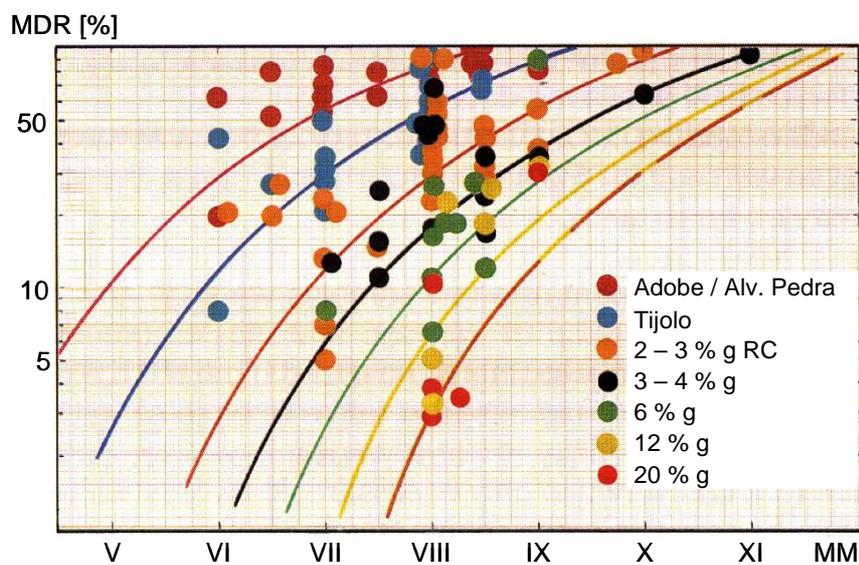


Figura 2.10 – Curvas de vulnerabilidade de edifícios [Tiedemann, 1992].

Em trabalhos anteriores, Sousa *et al.* [1997] ajustaram um modelo matemático às estatísticas de danos compiladas por Tiedemann [1992], para descrever a vulnerabilidade sísmica média das tipologias construtivas do edificado Português. Os autores utilizaram o *coeficiente sísmico*  $C_s$ , tal como ele é considerado no dimensionamento estrutural dos edifícios, para traduzir, numa única variável, a vulnerabilidade de cada uma destas classes. Naturalmente o coeficiente sísmico varia na razão inversa da vulnerabilidade  $V$  de uma dada classe de vulnerabilidade.

Sousa *et al.* [1997] estimaram o seguinte modelo por análise de regressão sobre as correlações de danos médios traçadas por Tiedemann [1992]:

$$MDR(I, C_s) = e^{a_1(I)} \cdot C_s^{a_2(I)} \quad (2.40)$$

em que  $C_s$  é medido em percentagem e  $a_1(I)$  e  $a_2(I)$  são dados por:

$$\begin{aligned} a_1(I) &= 0.0188 \cdot I^3 - 0.5884 \cdot I^2 + 6.3515 \cdot I - 18.822 \\ a_2(I) &= 0.0104 \cdot I^3 - 0.3047 \cdot I^2 + 3.1560 \cdot I - 11.938 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Este método é particularmente adequado à análise de perdas em edifícios com projecto de engenharia, pois para os restantes os valores dos coeficientes sísmicos terão que ser estimados com base em conhecimentos empíricos de especialistas.

## 2.5. Vulnerabilidade sísmica e perdas humanas

### 2.5.1. Enquadramento

As consequências mais graves de um desastre sísmico são sem dúvida as perdas de vidas humanas envolvidas, pelo que a redução dessas perdas é um dos objectivos principais das políticas de mitigação do risco sísmico [Coburn & Spence, 2002].

Portugal, ao longo da sua história, já se deparou com diversos cenários de catástrofe em consequência de sismos, como são os exemplos dos sismos de 1531 e de 1755, que provocaram um número elevado de perdas de vidas humanas.

Em particular, o arquipélago dos Açores já foi afectado, pelo menos, por 30 sismos com intensidade superior ou igual a VII na escala de Mercalli Modificada, que causaram entre 4 290 e 5 300 vítimas [Nunes & Ribeiro, 2001]. Durante o século XX, aproximadamente 70% das vítimas mortais de sismos em Portugal decorreram de eventos neste Arquipélago [Carvalho *et al.*, 2001b].

Para se ter uma ideia da dimensão mundial do problema refira-se que apenas no século XX o montante oficial de vítimas mortais em 1 248 sismos muito severos, atingiu o total de 1 685 000. Deste total de vítimas verificou-se que 40% ocorreram num único país, a China, e que cerca de 50% foram causadas por apenas seis eventos catastróficos. É provável porém, que o número real de vítimas mortais dos sismos do século XX seja superior aos cerca de 1,7 milhões referidos, pois neste número não foram contabilizados os mortos causados por sismos pouco severos, nem incluídas as vítimas de cerca de nove dezenas de sismos severos devido à inexistência de dados oficiais [Coburn & Spence, 2002]. Muitas vezes os números oficiais

também são pouco precisos, realçando-se a necessidade do cruzamento de diversas fontes de informação e a importância das avaliações das perdas humanas *in situ* [Tiedemann, 1992].

Na figura 2.11 verifica-se que a maioria das vítimas morreu devido ao colapso de edifícios (75%) e as restantes (25%) morreu em consequência de causas não estruturais ou de perigos e efeitos colaterais induzidos pelos sismos.

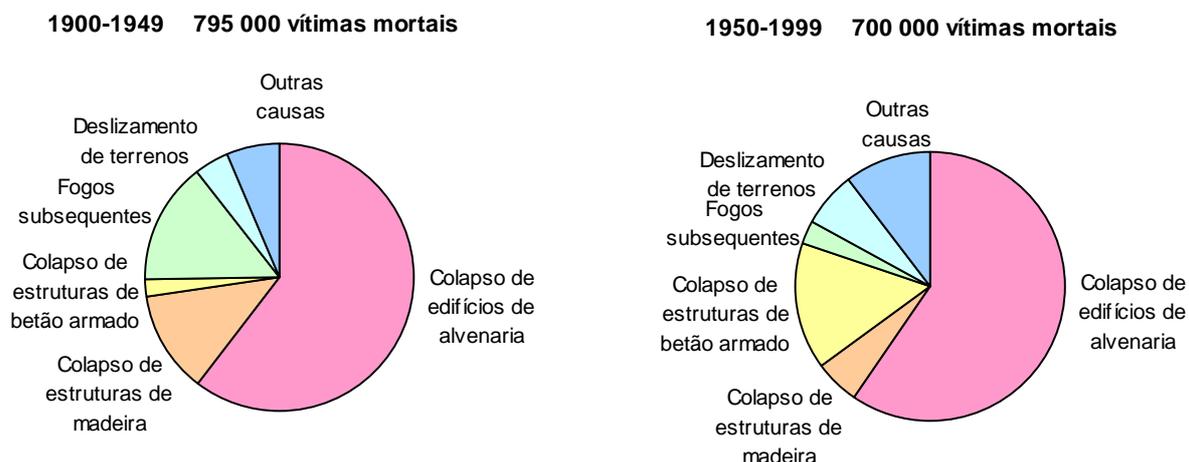


Figura 2.11 – Causas de morte em sismos ocorridos na primeira e na segunda metade do século XX [Coburn & Spence, 2002].

Entre as vítimas resultante do colapso de edifícios, a maioria encontrava-se em edifícios de alvenaria, principalmente alvenaria de fraca qualidade (adobe, pedra não aparelhada, etc.), [Coburn & Spence, 2002].

É também notório nesta figura o aumento do número de vítimas devido ao colapso de estruturas de betão armado quando se passa para a segunda metade do século XX. Coburn & Spence [2002] são da opinião que muito dos edifícios de betão armado construídos em países pobres são altamente vulneráveis e que, quando colapsam, têm o potencial de matar uma percentagem mais elevada dos seus ocupantes do que os edifícios de alvenaria.

A figura 2.12 ilustra o número de vítimas mortais em função do número de edifícios severamente danificados, para sismos em que ambas as estatísticas possuam alguma fiabilidade. Verifica-se que, de facto, existe uma correlação entre o montante de vítimas e a destruição causada por sismos, embora esse montante seja altamente variável de sismo para sismo. Seria necessário introduzir outras variáveis explicativas, nomeadamente instante do dia e a capacidade económica dos países onde ocorre o desastre, para diminuir a incerteza num modelo deste tipo.

Tiedemann [1992] e Coburn & Spence [2002] identificam algumas fontes de incerteza que concorrem para a dificuldade de se construir modelos de previsão fiáveis do número de vítimas em consequência de sismos, nomeadamente: (i) a fraca qualidade dos dados documentais, (ii) a grande variabilidade do número de vítimas de sismo para sismo, que ainda

é mais pronunciada quando os eventos são causadores de níveis de dano ligeiros ou moderados, (iii) a dificuldade em correlacionar o número de vítimas com a vulnerabilidade dos edifícios em que se encontravam, (iv) a ocorrência de efeitos colaterais ou condições adversas pós-sismo (más condições climatéricas, epidemias e fome), (v) a incerteza na contabilização do número de feridos e na classificação da gravidade do seu estado e (vi) a incerteza no apuramento do número de pessoas presente na região afectada com vista a estimar valores relativos de perdas humanas.

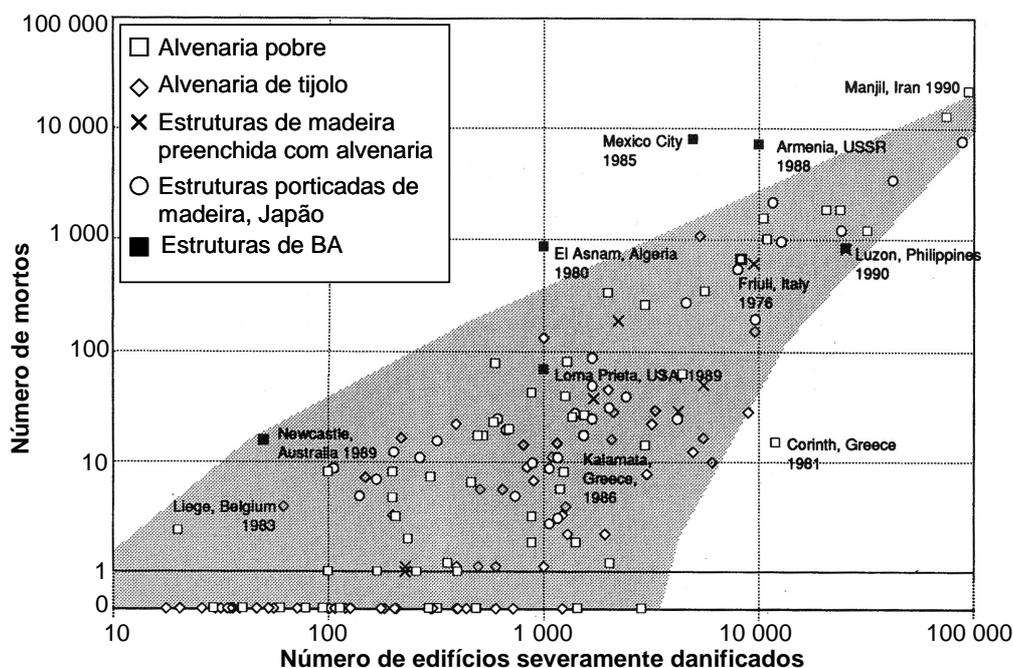


Figura 2.12 – Relação entre o número de vítimas mortais e o número de edifícios severamente danificados [traduzido de Coburn & Spence, 2002].

Nas secções seguintes identificam-se diversos factores que influenciam a vulnerabilidade sísmica dos elementos humanos em risco, não se pretendendo fazer uma análise exaustiva do estado da arte neste domínio, mas somente apresentar e referir as metodologias mais relevantes, com maior divulgação e aplicabilidade a nível mundial.

Os modelos publicados podem atingir diversos níveis de complexidade e detalhe baseando-se, na sua maioria, em relações entre os danos no edificado e o número de vítimas (mortos, feridos e desalojados), aferidos a partir de estatísticas mundiais de sismos recentes.

Desta forma descrevem-se três métodos de previsão de perdas humanas que serão aplicados na presente pesquisa: (i) o modelo de simulação FEMA & NIBS [1999] (secção 2.5.2), (ii) o modelo de Coburn & Spence [2002] (secção 2.5.3) e (iii) as curvas de vulnerabilidade de Tiedemann [1992] (secção 2.5.4). À semelhança do que foi feito relativamente aos modelos de avaliação de vulnerabilidade de edifícios, remete-se para a secção 2.7 e para o capítulo 5 (secção 5.6) a análise crítica das metodologias expostas.

Também à semelhança dos modelos de dano, na descrição e aplicação dos modelos de perdas humanas se omitem, por uma questão de simplificação, as datas das respectivas referências.

Na literatura internacional encontram-se publicadas várias outras metodologias, merecendo destaque a do projecto ATC13 [ATC, 1985] que reuniu um painel de especialistas em engenharia sísmica capazes de estimar, de forma subjectiva, as percentagens de mortos e feridos em função do estado de dano da construção. Esta metodologia foi profusamente aplicada em estudos de avaliação de danos e perdas em consequência de sismos, pelo menos até ao final dos anos 90 do século passado [Emmi & Horton, 1993 e McCormack & Rad, 1997].

Para exemplificar trabalhos desenvolvidos para regiões específicas do Globo referem-se: (i) os de Gulkan *et al.* [1992] que reúnem matrizes de probabilidade de dano baseadas em observações quantitativas de danos recolhidos durante três décadas de levantamentos pós-sismo na Turquia, (ii) os de Yang *et al.* [1992] que desenvolveram um sistema inteligente para a avaliação de danos e perdas em consequência de sismos aplicável a cidades de pequena e média dimensão da China, (iii) os de Murakami [1992] que assenta num modelo de árvore de eventos aferido a partir de estatísticas de perdas do sismo da Arménia (Spitak) de 1988, (iv) o modelo empírico divulgado em Itália que prevê um rácio de 30% entre as vítimas mortais e o número de pessoas envolvidas no colapso e, mais recentemente, (v) os de Peek-Asa *et al.* [2000, citado por McGuire, 2004] que especificam taxas de perdas humanas em função das intensidades de Mercalli Modificadas observadas no sismo de Northridge de 1994.

### **2.5.2. Modelo de árvore de eventos da metodologia FEMA & NIBS [1999]**

Na presente secção será abordada a componente da metodologia FEMA & NIBS que incide sobre a avaliação de perdas humanas em consequência de um sismo, mais precisamente a avaliação do número de mortos e feridos. A metodologia FEMA & NIBS também indica valores de defeito e procedimentos que permitem estimar as necessidades de realojamento, tópico que não será abordado neste trabalho.

Os valores das perdas humanas fornecidos por defeito neste módulo da metodologia FEMA & NIBS fundamentam-se nos publicados pela metodologia ATC 13 [ATC, 1985], posteriormente revistos para terem em consideração as estatísticas de perdas humanas ocorridas em sismos dos Estados Unidos, em particular o de Northridge em 1994, e em estatísticas semelhantes recolhidas a nível mundial.

A metodologia fundamenta-se no princípio de que os danos no edificado (estruturais e não estruturais) estão correlacionados com o número de pessoas afectadas e com a gravidade dos seus ferimentos. Assume ainda que, em sismos pouco severos, os danos não estruturais são as principais causas de vítimas, enquanto que, em sismos mais severos, existirá um maior número de colapsos de edifícios e conseqüentemente um maior número de vítimas mortais.

As perdas humanas contabilizadas pela metodologia FEMA & NIBS resultam dos efeitos directos de danos no edificado e em pontes, não sendo contemplados os efeitos colaterais como os incêndios, rotura de diques e barragens, libertação de substâncias tóxicas, etc. São também excluídas as perdas não causadas por impactos físicos ocorridos durante o sismo, tais como ataques cardíacos, efeitos psicológicos, quedas de elementos não estruturais exteriores aos edifícios e as perdas causadas pelas actividades pós-sismo como sejam a remoção de escombros e a reconstrução.

No núcleo do módulo das perdas sociais directas da metodologia FEMA & NIBS são especificados os valores de defeito das taxas de perdas humanas em edifícios, de uma dada tipologia construtiva, que se encontram nos estados de dano, Dano Ligeiro, Moderado, Severo ou Total. De realçar que, neste módulo, o estado Dano Total é subdividido no colapso estrutural parcial e total dos edifícios, sendo fornecidos valores distintos para as respectivas taxas de perdas humanas. Entre os edifícios que se encontram no estado Dano Total, os valores de defeito da percentagem de edifícios que colapsa totalmente variam entre 10 e 25%, dependendo, mais uma vez, da tipologia dos edifícios.

O resultado do módulo das perdas sociais directas consiste na estimativa das perdas humanas repartidas por quatro níveis de gravidade dos ferimentos, descritos no quadro 2.5.

*Quadro 2.5 – Escala de gravidade de ferimentos [FEMA & NIBS, 1999].*

Nível de gravidade dos ferimentos	Descrição
Feridos Ligeiros	Feridos que necessitam de tratamento médico, sem necessidade de hospitalização.
Cuidados Hospitalares	Feridos que necessitam de ser hospitalizados mas que não se encontram em perigo de vida.
Feridos Graves	Feridos que se encontram em perigo de vida caso não sejam tratados de forma imediata e adequada. Muitos destes feridos ficaram aprisionados em consequência do colapso das estruturas.
Mortos	Morte imediata ou ferimentos mortais.

O modelo desenvolvido pela metodologia FEMA & NIBS para estimar as perdas humanas resultantes de um determinado sismo baseia-se na construção de uma árvore de eventos que se inicia com um dado cenário sísmico e que segue o curso possível dos acontecimentos conduzindo à perda de vidas humanas e à ocorrência de feridos. A cada ramo da árvore de eventos associa-se uma probabilidade de ocorrência, atribuída de forma subjectiva. Dado que os sismos são acontecimentos raros essas probabilidades foram obtidas combinando estatísticas de perdas humanas, com a opinião de especialistas e inferência Bayesiana.

Para exemplificar, na figura 2.13 traça-se, de forma simplificada, o modelo de árvore de eventos utilizado pela metodologia FEMA & NIBS na estimativa de perdas humanas. As

simplificações desta figura decorrem de se agruparem todos os níveis de gravidade de ferimentos num único ramo e de se considerar uma única tipologia de edifícios. O exemplo incide sobre o cálculo da probabilidade dos ocupantes de uma determinada tipologia serem mortos,  $P_{morto}$ , que é dado pela seguinte expressão:

$$P_{morto} = (P_B \cdot P_F) + (P_C \cdot P_G) + (P_D \cdot P_H) + P_E \cdot (P_I \cdot P_K + P_J \cdot P_L) \quad (2.42)$$

O número esperado de ocupantes mortos numa dada tipologia de edifícios,  $N_{Vmortos}$ , resulta do produto população presente nessa tipologia de edifícios, no instante do sismo,  $Np_V$  pela probabilidade de cada ocupante morrer,  $P_{morto}$ :

$$N_{Vmortos} = Np_V \cdot P_{morto} \quad (2.43)$$

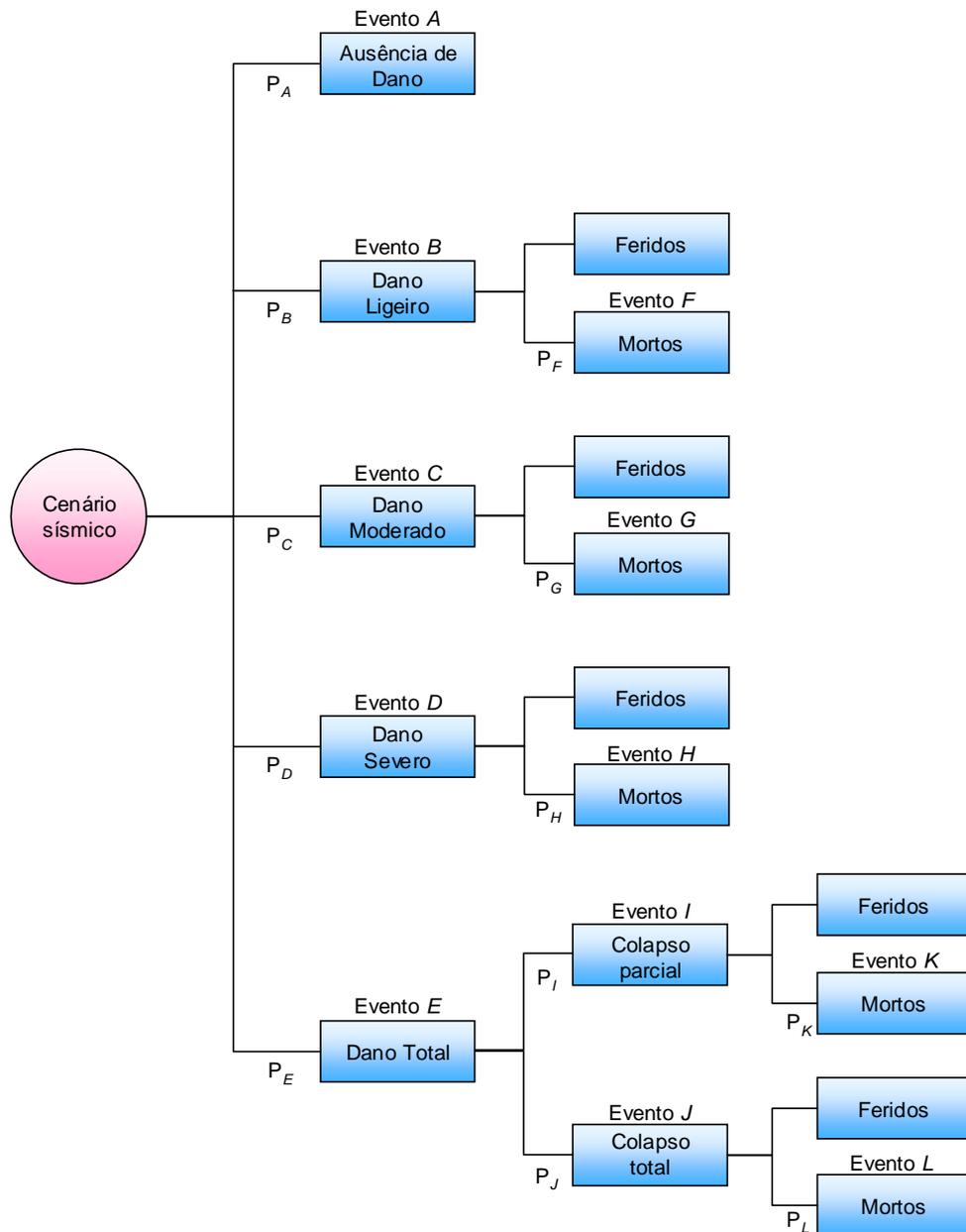


Figura 2.13 – Modelo em árvore de eventos para o cálculo da probabilidade de ocupantes mortos em consequência de sismos [adaptado de FEMA & NIBS, 1999].

As expressões anteriores deverão ser aplicadas a todas as tipologias afectadas pelo evento sísmico e redefinidas para os restantes níveis de gravidade de ferimentos para se obter as perdas humanas totais na unidade geográfica em análise.

Note-se que esta metodologia contempla a possibilidade de ocorrência de mortos mesmo para estados de dano diferentes do colapso.

### 2.5.3. Perdas em função do colapso de edifícios [Coburn *et al.*, 1992 e Coburn & Spence, 2002]

Coburn *et al.* [1992] propõem uma equação geral para a previsão de perdas humanas resultantes de um sismo,  $K$ :

$$K = K_s + K_{ns} + K_c \quad (2.44)$$

em que as parcelas de perdas humanas contabilizadas são as resultantes dos danos estruturais,  $K_s$ , dos danos não estruturais,  $K_{ns}$ , e de fenómenos colaterais induzidos pelos sismos (tsunamis, fogos, etc.),  $K_c$ .

As perdas humanas resultantes de efeitos colaterais são raras, porém, quando ocorrem, é provável que dominem as perdas totais. A parcela  $K_{ns}$  é a dominante nos níveis de dano baixos, sendo no entanto muito variável e difícil de prever, não sendo abordada na metodologia de Coburn & Spence. A variável  $K_s$  controla as perdas na maioria dos sismos destrutivos e é estimada pelo modelo de Coburn & Spence.

Face a estes constrangimentos, Coburn *et al.* [1992] restringem este modelo à estimativa do número de ocupantes que ficam aprisionados em edifícios colapsados, ou seja, avaliam aproximadamente a parcela  $K_s$  da expressão 2.44.

Assim, de acordo com o modelo Coburn & Spence o número de vítimas para uma dada tipologia de edifícios de vulnerabilidade  $V$ ,  $K_{sV}$ , exprime-se por:

$$K_{sV} = Ne_{D5V} \cdot Npe \cdot [M2 \cdot M3 \cdot (M4 + M5 \cdot (1 - M4))] \quad (2.45)$$

em que,  $Ne_{D5V}$  representa o número total de edifícios que colapsaram<sup>19</sup> pertencentes à tipologia de vulnerabilidade  $V$ ;  $Npe$  é o número médio de pessoas que habita nos edifícios da região em análise<sup>20</sup>; e  $M2$  a  $M5$  são factores que afectam a mortalidade das pessoas que se encontram no instante do sismo nos edifícios que colapsam. Este conjunto de factores é usado para estimar

<sup>19</sup> Na metodologia Coburn & Spence o estado de dano  $D5$  corresponde ao colapso.

<sup>20</sup> No caso português, os Censos 2001 permitem apurar o número médio de ocupantes por tipologia de edifícios, ou seja,  $NpV$ .

as pessoas aprisionadas no colapso, as resgatadas pelas equipas de emergência, bem como a distribuição de mortos e feridos pelas várias classes de gravidade de ferimentos.

O número total de vítimas estimado por este modelo resultará da soma do número de vítimas de edifícios colapsados de todas as tipologias afectadas por um dado sismo.

**Factor M2: Taxa de ocupação no instante do sismo**

O instante do dia em que o sismo ocorre é um factor que afecta reconhecidamente o número de vítimas do evento. Sismos que ocorrem quando grande parte da população se encontra dentro de casa causarão seguramente um número de vítimas mais elevado.

Na figura 2.14 exhibe-se a percentagem da população que se encontra dentro de casa no instante em que o movimento sísmico tem o seu início.

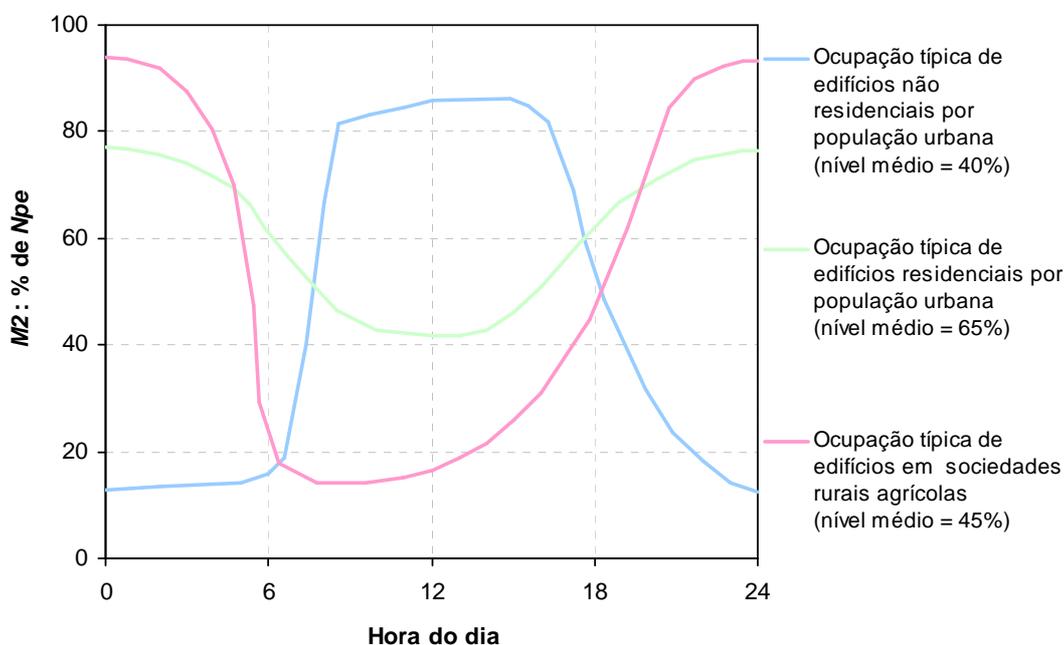


Figura 2.14 – Taxa de ocupação dos edifícios no instante do sismo [traduzido de Coburn & Spence, 2002].

Nas sociedades rurais em que a população passa parte do dia fora de casa, há indicadores que apontam para que o número de mortos em sismos que ocorrem durante o período nocturno seja cerca de duas vezes superior ao número de mortos em sismos que ocorrem durante o dia. Em áreas urbanas esta variação não será tão acentuada, pois a maioria da população encontra-se em edifícios residenciais ou em edifícios não residenciais durante as 24 h do dia. Há estudos que indicam a existência de uma redução considerável da ocupação dos edifícios em áreas urbanas durante as horas de ponta, o que se poderá reflectir na diminuição do número de vítimas de sismos que ocorram nesses períodos. Outras variações importantes na ocupação dos edifícios são as sazonais (períodos de férias) e as semanais (dias de trabalho e fins-de-semana).

**Factor M3: Ocupantes aprisionados devido ao colapso dos edifícios**

O factor *M3* é designado por Coburn *et al.* [1992] por taxa de aprisionamento, representando a percentagem da população *M2* incapaz de escapar devido ao colapso dos edifícios. Este factor é muito difícil de quantificar devido à quase inexistência de estatísticas sobre o assunto. É certo que a proporção de ocupantes aprisionados pelo colapso parcial ou total dos edifícios é fortemente influenciada pelo tipo de edifício, aumentando com a sua altura e diminuindo com a intensidade do movimento sísmico.

Não se sabe ao certo o tempo que um edifício demora a colapsar. Coburn *et al.* [1992] exemplificam com casos de edifícios de alvenaria, localizados em zonas epicentrais de sismos intensos, que colapsam instantaneamente, afirmando que um edifício dúctil demorará algumas dezenas de segundos a colapsar enquanto que um mais frágil colapsará mais rapidamente.

De acordo com Coburn *et al.* [1992], cerca de 50% dos habitantes em edifícios com um piso, ou no rés-do-chão de edifícios com mais pisos, serão capazes de escapar antes do edifício colapsar. São poucos os habitantes de andares mais elevados que serão capazes de abandonar o edifício após o início de um sismo intenso. Testes sobre tempos de evacuação mostram que os habitantes que se encontram acima do 1º piso não são capazes de abandonar o edifício em menos de 30 segundos, pressupondo que conseguem andar sob o efeito de vibrações violentas.

Neste modelo e no caso de edifícios de betão armado o factor *M3* também é afectado pelas características do movimento sísmico. Considerando edifícios de betão armado de 3 a 5 pisos e o caso de sismos próximos em que o movimento tem o seu maior conteúdo energético nas altas frequências, os dados disponíveis indicam valores de *M3* em torno dos 70%. Para o mesmo tipo de estruturas, mas para movimentos sísmicos de longo período causados por sismos afastados o factor *M3* assume valores em torno dos 50%.

Para edifícios de alvenaria os valores do factor *M3* preconizados por Coburn & Spence [2002] exibem-se no quadro 2.6.

*Quadro 2.6 – M3: Percentagem média de ocupantes aprisionados devido ao colapso de edifícios de alvenaria com nº de pisos inferior a 3 [Coburn & Spence, 2002].*

Intensidade MSK	VII	VIII	IX	X
<i>M3</i>	5%	30%	60%	70%

**Factor M4: Distribuição de mortos e feridos no colapso**

O factor *M4* da metodologia Coburn & Spence exprime a percentagem de mortos e de feridos de diversas gravidades em relação aos ocupantes aprisionados (*M3*) logo após a ocorrência do colapso. No quadro 2.7 reúne-se a proposta de Coburn & Spence [2002] para os valores do factor *M4*.

A informação relativa à distribuição da gravidade dos ferimentos dos ocupantes de edifícios colapsados é muito precária. Com efeito se já é difícil obter números rigorosos sobre vítimas mortais, a contabilização do número de feridos e da gravidade do seu estado é ainda mais incerta. Enquanto que no primeiro caso se avalia uma variável binária, morto ou vivo, no caso dos feridos a gravidade do seu estado pode ser muito variável.

Estudos relativos a períodos de sobrevivência e sobre vítimas evacuadas de edifícios colapsados sugerem que em estruturas de betão armado, a distribuição dos feridos é bi-modal, pois a maioria dos ocupantes ou morre ou fica apenas levemente ferida. Pelo contrário, a distribuição dos feridos em edifícios de alvenaria parece ser mais uniforme, onde grande parte das pessoas aprisionadas fica gravemente ferida.

*Quadro 2.7 – M4: Distribuição dos feridos devido ao colapso de edifícios (% de ocupantes aprisionados) [Coburn & Spence, 2002].*

Gravidade dos ferimentos	Alvenaria	Betão Armado
Feridos Ligeiros	20	10
Cuidados Hospitalares	30	40
Feridos Graves	30	10
Mortos	20	40

**Factor M5: Mortalidade pós-colapso**

As vítimas aprisionadas no colapso morrerão rapidamente se não forem socorridas e receberem o tratamento médico adequado. Nas actividades de emergência o tempo é crítico, pois enquanto que as vítimas ligeiramente feridas ainda sobrevivem algum tempo, o mesmo não acontece com as que se encontram feridas com gravidade [Coburn *et al.* 1992].

O factor M5, ou seja, a mortalidade adicional das vítimas aprisionadas no colapso, está relacionado com a eficácia das operações de socorro e emergência, tal como se explicita no quadro 2.8.

Esta eficácia varia consideravelmente de país para país, de região para região, depende da severidade do sismo e é influenciada por factores que incluem o tipo de material de construção, o tipo de colapso, o equipamento de socorro, a capacidade de resposta das equipas de emergência, etc. No caso de um sismo catastrófico, em que grande percentagem da população fica aprisionada em edifícios colapsados, verifica-se que o factor M5 atinge valores elevados pois a comunidade afectada perde a capacidade de socorrer as vítimas encarceradas. Modelos matemáticos indicam que o factor M5 é sensível à melhoria da eficácia das operações de socorro dentro das primeiras 24 a 36 horas após a ocorrência do sismo, mas que essa sensibilidade diminui rapidamente com o tempo.

Outros factores que influenciam a mortalidade pós-colapso são as condições climatéricas, as réplicas, os incêndios pós-sismo, etc.

Quadro 2.8 – M5: Percentagem de sobreviventes aprisionados em edifícios colapsados que morrem posteriormente [Coburn & Spence, 2002].

Situação	Alvenaria [%]	Betão Armado [%]
Comunidade incapacitada devido à elevada taxa de mortalidade	95	-
Comunidade capaz de organizar operações de socorro	60	90
Comunidade + equipas de emergência disponíveis nas 12 horas após o sismo	50	80
Comunidade + equipas de emergência + outros especialistas disponíveis 36 horas após o sismo	45	70

A distribuição de feridos entre as vítimas resgatadas também depende do tipo de edifícios. Para edifícios metálicos e de betão os autores preconizam que entre os resgatados 2/3 sairão ilesos, enquanto que para edifícios de alvenaria e de madeira essa razão reduz-se para 1/4. Entre os feridos resgatados Coburn & Spence [2002] assumem que se distribuem uniformemente pelas categorias de feridos graves e de feridos que requerem tratamento hospitalar.

#### 2.5.4. Curvas de vulnerabilidade para elementos humanos em risco [Tiedemann, 1990 e 1992]

Tiedemann [1990 e 1992] analisou directamente os danos e as perdas causados por um número significativo de sismos ocorridos em diversas partes do mundo para obter informação de boa qualidade relativa a perdas humanas, quantificar as incertezas gerais relacionadas com esta contabilização e identificar os parâmetros principais que as influenciam, distinguindo os que afectam o número de vítimas mortais e os que condicionam o número de feridos.

De acordo com Tiedemann [1992] as principais variáveis de que depende a percentagem de população que pode ser morta por um sismo,  $TM$  (taxa de mortos) são a intensidade do sismo, a vulnerabilidade do edifício, o instante do dia em que o sismo ocorre, a estação do ano, os hábitos locais da população e a eficácia da resposta de emergência.

Sendo o impacto de um sismo sobre as populações fortemente condicionado pelas duas primeiras variáveis atrás mencionadas, Tiedemann [1990 e 1992] traça curvas de vulnerabilidade (figura 2.15) que correlacionam a taxa de mortos,  $TM$ , com a intensidade  $MM$  (de Mercalli Modificada), para tipologias de edifícios com vulnerabilidades diferentes.

Para exemplificar a utilização da figura 2.15 refira-se que cerca de 10% das pessoas que habitam em edifícios da tipologia B morreriam, caso fosse sentida uma intensidade  $MM=VIII$ , enquanto que apenas morreriam 0,07% dos habitantes de edifícios da tipologia D para o mesmo grau de intensidade  $MM$ . A associação de intensidades macrossísmicas aos

respectivos períodos de retorno, permite a utilização da figura 2.15 na previsão de probabilidades dos quantitativos de vidas humanas perdidas.

Tiedemann [1990 e 1992] não especifica as curvas de vulnerabilidade relativas à taxa de feridos,  $TF$ , devido à incerteza estatística elevada e por existirem muitas variáveis que condicionam o número esperado de feridos. O autor verificou que na prática, a razão  $TM / TF$  aumenta com a vulnerabilidade dos edifícios, pois quando a probabilidade de colapso é elevada ocorrem normalmente muitos mortos e sobra um número reduzido de vítimas feridas. Por outro lado, à medida que a qualidade dos edifícios aumenta, a importância do colapso estrutural diminui e a contribuição dos danos não estruturais aumenta, implicando uma redução da razão  $TM / TF$ , pois agora as vítimas, na sua maioria, encontram-se feridas.

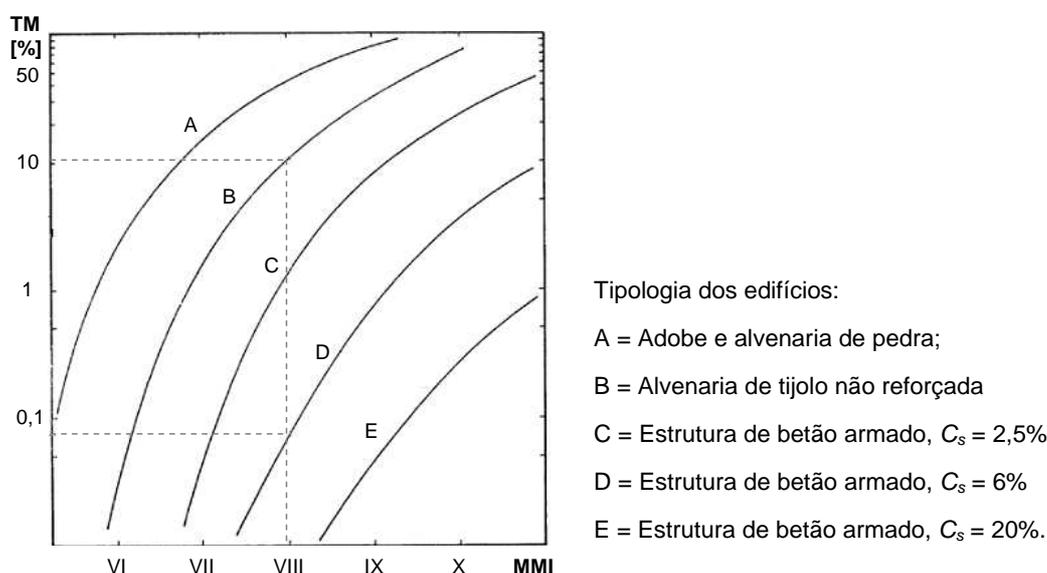


Figura 2.15 – Correlação aproximada entre a qualidade ou vulnerabilidade dos edifícios e a taxa de mortos, dependendo da intensidade MM do sismo. Correlação válida para edifícios moderadamente irregulares e para solos intermédios [Tiedemann, 1990].

Como regra geral aplicável a nível mundial, Tiedemann [1992] estima que entre os residentes dos edifícios que sofrem danos elevados cerca de 1:4 a 1:8 morrerão. A razão entre o número de mortos e feridos varia, em média, entre 1:3 e 1:6. Esta razão poderá ser menor se a qualidade do edificado for elevada ou se a intensidade do sismo for baixa.

A este propósito importa referir McGuire [2004, citando Alexander, 1996] que aponta para razões entre mortos e feridos que variam, em média, entre 1:3 e 1:4, ressalvando porém que estas razões são provavelmente representativas de feridos graves e de feridos que requerem tratamento hospitalar, pois os feridos ligeiros podem ser muito mais numerosos, não sendo a maioria das vezes contabilizados. Refere ainda que este tipo de estimativas grosseiras apenas deverá ser aplicada a estudos preliminares.

## 2.6. Risco sísmico

### 2.6.1. Gestão do risco sísmico

Em termos gerais, a *gestão do risco* pode ser definida como o processo de tomar e implementar decisões que minimizem os efeitos adversos de perdas acidentais.

Almeida [2005] identifica o terramoto de Lisboa de 1755 como o acontecimento que marcou a génese do conceito actual de análise e gestão do risco, aplicado a desastres naturais, justificando esta ideia pelo impacto que o terramoto causou na sociedade ocidental, aliado às acções que foram tomadas após o desastre. Também Dynes [1997, citado por Fonseca, 2004] defende uma ideia semelhante ao afirmar que este terramoto foi o primeiro desastre em que o Estado se responsabilizou pela organização da resposta de emergência.

De acordo com EERI [2000] o processo de gestão do risco envolve cinco etapas (ver figura 2.16): (i) a avaliação do risco, (ii) a definição de estratégias exequíveis de gestão, (iii) a selecção da(s) melhor(es) estratégia(s), (iv) a implementação de um programa de gestão do risco e a (v) monitorização do mesmo.

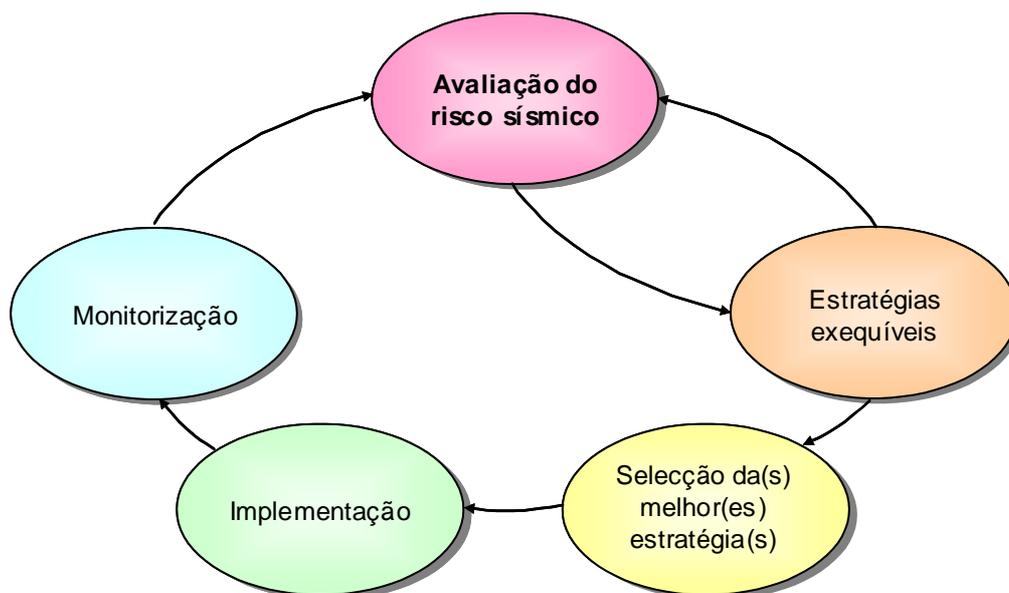


Figura 2.16 – Processo de gestão do risco [adaptado de EERI, 2000].

No domínio do risco sísmico a primeira etapa do processo mencionado consiste na sua avaliação para uma situação de referência, normalmente a situação actual. Como já foi referido na introdução, o objectivo principal do presente trabalho de investigação é o de avaliar o risco sísmico de Portugal Continental, isto é, tão só a primeira etapa do processo delineado. As restantes etapas do processo de gestão do risco sísmico são afluídas com brevidade nesta secção, não voltando a ser discutidas neste estudo.

A segunda etapa, definição de estratégias exequíveis, consiste em examinar várias técnicas de gestão do risco sísmico para diversos sectores e entidades. São exemplo destas técnicas [EERI, 2000]:

1. *Evitar a exposição* ao risco sísmico, ou seja, tomar a decisão de não incorrer em determinadas perdas em consequência de um sismo potencial. Por exemplo, a actuação ao nível da exposição ao risco sísmico, envolve intervenções ao nível de planeamento e ordenamento do território, auxiliadas por estudos de perigosidade sísmica e microzonagem. Pretende-se assim impedir, ou reduzir, a implantação de existências vulneráveis face à perigosidade sísmica da região, ou seja, intervir ao nível da quantidade e/ou valor dos elementos expostos. A exclusão de um local para a construção de uma estrutura importante devido à presença de falhas activas é um exemplo deste tipo de técnica. A demolição de edifícios vulneráveis, sem viabilidade de reabilitação, é outra alternativa para diminuir a exposição ao risco sísmico.
2. *A prevenção de perdas* procura reduzir a frequência provável de ocorrência de perdas para determinados elementos expostos ao risco sísmico. Por exemplo, o desenvolvimento e a aplicação efectiva de regulamentação sismo-resistente, para o projecto e construção de estruturas em zonas sísmicas, têm o objectivo de salvaguardar a segurança dessas estruturas relativamente a danos que envolvam, nomeadamente, perdas de vidas humanas.
3. *A mitigação ou a redução* das perdas tem o objectivo de diminuir a severidade das mesmas. Como dificilmente se consegue mitigar o risco actuando sobre a perigosidade (com excepção de alguns perigos colaterais), existem basicamente duas grandes alternativas para diminuir o risco sísmico, intervir ao nível da exposição, tal como foi referido no ponto 1, ou intervir ao nível da vulnerabilidade. Por exemplo, quando o elemento em risco é uma população a melhoria da eficácia das operações de emergência pode ser entendida como uma medida de redução da vulnerabilidade dessa população. Se os elementos em risco forem um conjunto de edifícios, o seu reforço sísmico é uma forma efectiva de reduzir a sua vulnerabilidade e a severidade de perdas futuras, em particular daqueles que foram edificados em épocas anteriores à da entrada em vigor da regulamentação moderna [EERI, 2000]. Nos últimos anos, a comunidade técnica e científica tem proposto a aplicação deste tipo de técnica de gestão de risco a Portugal, por exemplo nos já citados Programa Nacional de Redução de Vulnerabilidade Sísmica do Edificado [SPES & GECORPA, 2001] e no projecto de investigação «Mitigação do risco sísmico em Portugal» [Coelho, 2005b].
4. *A distribuição, diversificação ou separação da exposição* envolve a coordenação das actividades e recursos de uma organização de forma a evitar a concentração dos efeitos adversos de um evento sísmico. Por exemplo, uma companhia de seguros deverá evitar reunir elevado número de apólices de risco sísmico numa única região, especialmente se a sua perigosidade sísmica for elevada [EERI, 2000].

5. *Redundância e/ou duplicação* baseia-se na existência de cópias extra de informação crítica, recursos, ou capacidades. Por exemplo, um sistema de abastecimento de água de uma cidade pode ser dimensionado de forma a possuir condutas alternativas, ou sistemas de bombagem redundantes. Assim, reduzem-se as hipóteses do funcionamento do sistema ficar comprometido em consequência de danos provocados por um sismo [EERI, 2000].
6. *Transferência* é o procedimento formal através do qual as consequências financeiras de um fenómeno sísmico sobre elementos expostos transitam para outros. Por exemplo, os seguros são o mecanismo utilizado pelos indivíduos e organizações para transferir parte das suas perdas potenciais para as seguradoras [EERI, 2000].
7. *Retenção* consiste em assegurar parte ou a totalidade das consequências adversas de um sismo. Por exemplo, um proprietário de um edifício poderá optar por não contratar um seguro que inclua a cobertura de risco sísmico, já que a sua percepção do fenómeno o leva a concluir que não se encontra sujeito a esse tipo de risco [EERI, 2000]. A decisão de autoridades competentes de não reduzir a vulnerabilidade actual do parque habitacional, aguardando que a sua renovação natural garanta a mitigação do risco sísmico, é outro exemplo de retenção do risco.

A terceira etapa do processo de gestão do risco sísmico consiste em seleccionar a melhor técnica ou estratégia de gestão de risco, ou a combinação de mais do que uma técnica, tendo em consideração alguns constrangimentos, nomeadamente operacionais, ambientais, políticos e económicos. Por exemplo, se a opção for mitigar o risco do parque edificado é necessário decidir quais as prioridades de intervenção, escolhendo a região, as tipologias e as soluções de reforço a serem implementadas. Devem comparar-se os efeitos relativos das diferentes estratégias de mitigação e examinar-se a variação futura do risco [Coburn & Spence, 2002], considerando, se possível, a evolução temporal do parque. Existem diversos procedimentos para seleccionar uma dada estratégia, tais como [Gupta, 1997]:

1. A análise *custo-benefício* em que se comparam as razões entre os custos e os benefícios das estratégias executáveis e se escolhe a de menor razão. Para o efeito é necessário prever os benefícios das diversas estratégias executáveis, reavaliando o risco sísmico face a intervenções seleccionadas e comparando-o com o risco na situação inicial. Os benefícios deverão ser convertidos em valores monetários equivalentes para serem comparados com os custos das estratégias executáveis, entretanto avaliados.
2. A análise do *custo por vida salva*, em que, para cada estratégia, se estima o seu custo e se divide pela redução de perdas de vida humanas.
3. O método do *custo-eficácia* em que comparam os custos de diferentes estratégias, tendo por base a obtenção de um nível de benefícios previamente definido.
4. A *optimização da distribuição de recursos* em que se optimizam os benefícios face aos recursos disponíveis, muitas vezes insuficientes.

A implementação da estratégia seleccionada, a quarta etapa do processo, é condicionada pela existência de um motivo, dos meios e da oportunidade para a sua execução [Davidson, 1997]:

1. O motivo resulta, por um lado, da percepção da sociedade para a existência do problema do risco sísmico e, por outro, de surgir o desejo para o resolver, o que passa pela compreensão de que este tipo de risco é inaceitavelmente severo face a outros que existam. Conduzir esta etapa a bom termo depende da capacidade que a comunidade técnica e científica tem para comunicar o problema. A comunicação do risco é uma tarefa que pode ser facilitada pela formação adequada do público-alvo, pela sua cultura de risco e, ainda mais, pela ocorrência de um desastre recente, ou por uma frequência elevada de ocorrências desastrosas.
2. Os meios englobam os conhecimentos, a capacidade organizativa e a disponibilidade de recursos financeiros para gerir o risco.
3. Finalmente, a oportunidade para implementar a estratégia, também depende de conjunturas diversas. Por exemplo, a realização de obras de remodelação de edifícios constitui uma boa oportunidade para implementar uma estratégia de gestão do risco sísmico, condicionada obviamente pela existência de meios e motivo para as efectuar.

A gestão do risco sísmico não ficará completa se a sua monitorização, ou a quinta etapa do processo, não for efectuada de forma recorrente. Como a vulnerabilidade e valor dos elementos em risco variam naturalmente com o tempo e, de forma mais acentuada quando ocorrem intervenções relevantes, é importante acompanhar as estratégias implementadas e avaliar a sua adequação [EERI, 2000]. Tem-se assim um processo dinâmico que poderá ter que ser reiniciado face a novas circunstâncias.

### 2.6.2. Modelação probabilística do risco sísmico

O modelo utilizado para a avaliação probabilística da perigosidade sísmica pode ser generalizado para a avaliação probabilística do risco sísmico, ou seja, o teorema da probabilidade total (expressão 2.2) pode ser aplicado para estimar a probabilidade de excedência da variável aleatória perda,  $L$ .

Neste caso o acontecimento  $A$  corresponde a  $L > l$  e a integração é efectuada para todos os valores possíveis das variáveis aleatórias que caracterizam um sismo, que ocorre numa dada zona  $k$ , desde a sua origem até ao local em estudo, bem como a sua interacção com o local em estudo. Por analogia com a expressão 2.5 tem-se:

$$P(L > l)_k = \int \int_{RM} P(L > l) | m, r)_k f_M(m)_k f_R(r)_k dm dr \quad (2.46)$$

McGuire [2004] admite que este tipo de formulação quase nunca é utilizado na avaliação probabilística do risco sísmico. Como a maioria das perdas causadas por um sismo

estão relacionados com o movimento vibratório do solo, o procedimento convencional envolve avaliar o risco depois de se estimar a probabilidade de um nível de dano  $d$  ser excedido para toda a possível gama de variação da perigosidade sísmica e para uma dada tipologia construtiva de vulnerabilidade  $V = v$ , ou seja:

$$P_D(D > d)_v = \int_H P_D(D > d | h)_v f_H(h) dh \quad (2.47)$$

em que  $f_H(h)$  é a função de densidade de probabilidade da perigosidade sísmica, obtida por diferenciação da função cumulativa apresentada na expressão 2.14:

$$f_H(h) = -\frac{d[P(H > h)]}{dh} \quad (2.48)$$

Efectivamente, a avaliação probabilística directa do risco sísmico (expressão 2.46) exigiria que fossem estudadas as perdas (ou os danos) originadas por um grande número de eventos que cobrissem uma vasta gama de magnitudes e distâncias, por forma a ser possível estabelecer, para cada zona de geração  $k$ , uma função de distribuição das perdas, condicional à magnitude e à distância, ou seja,  $P(L > l) | m, r)_k$ .

Na prática, a janela temporal de recolha de informação histórica sobre perdas é muito estreita, não cobrindo o impacto de eventos com período de retorno elevado e impedindo a utilização de abordagens empíricas fiáveis para a estimativa de perdas [Shah & Dong, 2005]. Possivelmente por esta razão, não existe informação publicada sobre modelos de atenuação expressos em termos da variável perda. Desta forma, a modelação matemática do risco sísmico é realizada conduzindo, em primeiro lugar, a análise probabilística da perigosidade sísmica, convertendo, pela expressão 2.47, a perigosidade em dano, e traduzindo os descritores de dano em perdas económicas ou em perdas de outro tipo (*e.g.* perdas humanas).

Na figura 2.17 esquematiza-se a formulação expressa pela equação 2.47 para uma dada tipologia construtiva traçando-se uma função extra que transforma os quantitativos de edifícios nos vários estados de dano em valores de perdas.

A função densidade de probabilidade da perigosidade sísmica no local em análise encontra-se traçada no eixo horizontal da metade direita da figura 2.17. Para um dado valor de perigosidade, é obtido um valor médio de dano sobre a curva de vulnerabilidade (expressão 2.28) e uma dispersão fornecida pela curvas de fragilidade sísmica da tipologia construtiva, descritas pelos métodos de avaliação de dano, estatísticos ou analíticos, da secção 2.4 (quadro 2.1, figura 2.4 e expressões 2.24, 2.31 e 2.39). No quadrante superior direito da figura 2.17 representa-se a função densidade de probabilidade condicional do dano e a área a verde exprime o valor da respectiva função cumulativa de distribuição, para um dado nível de perigosidade  $H = h$ . Procedendo à integração da probabilidade condicional do dano para todos os valores de perigosidade obtém-se a distribuição de probabilidade do dano, descrita pela sua função de densidade de probabilidade, a amarelo, sobre o eixo vertical da parte superior da

figura 2.17. Por último, convertem-se os indicadores de dano em perdas económicas ou nouro tipo de perdas (humanas, etc.). No quadrante superior esquerdo da figura 2.17 ilustra-se uma função de perdas utilizada nessa conversão e no quadrante inferior esquerdo a distribuição de probabilidade das perdas, obtida de forma análoga à da distribuição de probabilidade dos danos.

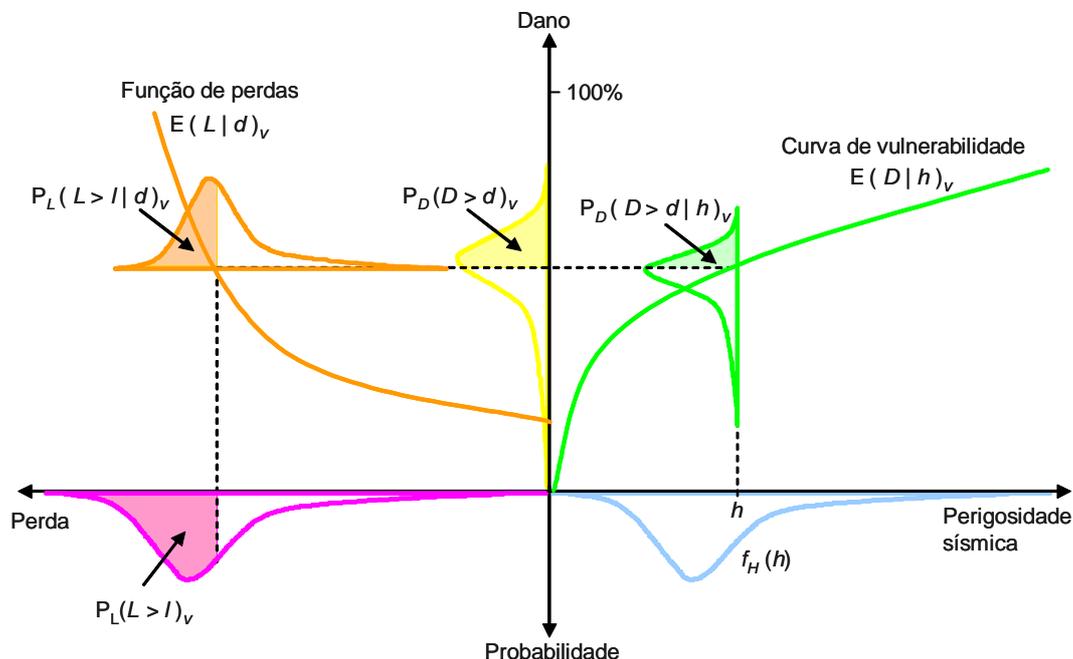


Figura 2.17 – Esquema para a avaliação do risco sísmico de uma tipologia construtiva de vulnerabilidade  $V = v$  [adaptado de Campos Costa, 2004].

Para se obter uma estimativa das perdas económicas devidas aos danos dos edifícios, associou-se um custo de reparação a cada estado de dano, utilizando a grandeza adimensional *factor de dano*,  $DF_d$ , definida como a razão entre o custo de reparação de um edifício, num determinado estado de dano, e o valor global de reposição do edifício [ATC, 1985].

Os factores de dano aplicados na presente pesquisa (quadro 2.9) são os utilizados na metodologia FEMA & NIBS e pela Protecção Civil Italiana [Di Pasquale *et al.*, 1999 e SSN, 1998], aplicados, respectivamente, aos estados de dano estrutural da metodologia mecanicista e aos graus de dano de escalas de intensidade macrossísmica.

Quadro 2.9 – Conversão de indicadores de dano em perdas económicas.

Estados de dano estrutural	Factor de dano [%] FEMA & NIBS [1999]
Dano Ligeiro	2
Dano Moderado	10
Dano Severo	50
Dano Total	100

Graus de dano (escalas MSK e EM-98)	Factor de dano [%] [SSN, 1998]
1	1
2	10
3	35
4	75
5	100

Na prática, a tradução dos estados e graus de dano em percentagens de valores de reposição, conduz à obtenção de um índice de perdas que não é mais do que um valor médio das perdas, condicionado por um nível de perigosidade sísmica, obtido pela ponderação, através dos factores de dano, dos quantitativos dos edifícios que se encontram num dado estado de dano e que pertencem a uma determinada classe de vulnerabilidade, conforme a seguir se equaciona:

$$E(L|h) = Ne_T \cdot \sum_d \sum_v A_v \cdot DF_d \cdot P_D(D=d|h)_v \cdot P_V(V=v) \quad (2.49)$$

em que,

$Ne_T$  é o número total de edifícios na região em análise;

$A_v$  representa a superfície média dos edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade  $V = v$  na região em análise;

$P_D(D = d | h)_v$  representa a matriz de probabilidade de dano, interpretada como a percentagem de edifícios da classe de vulnerabilidade  $V = v$  que se encontra no estado de dano  $d$ , quando sujeitos a uma acção sísmica de severidade  $h$ ;

$P_V(V = v)$  é a probabilidade dos edifícios da região em análise pertencerem à classe de vulnerabilidade  $V = v$ , assumida igual à frequência das classes de vulnerabilidade nessa região.

A introdução da superfície média dos edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade  $V = v$  na expressão 2.49 resulta na avaliação da exposição  $E$  em termos da área total habitada da região em análise:

$$E = Ne_T \cdot \sum_v A_v \cdot P_V(V = v) \quad (2.50)$$

Neste caso, as perdas económicas esperadas são avaliadas pela área perdida equivalente, condicionada por um dado nível de perigosidade sísmica. Se forem introduzidos preços indicativos para a construção, então a exposição  $E$  passa a ser avaliada, monetariamente, em termos do valor de reposição do parque habitacional da região em análise,  $VRPH$ .

Tendo em conta que graças à expressão 2.49 se transformaram os danos em edifícios num valor esperado de perdas, condicional à perigosidade sísmica,  $E(L|h)$ , então o valor esperado das perdas para um dado período de tempo e região escreve-se simplesmente:

$$E(L) = \int_H E(L|h) f_H(h) dh \quad (2.51)$$

Se a análise probabilística da perigosidade sísmica for avaliada por uma probabilidade ou por uma taxa de excedência correspondente a um intervalo de tempo de um ano, a

expressão anterior exprime o *valor esperado anual das perdas económicas* em consequência de sismos, que se designa simplesmente por *AEL*<sup>21</sup>.

No capítulo 7 do presente trabalho são ainda avaliados outros indicadores de risco para além do *AEL*.

No que concerne ao risco absoluto se, em lugar dos edifícios, forem analisados os indivíduos que neles habitam, tem-se, por analogia com *AEL*, o *valor esperado anual das perdas humanas*, designado de *AED* que será avaliado no capítulo 7.

No que diz respeito ao risco específico, vão ser estimados os indicadores *AELR*<sup>22</sup>, *AELC* e *AEDR*, que são, respectivamente: (i) o valor esperado anual das perdas económicas normalizadas pelo valor de reposição do parque habitacional da região, *VRPH*, (ii) o valor esperado anual das perdas económicas normalizadas pela população total, *Np<sub>T</sub>*, residente na região, ou seja, as perdas económicas *per capita*, e (iii) o valor esperado anual das perdas humanas também normalizadas pela população total residente na região. Formalizando matematicamente as relações entre indicadores de risco:

$$AELR = AEL / VRPH \tag{2.52}$$

$$AELC = AEL / Np_T \tag{2.53}$$

$$AEDR = AED / Np_T \tag{2.54}$$

Note-se que, enquanto os indicadores de risco *AEL* e *AED* fornecem uma medida absoluta do risco, os indicadores de risco específico constituem medidas de risco normalizadas, que permitem controlar as diferenças de exposição e facilitam a comparação do risco entre regiões.

No quadro 2.10 exhibe-se uma matriz que organiza os indicadores de risco que serão utilizados no capítulo 7.

*Quadro 2.10 – Matriz dos indicadores do risco sísmico esperado anual utilizados neste trabalho.*

Risco	Absoluto	Específico
Económico	<i>AEL</i>	<i>AELR e AELC</i>
Humano	<i>AED</i>	<i>AEDR</i>

<sup>21</sup> Na literatura inglesa *AEL* significa *Annualized Earthquake Loss* [FEMA, 2001].

<sup>22</sup> Na literatura inglesa *AELR* significa *Annualized Earthquake Loss Ratio* [FEMA, 2001].

### 2.6.3. Problemática da acumulação do risco sísmico

A avaliação da distribuição das perdas globais de elementos em risco distribuídos por um conjunto de  $N_S$  locais de uma região, baseia-se em métodos de análise mais sofisticados do que a simples utilização de um mapa de perigosidade e de curvas de fragilidade, pois exige que se considerem as possíveis dependências entre perdas individuais em locais distintos.

EERI [2000] identifica três tipos possíveis de dependência entre perdas individuais: (i) a dependência física, (ii) a funcional e (iii) a estatística. Esta secção tratará da dependência estatística entre perdas individuais, mais concretamente da correlação entre níveis de perigosidade distribuídos espacialmente e também da correlação espacial entre as perdas de uma região.

À parte desta matéria, referem-se neste parágrafo duas situações que ilustram os outros dois tipos de dependência entre perdas: (i) por exemplo, as perdas nos recheios dos edifícios, além de serem uma consequência directa do movimento vibratório, dependem fisicamente dos danos no edificado; (ii) outro exemplo, os efeitos da interrupção do funcionamento das redes de infra-estruturas sobre diversos tipos de actividades económicas ilustram as dependências do tipo funcional [EERI, 2000].

Numa região em que os elementos em risco se encontram distribuídos espacialmente a perda média acumulada resulta da soma das perdas médias dos elementos individuais. Porém, existindo dependência estatística entre as perdas individuais, a variância da perda global não resulta simplesmente da soma das variâncias das perdas individuais, pois também deverá ser considerada a correlação existente entre as perdas [EERI, 2000].

Na prática, numa região sísmica verifica-se a existência de correlação entre a perigosidade de locais distintos, bem como entre os danos (ou as perdas) induzidas pelos eventos sísmicos nesses locais [Chen & Scawthorn, 2003].

No caso da perigosidade sísmica, as intensidades do movimento geradas em locais diferentes dependem de variáveis ligadas à fonte, ao meio em que o movimento sísmico se propaga e às condições do local em análise. Se essas intensidades resultarem de eventos com fonte comum elas estarão obviamente correlacionadas. Acresce que, se é razoável esperar que para locais relativamente próximos, existam semelhanças nas condições de propagação do movimento sísmico e na geologia superficial, também é razoável esperar que a variabilidade da perigosidade, ou o desvio em relação ao seu valor esperado, estejam correlacionados de local para local. Essa correlação deverá assim ser elevada entre locais próximos e reduzida para sítios que não partilhem as mesmas condições geológicas locais.

Na caso da avaliação dos danos, dado um nível da perigosidade sísmica, é natural que a resistência sísmica das estruturas de uma dada região também se encontre correlacionada entre locais que se encontrem próximos, devido a práticas construtivas comuns, típicas de uma dada época de construção. Em contrapartida, as correlações espaciais das perdas tendem

a diminuir para estruturas que não partilham as mesmas curvas de fragilidade, ou seja, a correlação das perdas será mais reduzida para tipologias diferentes [Wesson & Perkins, 2001].

Chen & Scawthorn [2003] explicam que negligenciar a correlação espacial, assumida positiva, quer na perigosidade quer nos danos ou perdas, resulta numa sub-estimativa dos desvios das perdas agregadas para locais múltiplos (ver equação 2.55). Por outras palavras, uma análise que assuma a independência das variáveis aleatórias entre locais distintos conduz a uma sub-estimativa das probabilidades de excedência das caudas da distribuição das perdas agregadas, isto é, quanto mais elevada for a correlação espacial, maior é a variância das perdas agregadas e mais prováveis se tornam os respectivos valores extremos [Wesson & Perkins, 2001].

Em suma, o conhecimento da correlação espacial não é necessário para a obtenção do valor esperado das perdas acumuladas para um conjunto de elementos em risco distribuídos numa região, mas é essencial para a compreensão da distribuição das perdas em torno desse valor esperado e para a determinação da variância das perdas agregadas [Wesson & Perkins, 2001].

A variância das perdas,  $\sigma_L^2$ , agregadas para um conjunto de  $N_S$  locais onde se analisam as perdas individuais vem dada por [Chen & Scawthorn, 2003 e Wesson & Perkins, 2001]:

$$\sigma_L^2 = \sum_{j=1}^{N_S} \sigma_{Lj}^2 + 2 \cdot \sum_{j=1}^{N_S-1} \sum_{j'=j+1}^{N_S} \rho_{jj'} \sigma_{Lj} \sigma_{Lj'} \quad (2.55)$$

em que,

$\rho_{jj'}$  é o coeficiente de correlação entre as perdas dos locais  $j$  e  $j'$ , e

$\sigma_{Lj}$  e  $\sigma_{Lj'}$  são os desvios padrão das perdas nos locais  $j$  e  $j'$ , respectivamente.

McGuire [2004] sustenta que o cálculo das correlações espaciais do movimento sísmico e das perdas é uma tarefa imensa, normalmente substituída por métodos numéricos de simulação de Monte Carlo.

Wesson & Perkins [2001] publicaram um método directo alternativo, sem recurso a simulações, que reduz o montante de cálculos necessários para a estimativa da correlação do movimento do solo, e das perdas, entre pares de locais de uma região. Para o efeito, os autores generalizam a definição de frequência de excedência de um dado local, para uma frequência de excedência conjunta de dois locais, que se exprime por uma *superfície de perigosidade sísmica*, em lugar de ser representada simplesmente por uma curva de perigosidade sísmica. Por sua vez, esta frequência de excedência é usada para calcular a distribuição de probabilidade conjunta da perigosidade, a distribuição de probabilidade conjunta das perdas e os coeficientes de correlação, entre pares de locais, tanto da perigosidade como das perdas.

Por fim, neste trabalho propõe-se a utilização de determinados cenários de ocorrência, baseados na desagregação da perigosidade sísmica, para obviar a correlação espacial da perigosidade.

### 2.6.4. Incerteza na avaliação do risco sísmico

Existem basicamente dois tipos de variabilidade que afectam os resultados de um estudo de avaliação de risco sísmico [Chen & Scawthorn, 2003; EERI, 2000; McGuire, 2004 e SSHAC, 1997].

Um deles é a aleatoriedade, também designada de *incerteza aleatória*, que corresponde à incerteza probabilística inerente à natureza do próprio fenómeno, que pode ser, por exemplo, um processo estocástico, e que não pode ser reduzida pela recolha e análise de mais informação, ou de dados experimentais. A incerteza aleatória encontra-se naturalmente integrada na própria distribuição probabilística das perdas.

O outro tipo de variabilidade denomina-se de *incerteza epistémica* que deriva do conhecimento incompleto do fenómeno e que, como tal, afecta a sua modelação. A incerteza epistémica pode ser reduzida pela recolha de informação de melhor qualidade, ou pela utilização de modelos mais rigorosos. Em suma, actuar sobre a incerteza epistémica significa um maior esforço de investigação. A incerteza epistémica pode, por sua vez, ser subdividida em mais categorias, tais como a variabilidade do conhecimento, a variabilidade dos dados e a incerteza dos modelos [EERI, 2000].

Tipicamente, na avaliação do risco sísmico a incerteza epistémica é modelada por árvores lógicas, que permitem considerar, e acumular, o desconhecimento envolvido nas várias etapas do procedimento, permitindo fornecer intervalos de confiança para a distribuição das perdas [EERI, 2000]. Esses intervalos de confiança serão tanto mais estreitos quanto mais refinados forem os modelos ou a qualidade dos dados.

No quadro 2.11 dão-se exemplos dos dois tipos de incerteza mencionados.

*Quadro 2.11 – Exemplos de incerteza aleatória e epistémica nos estudos de risco sísmico [adaptado de EERI, 2000 e de McGuire, 2004].*

Incerteza aleatória	Incerteza epistémica
Localização de sismos futuros	Geometria das zonas de geração
Propriedades da fonte de sismos futuros (e.g. magnitude)	Parâmetros das distribuições que descrevem a fonte (e.g. $v_k$ , valor $b_k$ , $m_{max}$ )
Instante de ocorrência de sismos futuros	Mediana do modelo de atenuação dada as propriedades da fonte e do local em análise
Detalhes do processo de rotura na falha (e.g. direcção da rotura)	Modelo dinâmico do efeito dos solos
Variabilidade da resposta sísmica dos solos	Inventário dos elementos em risco
Variabilidade das características estruturais e do desempenho sísmico das estruturas	Modelos de vulnerabilidade e danos Modelos de perdas humanas
	Percentagem de valores de reposição e de reparação

### 2.6.5. Modelação de perdas

Nesta secção listam-se os quatro procedimentos aplicados neste trabalho de investigação para modelar as perdas em consequência de sismos, visando tirar partido das vantagens e desvantagens da selecção determinística e probabilística da acção sísmica, bem como ensaiar o compromisso proposto entre a opção por cenários de ocorrência determinísticos e probabilísticos:

1. *A simulação de perdas para cenários sísmicos de ocorrência* em que estas são avaliadas a partir de cenários de ocorrência postulados antecipadamente, tais como: (i) eventos descritos por uma acção sísmica semelhante à de sismos ocorridos no passado, (ii) eventos simulados a partir das características da sismicidade da região, ou (iii) sismos ocorridos em tempo quase real. Em rigor, este procedimento não deveria ser apelidado de determinístico, pois apesar da acção sísmica assim o ser, no processo de avaliação das perdas são envolvidas variáveis aleatórias, estando-se perante uma análise probabilística condicionada pela ocorrência de um determinado evento [EERI, 2000]. O procedimento é exposto no capítulo 6.
2. *A análise probabilística do risco sísmico*, em que se constrói um modelo probabilístico para avaliação de perdas, que trata muitas das variáveis envolvidas como aleatórias, englobando, nomeadamente, a análise probabilística da perigosidade sísmica (secção 2.3) e um modelo probabilístico da fragilidade (secção 2.4). O procedimento foi descrito na secção 2.6.2 e será aplicado aos concelhos do território Continental nas secções 7.3 e 7.4. A partir desta análise poderão ser calculadas alguns indicadores de risco, tais como os valores esperados das perdas anuais, económicas e humanas na região em consequência de sismos na região. Contudo, os mapas de perigosidade sísmica só poderão ser utilizados, com certas precauções, para calcular a distribuição do risco acumulado em regiões extensas (secção 7.5.1), devido à existência da correlação espacial na perigosidade, danos e perdas da região (ver secção 2.6.3).
3. *A simulação de perdas para o catálogo sísmico* que constitui uma generalização do procedimento apresentado no primeiro ponto para todos os sismos que afectaram a região e que constam do respectivo catálogo sísmico. Teoricamente, se o catálogo for completo os resultados podem sofrer um tratamento estatístico, investigando-se um possível ajuste de distribuições de probabilidade teóricas às perdas obtidas. O procedimento foi ensaiado na secção 7.5.2.
4. *A simulação de perdas com base na desagregação da perigosidade sísmica*, que é o procedimento que foi acima proposto, que foi iniciado na secção 2.3.3, em que se expõem os fundamentos teóricos relativos à desagregação da perigosidade sísmica, e que terá continuidade na secção 7.5.3, em que se avaliam os cenários regionais de risco sísmico e a incerteza a eles associados.

## 2.7. Considerações finais

Apresentou-se o estado da arte sobre o tema do risco sísmico incidindo particularmente sobre as múltiplas metodologias que, no presente trabalho, serão aplicadas para a avaliação do risco em Portugal Continental.

Começou por se mencionar alguns estudos efectuados em Portugal no campo do risco sísmico, encarado em sentido lato, bem como estudos sobre etapas parcelares do processo. Seguiu-se a definição dos conceitos utilizados para clarificar a leitura do trabalho e a formalização matemática dos mesmos. A organização deste capítulo não seguiu, em rigor, as três componentes fundamentais que englobam uma análise do risco sísmico: (i) a análise da perigosidade sísmica, (ii) o inventário dos elementos expostos e (iii) a avaliação da sua vulnerabilidade. De facto, omitiram-se os fundamentos metodológicos da inventariação, dedicando-se-lhe exclusivamente um capítulo de aplicação a Portugal Continental, o capítulo 4.

No que toca às metodologias, a secção 2.3 abordou o tema da perigosidade sísmica, as secções 2.4 e 2.5 detalharam, respectivamente, os procedimentos relativos à vulnerabilidade do edificado e à dos elementos humanos em risco. Por fim, na secção 2.6 descreveram-se os passos metodológicos a ser aplicados na avaliação do risco sísmico e discutiram-se diversos problemas que surgem neste tipo de avaliações.

### *Perigosidade sísmica*

A avaliação da perigosidade sísmica de Portugal Continental não constitui uma abordagem inovadora, devendo antes ser encarada como uma primeira etapa necessária à desagregação da perigosidade e a posteriores avaliações probabilísticas de perdas.

Relativamente à desagregação da perigosidade sísmica, é a primeira vez que, em Portugal, se propõe aplicar uma análise de desagregação a quatro dimensões, englobando as variáveis magnitude, localização ( $X$  e  $Y$ ) e desvio. Esta abordagem aparenta ser promissora em termos dos resultados que fornecerá, nomeadamente a compreensão da influência sobre a perigosidade das variáveis envolvidas e a identificação de um cenário de ocorrência dominante, consistente com os níveis de perigosidade seleccionados para a análise.

### *Vulnerabilidade sísmica e danos de edifícios*

A avaliação da vulnerabilidade sísmica e danos é dividida em dois tipos de abordagens, a estatística e a mecanicista. Tecem-se algumas considerações sobre estes modelos que derivam do que atrás foi exposto.

Os apologistas dos métodos estatísticos sustentam que, na Europa, o emprego regular de métodos mecanicistas de avaliação da vulnerabilidade sísmica ainda requer uma validação experimental robusta, pelo menos no que toca aos edifícios de alvenaria [Giovinazzi & Lagomarsino, 2003], razão pela qual, a aplicação de métodos estatísticos, baseados em levantamento de danos, prevalece nesta região.

Giovinazzi & Lagomarsino [2004] defendem ainda que uma das vantagens do respectivo modelo de vulnerabilidade é a sua aplicabilidade a qualquer região da Europa, à semelhança da escala EM-98, ao contrário dos restantes métodos estatísticos que são fortemente condicionados pelas características construtivas da região em que os levantamentos de dano pós-sismo foram efectuados.

Por outro lado, a aplicação dos métodos de levantamento de danos incorrerá em grandes incertezas decorrentes dos próprios erros das estatísticas de danos utilizadas, da dificuldade de adequação de uma classificação tipológica do edificado Português às classes de vulnerabilidade adoptadas nos modelos e ainda à utilização de uma grandeza subjectiva e não espectral para traduzir a intensidade do movimento do solo.

Obviamente os métodos mecanicistas, se bem que de difícil calibração, têm a vantagem de recorrerem critérios mecânicos para definir a capacidade estrutural dos edifícios [Calvi *et al.*, 2005] e reproduzir o seu comportamento físico esperado. Os métodos mecanicistas baseiam-se geralmente em acções sísmicas traduzidas por um espectro de resposta, pelo que podem ter em conta a relação entre o conteúdo em frequência do movimento e o período dominante de vibração dos edifícios [Calvi *et al.*, 2005]. Como os métodos mecanicistas consideram aspectos ligados ao dimensionamento sísmico das estruturas, são mais facilmente aplicáveis a estruturas com projecto de engenharia.

A utilização do modelo de danos de Zuccaro & Papa, para além do modelo de Di Pasquale & Orsini, prende-se com o facto do primeiro incluir estruturas de betão armado na construção das respectivas matrizes de probabilidade de dano.

A evolução dos modelos teóricos e a crescente disponibilidade de dados estatísticos para os tipos de estruturas usualmente menos afectadas pelos sismos, permitem preconizar que, no futuro próximo, se evolua para a convergência entre as metodologias estatísticas e as mecanicistas, no sentido em que as primeiras conduzam à calibração das segundas, por exemplo através do melhor ajuste de parâmetros ou de inferência Bayesiana [Coelho *et al.*, 1999a].

Estudos sofisticados de avaliação de vulnerabilidade avançam para o desenvolvimento das chamadas abordagens sistémicas ou abordagens de vulnerabilidade generalizada. As primeiras consideram, por exemplo, a vulnerabilidade de um sistema urbano [Zonno *et al.*, 1999] e as segundas [Sandi, 1999] consideram a vulnerabilidade variável ao longo do período de exposição analisado, revelando-se, no entanto, de difícil aplicação face à ausência de dados disponíveis.

### ***Vulnerabilidade sísmica e perdas humanas***

Relativamente às metodologias para a avaliação das perdas humanas constata-se que existe um número elevado de procedimentos, com diversos graus de complexidade e detalhe, dependentes do conjunto de dados disponíveis, ou a colectar, e da diferenciação exigida aos especialistas que as aplicam. A generalidade dos métodos requer o inventário da população na

região afectada, a estimativa da acção sísmica no local e o número de edifícios danificados, se possível, por tipologia construtiva.

A principal conclusão a retirar sobre os modelos de avaliação de perdas humanas apresentados é que as estimativas de mortos e feridos serão sempre afectadas de incerteza elevada. A existência de um grande número de métodos para estimar as perdas humanas em consequência de sismos, reflecte as dificuldades destas avaliações, resultantes da grande heterogeneidade do número de vítimas sujeitas a uma acção sísmica semelhante, acrescidas dos dados documentais serem muito pobres, existindo pouca fiabilidade e grandes lacunas nas estatísticas pós-sismo.

### ***Risco sísmico***

Finalmente, sobre os métodos de avaliação do risco sísmico, começou por se enquadrar este procedimento num processo mais lato de gestão do risco, e abordaram-se os temas complexos da correlação espacial da perigosidade, da correlação espacial do risco e das incertezas na avaliação do risco. Note-se que a conversão dos indicadores de dano em perdas económicas poderá constituir outra fonte de grande incerteza nos procedimentos de avaliação do risco.



### 3. PERIGOSIDADE SÍSMICA E ANÁLISE DE DESAGREGAÇÃO

#### 3.1. Introdução

Decorreram já duas décadas desde o estabelecimento, em Portugal, das acções sísmicas para efeitos regulamentares [RSA, 1983], ao longo das quais a reavaliação da perigosidade sísmica se tem pautado por desenvolvimentos sucessivos em termos de métodos e de ferramentas de cálculo e em termos de um melhor conhecimento da fenomenologia do processo de geração dos sismos na fonte, da propagação da energia desde a fonte até aos locais em análise e dos efeitos dos solos nesses locais.

No presente capítulo procede-se à reavaliação da perigosidade sísmica no território Continental, recorrendo-se, desta feita, a metodologias específicas, de base probabilística, com o objectivo de se efectuar a análise de desagregação e identificar os cenários de ocorrência que dominam a perigosidade sísmica de um local (ver secção 2.3.3). A esses cenários de ocorrência específicos chamaram-se *cenários de perigosidade sísmica*.

Tendo presentes os objectivos deste capítulo, a perigosidade sísmica foi reavaliada seguindo um modelo de cálculo misto [Frankel, 1995 e Montilla, 2000] em que parte dos parâmetros dos modelos probabilísticos são avaliados de forma discreta e heterogénea em células de dimensão criteriosamente seleccionada, continuando os restantes parâmetros a ser tratados de forma homogénea em cada zona de geração, ou de sismogénese.

Neste contexto tomou-se a resolução de serem utilizados, nesta avaliação, alguns dos parâmetros dos modelos probabilísticos apresentados no trabalho de Sousa [1996] e de se reverem, apenas, os valores dos parâmetros de cálculo que são independentes das zonas de geração.

Para o efeito, utilizou-se do trabalho de Sousa [1996] a delimitação das zonas de geração, embora com modificações ligeiras, e utilizaram-se os seguintes parâmetros dos modelos que lhes estão afectos: (i) a inclinação das leis de recorrência-magnitude, (ii) a caracterização do potencial máximo de libertação de energia de cada zona e (iii) a atenuação dos movimentos sísmicos. Por outro lado, foram revistas: (i) a distribuição espacial da sismicidade, que foi construída a partir da distribuição empírica da localização dos epicentros dos sismos constantes do catálogo da região, e (ii) as taxas médias de ocorrência de sismos na região, que foram reavaliadas a partir das contribuições de células elementares.

Na secção 3.3, faz-se uma breve retrospectiva dos dados de base e dos parâmetros dos modelos probabilísticos de avaliação da perigosidade sísmica publicados por Sousa [1996]. Apresentam-se, também, as estimativas dos novos parâmetros com vista a efectuar a análise da desagregação da perigosidade sísmica. As opções tomadas relativas aos modelos de atenuação dos movimentos sísmicos são discutidas na secção 3.3.4, quer no contexto da

avaliação da perigosidade sísmica, quer no âmbito da sua utilização no programa de simulação de cenários sísmicos descrito no capítulo 6.

A reavaliação da perigosidade sísmica é efectuada na secção 3.4. Adicionalmente ajustam-se os parâmetros de uma distribuição de probabilidade teórica às curvas de perigosidade obtidas em cada concelho. Este procedimento permite descrever analiticamente e de forma compacta a perigosidade da região, através de apenas quatro parâmetros por concelho, e facilita a aplicação expedita dos modelos de risco sísmico do capítulo 7. Nesta secção 3.4 chama-se o anexo A que contém dois mapas ilustrativos da divisão do território Continental em termos de NUTS II e III e de distritos e ainda da localização geográfica dos concelhos que vão sendo mencionados ao longo desta tese.

Na secção 3.5 efectua-se a análise de desagregação da perigosidade sísmica, caracterizando-se os cenários que dominam essa perigosidade na secção 3.5.5. Nesta secção evoca-se o anexo B que lista os cenários de perigosidade sísmica dos 278 concelhos do Continente Português.

Na secção 3.6 faz-se uma breve comparação com os resultados de outros estudos de perigosidade sísmica e de desagregação efectuados para a mesma região.

O capítulo termina com a secção 3.7 em que se reúnem as principais conclusões do presente estudo de perigosidade sísmica, sua desagregação e identificação de cenários e em que se apontam desenvolvimentos futuros.

## 3.2. Determinação de cenários de perigosidade sísmica

Resume-se, em quatro etapas, o procedimento implementado para a determinação de um cenário de perigosidade sísmica para cada concelho; especificam-se as secções deste capítulo em que cada etapa é cumprida:

1. Determinam-se as curvas de perigosidade sísmica para um dado concelho do Continente (secções 3.3 e 3.4) tendo em consideração a distribuição espacial da actividade sísmica na região. Identifica-se, desta forma, para esse concelho, os diferentes níveis de perigosidade sísmica,  $h$ , associados a certos níveis de probabilidade de excedência, ou períodos de retorno, especificados.
2. Para um dado período de retorno, efectua-se a análise de desagregação 4D da perigosidade sísmica para o local (secção 3.5), ou seja, determina-se a distribuição de densidade de probabilidade conjunta  $f_{M(X,Y),\epsilon}(m,(x,y),\epsilon|H > h)$  condicionada pela excedência do nível de perigosidade sísmica especificado, na etapa anterior, para o concelho em estudo. Esta densidade de probabilidade conjunta é dada pela expressão 2.19 (secção 2.3.3) em que a variável aleatória distância,  $R$ , foi generalizada para as variáveis aleatórias  $(X, Y)$  que determinam a localização geográfica, da fonte de sismicidade.

3. O cenário de perigosidade sísmica do concelho é definido pelo valor modal,  $\hat{M}$ ,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Y}$ ,  $\hat{z}$ , da distribuição de probabilidade conjunta condicionada pela excedência do nível de perigosidade sísmica especificado,  $h$ , ou seja, pelo evento que mais provavelmente gera no local o movimento sísmico que excede o nível de perigosidade sísmica,  $h$  (secção 3.5.5). Deste modo, o cenário de perigosidade sísmica caracteriza o movimento sísmico sentido no local através de um conjunto de valores específicos das variáveis aleatórias de base, que possui a maior probabilidade de ocorrência.
4. Repete-se o mesmo procedimento para os restantes concelhos e para diferentes períodos de retorno, obtendo-se 278 cenários de perigosidade sísmica, relativos a cada concelho, condicionados pela excedência de diversos níveis de perigosidade sísmica  $h$  (secção 3.5.5.1). Espera-se, no entanto, que devido às características da sismicidade que afecta o território Continental, a localização geográfica desses cenários se concentre, para vários concelhos, em locais específicos de maior actividade sísmica.

Relembre-se que a identificação dos cenários de perigosidade sísmica visa, em última análise, a sua utilização na avaliação do risco sísmico acumulado de uma região. Deste modo, os resultados deste capítulo servirão de base à avaliação de cenários regionais de risco sísmico, devendo acrescentar-se uma quinta etapa à metodologia agora delineada. Esta última etapa será desenvolvida e implementada na secção 7.5.3, naturalmente enquadrada no capítulo de avaliação do risco sísmico.

### 3.3. Dados de base e parâmetros dos modelos

#### 3.3.1. O catálogo sísmico e as zonas de geração

O catálogo sísmico utilizado teve por base a listagem de sismos compilada por Sousa *et al.* [1992] completada com a informação constante do catálogo IGN [2000] sobre a região Ibérica, relativa ao período compreendido entre os anos 1991 e 1999. O novo catálogo cobre uma janela temporal de cerca de 1965 anos (33 D.C. a 1999) e nele estão registados 8657 sismos com epicentros localizados dentro de um polígono limitado pelos paralelos 35 e 44°N e pelos meridianos 4 e 13°W [Carvalho & Sousa, 2001].

Na figura 3.1 exhibe-se o mapa de epicentros do catálogo sísmico utilizado para estimar os parâmetros dos novos modelos. A utilização da cor azul e encarnada na identificação dos epicentros tem a finalidade de introduzir a dimensão temporal, histórica ou instrumental, na representação gráfica do catálogo.

Uma breve análise estatística deste catálogo permite concluir: (i) o catálogo regista vinte sismos com magnitude superior ou igual a 7,0, (ii) os sismos com magnitude compreendida entre 2,5 e 3,5, inclusive, constituem 46% dos registos do catálogo, (iii) a partir de ano de 1909, a taxa média de ocorrências é de 89 sismos por ano e, no período anterior é de 0,3

sismos por ano. Daqui se deduz que o catálogo existente não descreve, de forma exaustiva, a sismicidade da região.

Na mesma figura 3.1 traça-se o modelo de zonas de geração, adaptado de Sousa [1996], que é presentemente utilizado em diversos estudos de perigosidade sísmica [Caldeira *et al.*, 1999; Campos Costa & Sousa, 1998a; Carvalho *et al.*, 2002a; Oliveira *et al.*, 1999; Sousa & Campos Costa, 1998 e Sousa & Oliveira, 1997] e que foi construído a partir das características sismológicas, tectónicas e geológicas da região, mas principalmente, considerando a sismicidade descrita no catálogo.

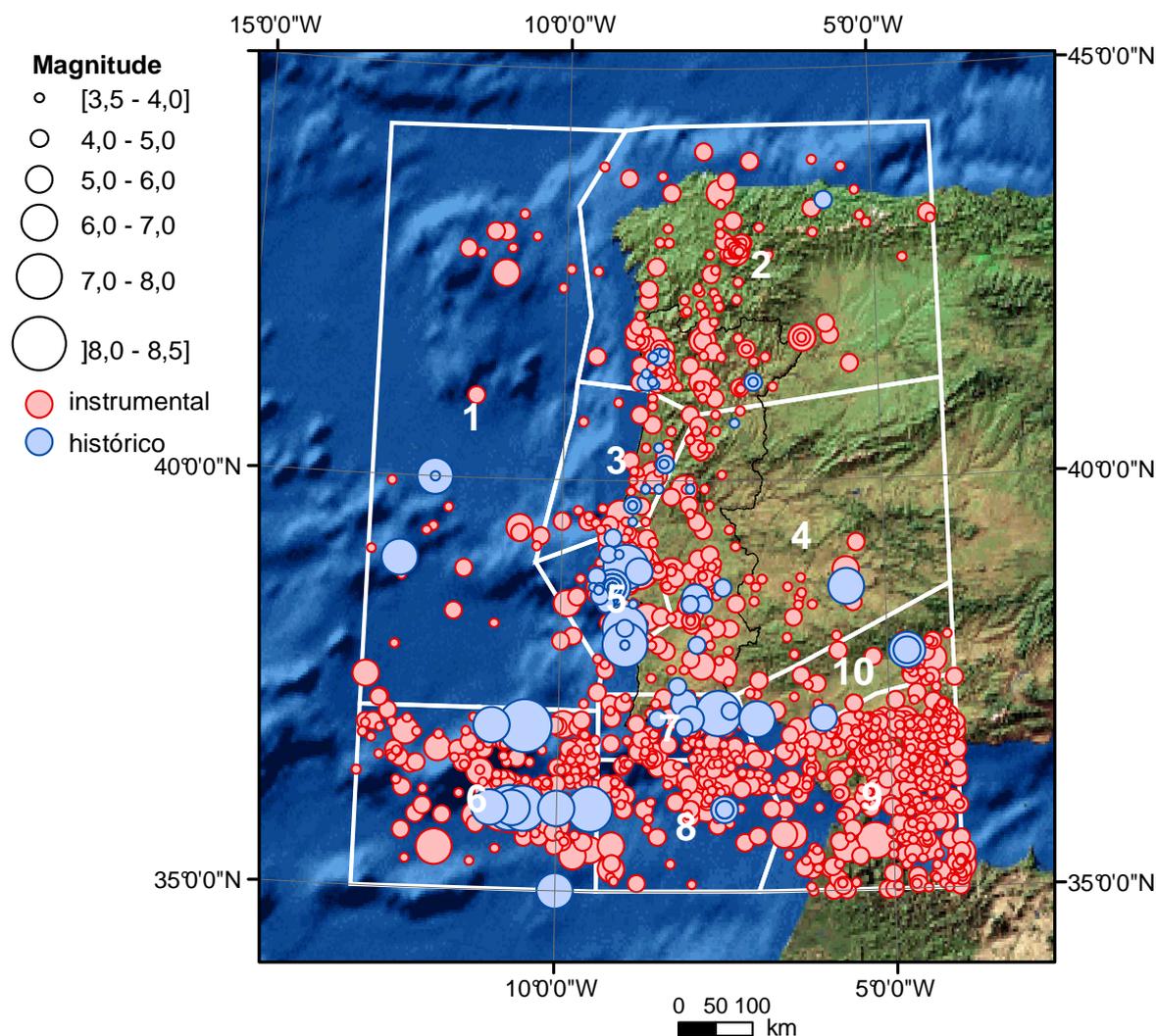


Figura 3.1 – Mapa de epicentros da região analisada, ano 33 a 1999, magnitudes superiores ou iguais a 3,5; Modelo de zonas de geração sísmica [adaptado de Sousa, 1996].

O modelo ilustrado na figura 3.1 é constituído por dez zonas de geração, agregando quatro das zonas originais em duas, isto é, as zonas 5A e 5-5A, e as zonas 6A e 6-6A foram reunidas nas zonas 5 e 6, respectivamente. Todas as zonas do modelo adoptado têm grande expressão geográfica devido à dificuldade de relacionar os epicentros com as falhas cartografadas na carta neotectónica [Cabral & Ribeiro, 1989] e à necessidade de assegurar a

validade estatística das distribuições de probabilidade que caracterizam cada zona. As zonas de geração assim delineadas podem classificar-se em duas grandes categorias: as que originam sismos com epicentro maioritariamente localizado na crosta oceânica (zonas 1, 6, 8 e 9), designadas de *zonas de mar*, e as que originam sismos com epicentro localizado, predominantemente, na placa eurasiática, (zonas 2, 3, 4, 5, 7, e 10), designadas de *zonas de terra*.

De referir que a zona 5 inclui a região do vale inferior do Tejo, onde terão sido originados os sismos de 1531 [Fonseca *et al.*, 2000; Moreira, 1984 e Oliveira & Sousa, 1991] e de Benavente de 1909 [Choffat & Bensaúde, 1913], e a falha Sines-Sesimbra que se pensa ter sido responsável pelo sismo de Setúbal de 1858 [Ribeiro, 2002].

A zona 6 engloba o banco de Gorringe e a planície da Ferradura, sendo uma região de actividade sísmica elevada, onde se localizou o epicentro do sismo de 1969. Sobre a localização da fonte sismotectónica responsável pelo sismo de 1755, ressalve-se que este é um tema de discussão actual no seio da comunidade científica. Efectivamente, o elevado número de propostas surgidas recentemente sobre modelos de rotura deste sismo, baseadas em simulações hidrodinâmicas, evidências históricas e/ou resultados de campanhas sísmicas, atesta a actualidade deste tema [Baptista, 1998; Baptista *et al.*, 1998; Baptista *et al.*, 2003; Baptista & Miranda, 2005; Gutscher, 2005; Terrinha *et al.*, 2003; Vilanova, 2004; Vilanova *et al.*, 2003; Zitellini *et al.*, 1999 e Zitellini *et al.*, 2001]. No futuro, o modelo de zonas de geração, exposto na figura 3.1, será eventualmente revisto para contemplar algumas dessas propostas.

### 3.3.2. Processo espacial e temporal da ocorrência

Tal como já foi referido na Introdução deste capítulo o processo espacial e temporal da ocorrência deixaram de se encontrar afectos a zonas de geração.

Em trabalhos anteriores de análise de perigosidade sísmica para Portugal Continental [Campos Costa, 1993 e Sousa, 1996] assumiu-se uma taxa de ocorrência constante em cada zona de geração e uma distribuição das ocorrências no espaço,  $f_R(r)$ , uniforme no interior de cada zona de geração. Desta feita, à semelhança da metodologia de Frankel [1995] e na perspectiva de se efectuar a análise de desagregação da perigosidade sísmica, as taxas de ocorrência passaram a ser distribuídas espacialmente reflectindo a distribuição observada da localização dos epicentros dos sismos existentes no catálogo da região.

O principal benefício de se considerar a sismicidade onde ela teve lugar no passado prende-se com o abandono, pelo menos no que diz respeito a alguns parâmetros, da divisão da região sísmica em zonas de geração. Um modelo de zonas de geração possui muitas vezes um traçado arbitrário e controverso, principalmente em regiões, como o Continente Português, de sismicidade marcadamente difusa, onde é difícil estabelecer uma associação entre a localização dos epicentros e as estruturas tectónicas activas. Frankel [1995] ressalva, porém, que a história sísmica de uma região poderá não ser um bom indicador da sismicidade futura

para períodos de tempo muito longos, e que, nesses casos os critérios geológicos terão especial importância no delinear das zonas de geração.

Na prática, para se caracterizar o processo espacial e temporal da ocorrência sísmica dividiu-se toda a região em análise em células, identificadas pelo índice  $i$ , quadradas com dimensão  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ , constante na região, e contabilizaram-se o número de sismos que ocorreram em cada célula. A taxa de ocorrência em cada célula,  $v_i$  resultou da ponderação da taxa de ocorrência da zona,  $v_k$ , pela razão entre o número de sismos,  $n_i$ , que ocorre em cada célula e o número de sismos total da zona,  $n_k$ , sendo preservada a taxa de ocorrência global da região (ver exemplo na figura 3.2), ou seja,  $v_i = v_k \cdot n_i / n_k$ .

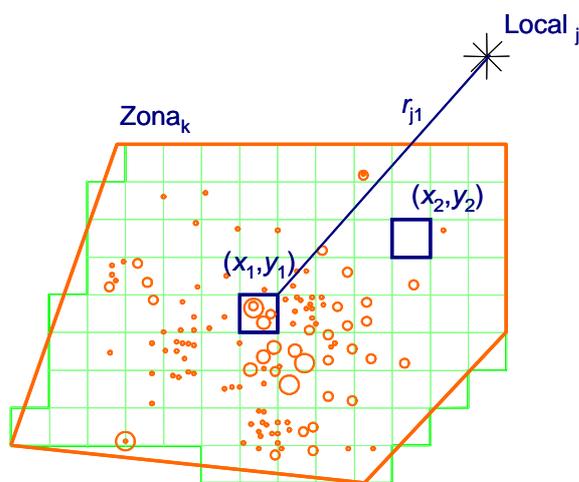


Figura 3.2 – Distribuição geográfica da taxa de ocorrência de sismos: e.g. na célula 1 estão representados quatro sismos,  $v_1 = v_k \cdot 4 / n_k$  e na célula 2,  $v_2 = 0$ .

A figura 3.3 exhibe a distribuição observada da localização dos epicentros dos sismos constantes do catálogo utilizado, organizada por células geográficas de forma quadrada e igual dimensão para toda a região. As cores presentes na figura 3.3 classificam a incidência do número de sismos por célula, sendo patente a concentração de eventos na zona do Vale inferior do Tejo, a sudoeste do Cabo de S. Vicente, na região de Évora e, em Espanha, na zona de Málaga e na parte oeste do mar de Alborão, perto do estreito de Gibraltar.

De salientar que os sismos utilizados neste processo de ponderação e de contabilização da taxa de ocorrência das células geográficas, foram seleccionados da parte instrumental do catálogo. De facto, como foi referido na secção 3.3.1 o catálogo sísmico não é exaustivo, pelo menos no que toca ao seu período histórico. Acresce que os sismos do período designado de instrumental, ou posterior a 1910, são naturalmente mais bem localizados do que os do período histórico. Também foram considerados apenas os sismos principais do catálogo, pois serão eles os causadores de maiores danos; além do mais, a eliminação de réplicas e premonitores permite cumprir a propriedade de independência ou de *ausência de memória* do processo Poissoniano.

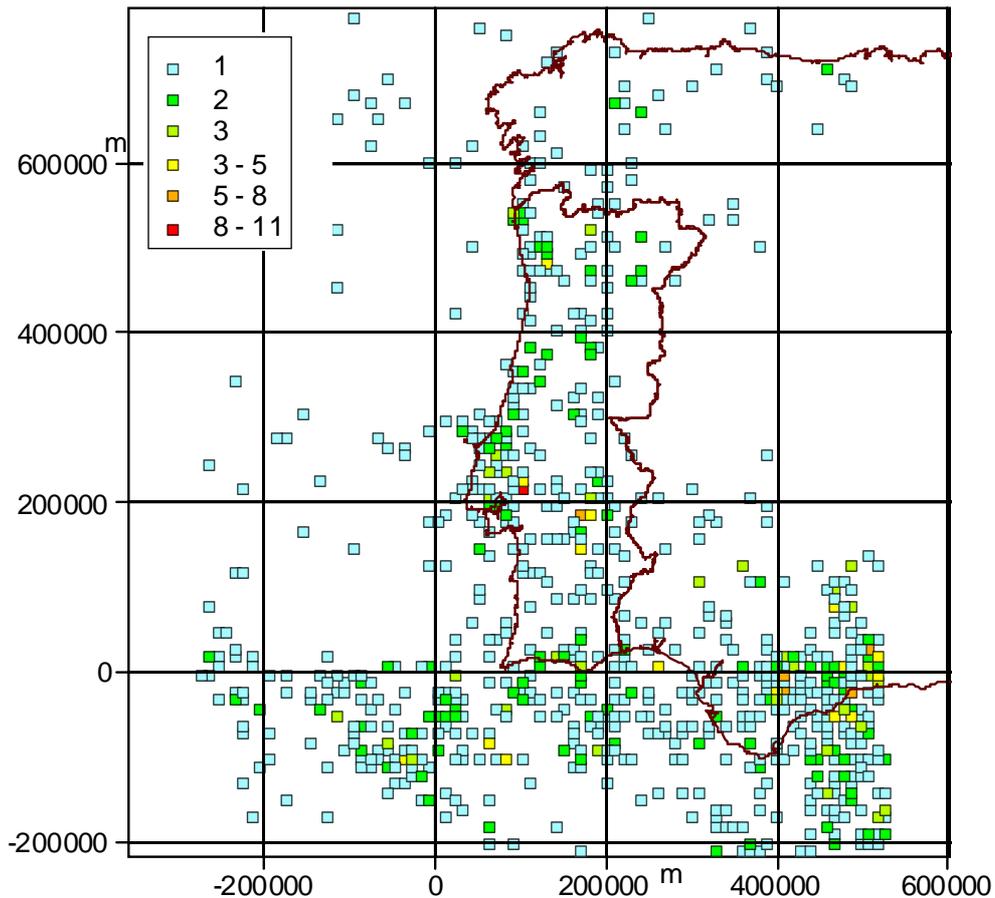


Figura 3.3 - Número de sismos com magnitude superior a 3,5 para cada célula geográfica de dimensão  $10 \times 10$  km; período posterior a 1910.

Por estas razões, os processos espacial e temporal da ocorrência foram estudados exclusivamente para o período instrumental (posterior a 1910) e, admitindo-se a hipótese da sua estacionariedade, extrapolaram-se as taxas de ocorrência obtidas para horizontes temporais mais vastos.

### 3.3.3. Distribuição de magnitudes

No quadro 3.1 reúnem-se os parâmetros adaptados de Sousa [1996] para caracterizar as distribuições de probabilidade da magnitude, que se supõem distribuídas uniformemente em cada zona de geração,  $k$ . Constam deste quadro os limites superiores de truncatura,  $m_{max_k}$ , e a inclinação,  $b_k$ , da lei de Gutenberg-Richter (expressão 2.7). As distribuições cumulativas de magnitude são truncadas inferiormente pelo valor de magnitude  $m_{min_k}$  de 3,45 para todas as zonas. A necessidade de se adaptar os parâmetros originais de Sousa [1996], decorreu da ligeira alteração que sofreu o modelo de zonas de geração, que passou a ser constituído por dez em lugar de doze zonas.

Quadro 3.1 - Magnitude máxima de cada zona e valores de  $b_k$  da lei de Gutenberg-Richter [adaptado de Sousa, 1996].

Zona	$m_{max_k}$	$b_k$	Zona	$m_{max_k}$	$b_k$
1	7,0	-0,6636	6	8,5	-0,5902
2	6,0	-0,8415	7	7,8	-0,9213
3	5,6	-0,8940	8	7,1	-0,6431
4	7,0	-0,8370	9	6,2	-1,2233
5	7,2	-0,9469	10	7,0	-0,8664

### 3.3.4. Atenuação dos movimentos sísmicos

Uma *lei de atenuação* é uma relação que exprime a dependência entre a intensidade do movimento do solo e uma série de variáveis explicativas. Como foi referido na secção 2.3.1, um modelo matemático que descreve a atenuação, relaciona a intensidade do movimento do solo com a distância à fonte, com a energia nela libertada e com outras variáveis explicativas.

Nesta secção realiza-se uma apreciação crítica das leis disponíveis na bibliografia nacional e internacional, designadamente no que respeita à sua adequação à região em estudo e aos modelos de danos a utilizar na avaliação do risco sísmico. Apresentam-se os modelos de atenuação seleccionados para serem aplicados em duas etapas deste trabalho: (i) na reavaliação da perigosidade sísmica da secção 3.4 e (ii) nos algoritmos de simulação de cenários sísmicos do capítulo 6.

Importa sublinhar que as leis de atenuação são uma das maiores causas de incerteza em qualquer avaliação da perigosidade sísmica [Toro *et al.*, 1997 e Field *et al.*, 2000 citados por Montilla & Casado, 2002], sendo também fonte de grande incerteza na simulação da acção sísmica a ser utilizada na avaliação de cenários de risco.

Em 1997, Carrilho & Oliveira publicaram, pela primeira vez em Portugal, leis de atenuação derivadas de valores instrumentais do movimento sísmico do solo, registados digitalmente por duas estações sismográficas situadas em Montemor e Montachique. Os autores analisaram os registos de 25 sismos que ocorreram entre 1985 e 1987, oriundos das principais fontes sísmicas, oceânicas e continentais, que afectam o território Continental. Os registos disponíveis cobrem a gama de magnitudes,  $m_b$ , compreendida entre 2,9 e 4,8 e a gama de distâncias focais compreendida entre 40 e 400 km.

Contudo, a extrapolação desses modelos para além do domínio de aplicação em que foram definidos não conduz a valores razoáveis, pelo que não são de grande utilidade em estudos de perigosidade sísmica, uma vez que se restringem a uma gama de magnitudes baixas.

O sismo de 1969 é o evento de magnitude mais elevada registado instrumentalmente em Portugal Continental. A magnitude deste sismo tem sofrido diversas interpretações surgindo estimativas díspares do seu valor na literatura nacional e internacional: na escala de Richter, 7,9 [Ravara & Jervis Pereira, 1970], 7,5 [Moreira, 1984], 7,9 ou 8,0 [Senos *et al.*, 1994],  $M_S = 7,3$  [Fukao, 1973 citado por Baptista & Miranda, 2001] e  $m_b = 7,3$  [NGDC & NEIC, 1996]. Neste território, o único registo, não saturado deste sismo, foi obtido no acelerógrafo SMAC-B-2, de três componentes, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, instalado no pilar de ancoragem norte da Ponte 25 de Abril em Lisboa.

O evento de magnitude mais elevada registado instrumentalmente, depois do sismo de 1969, foi o de 13 de Dezembro de 2004, com magnitude 5,4 na escala de Richter, e cujo epicentro se localizou a 100 km a SW do Cabo S. Vicente [IM, 2004]. Foram adquiridos registos deste sismo nas estações acelerográficas de Benavente, Évora Monte, Ponta Altar no Algarve, Vila Franca de Xira e em três outras estações localizadas em Lisboa. Estas estações estão integradas na rede portuguesa de acelerógrafos digitais, actualmente mantida pelo Instituto Superior Técnico e pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil [IST, 1996].

Atendendo ao que foi exposto, é previsível que seja necessário aguardar ainda algum tempo para que a base de dados de movimentos sísmicos intensos [ESD, 2003], disponha de registos de sismos de magnitudes moderadas e elevadas que possibilitem o desenvolvimento de leis de atenuação específicas para o território de Portugal Continental.

Devido à carência de registos instrumentais dos movimentos sísmicos em Portugal propõem-se duas soluções para modelar a atenuação do movimento sísmico do solo: (i) adoptar a intensidade macrossísmica, como variável dependente nos modelos de atenuação e recorrer a dados provenientes exclusivamente de sismos que afectaram o território Continental, ou (ii) adoptar uma grandeza instrumental e utilizar leis de atenuação publicadas na literatura internacional, que se considerem representativas dos processos de atenuação que ocorrem em Portugal Continental.

Desta forma efectuou-se uma pesquisa bibliográfica conducente à recolha de leis de atenuação de grandezas instrumentais [Ambraseys & Bommer, 1991; Ambraseys & Simpson, 1996; Ambraseys *et al.*, 1996; Bommer *et al.*, 1998; Bommer & Elnashai, 1999; Boore *et al.*, 1994; Campbell, 1985; Crouse & McGuire, 1996; FEMA & NIBS, 1999; Johnson, 1973; Joyner & Boore, 1982; Kawashima *et al.*, 1984; Lee & Trifunac, 1992; McGuire, 1976; Sabetta & Pugliese, 1987 e Tromans & Bommer, 2002], tendo-se efectuado um trabalho inicial em que se investigou a sua adequação à região em estudo.

Este trabalho permitiu concluir que todos os modelos de atenuação, com fonte pontual, em ordenadas espectrais, pesquisados na literatura internacional subavaliavam as intensidades observadas no sismo de 1755.

Este sismo tem uma magnitude (macrossísmica) estimada entre 8,5 e 9,0, [Abe, 1979; Arroyo & Udias, 1972; Baptista & Miranda, 2005; Johnston, 1996; Martins & Mendes Victor, 1990 e Moreira, 1984]. Também com fundamentos macrossísmicos, o epicentro do sismo de 1755

foi, durante muitos anos, localizado no Banco de Gorringe, próximo da localização do epicentro do sismo de 1969 [Levret, 1991 e Martinez Solares *et al.*, 1979]. Porém, alguns dos estudos recentes já referidos [Baptista, 1998, Baptista *et al.*, 2003; Terrinha *et al.*, 2003; Zitellini *et al.*, 1999 e 2001] preconizam, que a fonte sismogénica do sismo de 1755 se localize numa região mais próxima da costa Portuguesa, propondo sistemas complexos que englobam, nomeadamente, as falhas de Marquês de Pombal, de Pereira de Sousa e do Banco de Guadalquivir. Mesmo assim, a proximidade do epicentro do sismo não conduziu a uma estimativa razoável para a atenuação das intensidades do movimento deste sismo em Portugal Continental quando se recorre aos modelos de atenuação de grandezas espectrais publicados na literatura internacional.

Conclui-se que não é viável a extrapolação dos modelos empíricos de atenuação espectral, de fonte pontual, para magnitudes tão elevadas, pois eles não conseguem reproduzir movimentos sísmicos tão intensos como os observados no sismo de 1755<sup>1</sup>.

Face ao exposto e no que concerne à reavaliação da perigosidade sísmica optou por se recorrer às leis de atenuação em intensidades macrossísmicas de Sousa [1996], pois as observações de intensidades relativas a sismos de magnitude elevada, como as do terramoto de 1755, contribuíram para o desenvolvimento destes modelos, não havendo lugar para extrapolações. Assim a grandeza que traduz a intensidade do movimento sísmico passará a ser a intensidade macrossísmica e o acontecimento  $A$ , que traduz a excedência de um certo nível de perigosidade sísmica (secção 2.3.1), passará a ser descrito por  $A \equiv I > I_0$ .

Os modelos de atenuação em causa foram desenvolvidos a partir da informação macrossísmica de sismos históricos severos e de sismos instrumentais que afectaram o Continente Português. Os dados utilizados para estabelecer essas leis de atenuação encontram-se armazenados na *Base de Dados de Informação Macrossísmica de Portugal Continental*, construída por Oliveira *et al.* [1995], Paula [1994], Paula [1996] e Paula & Oliveira [1996]. À data do desenvolvimento dos modelos de atenuação a Base englobava a informação relativa a 199 sismos, históricos e instrumentais e 3209 observações de intensidades macrossísmicas (EMS-92) avaliadas em 1194 localidades de Portugal Continental.

O modelo de atenuação dos movimentos sísmicos adoptado por Sousa [1996] tem a seguinte expressão:

$$I = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot \ln(R) + c_4 \cdot R + \varepsilon \quad (3.1)$$

em que  $I$  representa a intensidade macrossísmica,  $M$  a magnitude de Richter ou local,  $R$  a distância hipocentral,  $\varepsilon$  é uma variável aleatória com distribuição normal de média nula e

---

<sup>1</sup> Uma alternativa promissora à modelação empírica da atenuação de uma fonte pontual está a ser desenvolvida por Carvalho & Campos Costa [2004]. Estes autores utilizaram um modelo sismológico para traduzir uma rotura extensa na fonte do sismo de 1755, ensaiando os diversos modelos atrás referidos [Baptista, 1998; Baptista *et al.*, 2003; Terrinha *et al.*, 2003; Vilanova, 2004; Vilanova *et al.*, 2003; Zitellini *et al.*, 1999 e Zitellini *et al.*, 2001].

variância constante,  $\sigma_{\varepsilon}^2$ , e  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  são coeficientes ajustados por regressão linear múltipla aos dados da base.

Face à carência de dados na gama de magnitudes elevadas e para evitar a extrapolação dos modelos para magnitudes não observadas Sousa [1996] tomou as seguintes opções sobre os dados utilizados nas regressões: (i) nas zonas 2, 3, 4, 7 e 10 utilizou os dados disponíveis do conjunto das zonas de terra, ou seja, das zonas 2, 3, 4, 5, 7 e 10; (ii) nas zonas 1 e 9 utilizou os dados disponíveis do conjunto das zonas de mar, ou seja, das zonas 1, 6 e 9 e (iii) para os modelos de atenuação das zonas 5, 6 e 8 utilizaram-se, exclusivamente, os dados das zonas respectivas.

No quadro 3.2 listam-se os coeficientes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $c_4$  ajustados por regressão linear múltipla aos dados da Base, não se discriminando as condições geológicas superficiais do local em análise. No mesmo quadro constam ainda o domínio de aplicação dos vários modelos, a profundidade média dos hipocentros nas zonas de sismogénese, o erro do ajuste e o coeficiente de determinação múltipla ajustado.

Quadro 3.2 – Modelos de atenuação da intensidade macrossísmica [adaptado de Sousa, 1996].

Parâmetros / Zonas	5	6	8	Terra	Mar
Domínio magnitude	3,5 – 7,2	4,1 – 8,5	4,2 – 7,1	3,0 – 7,2	3,6 – 8,5
Domínio dist. hipoc. [km]	10 – 400	100 – 750	70 – 650	10 – 400	60 – 750
$c_1$	ns	7,7988	3,7374	1,8819	ns
$c_2$	1,2102	1,3376	0,7967	0,7613	1,1625
$c_3$	-0,4700	-2,0167	-0,8671	-0,3509	-0,2682
$c_4$	-0,0064	ns	ns	-0,0047	-0,0035
Prof. [km]	10,3	20,1	34,0	14,4	23,3
$\sigma_{\varepsilon}$	1,01	0,76	0,61	0,84	0,85
$R^2$ ajustado [%]	66,1	74,8	50,8	48,1	70,5

ns – coeficiente não significativo na regressão

No entanto, relativamente ao programa de avaliação de cenários sísmicos do capítulo 6 foi necessário implementar ambos os modelos de atenuação, o macrossísmico e o espectral, pois é necessário compatibilizar os modelos de dano aí disponibilizados com os diferentes tipos de acção sísmica a que recorrem.

Entre os modelos publicados na literatura escolheu-se o de Bommer *et al.* [1998] ou de Bommer & Elnashai [1999] que prevê a atenuação do movimento sísmico em deslocamentos espectrais. Para estabelecer este modelo de atenuação, os autores tiveram um cuidado especial com a zona dos longos períodos do espectro de resposta, recorrendo, para o efeito, a sísmos de magnitude elevada, o que, à partida, aparenta ser relevante na modelação do movimento de

sismos severos oriundos de zonas de geração afastadas semelhantes às que afectam Portugal Continental. Outra vantagem deste modelo prende-se com o facto do deslocamento espectral ser a grandeza utilizada na avaliação da resposta sísmica dos edifícios no modelo de dano mecanicista implementado no programa de simulação de cenários sísmicos do capítulo 6.

Bommer *et al.* [1998] e Bommer & Elnashai [1999] efectuaram uma análise de regressão a dois passos, segundo o método de Ambraseys *et al.* [1996], tendo como variáveis dependentes as ordenadas espectrais do deslocamento  $SD_f$  [cm], para cada frequência  $f$  e vários amortecimentos críticos. Os autores ensaiaram o modelo seguinte para os períodos compreendidos entre os 0,04 e os 3,0 segundos:

$$\log(SD_f) = C_{1f} + C_{2f} \cdot M_S + C_{3f} \cdot R + C_{4f} \cdot \log(R) + C_{Af} \cdot S_A + C_{Sf} \cdot S_S + \sigma_f \cdot C \quad (3.2)$$

em que,

$R = (d^2 + h_{0f}^2)^{1/2}$ , na qual  $d$  é a menor distância entre a estação e a projecção à superfície da rotura da falha e  $h_{0f}$ , é uma constante a ser determinada juntamente com as restantes constantes,  $C_{1f}$  a  $C_{4f}$ , para cada frequência;

$C_{3f} \cdot R$  define a atenuação causada pelos materiais anelásticos do meio e o termo  $C_{4f} \cdot \log(R)$  define a atenuação geométrica das ondas sísmicas;

$S_A$  e  $S_S$  contemplam as condições geológicas do local em análise; e

$\sigma_f$  é o desvio padrão de  $\log(SD_f)$  e a constante  $C$  toma os valores 0 e 1 para o valor médio e para o quantilho de 84%, respectivamente.

Para estimar os coeficientes do modelo de atenuação em deslocamento espectral constantes da expressão 3.2, Bommer *et al.* [1998] utilizaram uma base de dados com cerca de 183 registos, gerados por 43 sismos da Europa e regiões adjacentes. As gamas de magnitude e distância cobertas pelos modelos são de  $5,5 \leq M_S \leq 7,9$  e  $1\text{km} \leq d \leq 260\text{km}$ , respectivamente.

### 3.4. Reavaliação da perigosidade sísmica

Na sequência das opções tomadas na secção 3.3 traçam-se na figura 3.4 as envolventes das curvas de perigosidade sísmica para todos os concelhos de Portugal Continental.

A análise foi efectuada ao nível do concelho e não da freguesia, pois sendo omitidas as condições geológicas locais, não se esperam diferenças significativas na perigosidade das freguesias dentro de cada concelho.

Na figura 3.4 destaca-se, a azul, a curva de perigosidade sísmica relativa ao concelho de Lisboa. Esta indica que existe uma probabilidade anual de 0,01 (1 em 100) de ser excedido um valor de intensidade entre VI e VII e que existe uma probabilidade anual de 0,001 (0,1 em 1000) de ser excedido um valor de intensidade perto de VIII, na escala EMS-92.

A informação subjacente à figura 3.4 permite concluir que a envolvente máxima aí traçada coincide com a distribuição de perigosidade sísmica do concelho de Vila do Bispo, no sudoeste Algarvio. A envolvente mínima, coincide, para a grande maioria dos períodos de retorno, com a distribuição da perigosidade sísmica do concelho de Miranda do Douro, no distrito de Bragança; para os períodos de retorno superiores ou iguais 5 000 anos, a envolvente mínima coincide com a distribuição da perigosidade sísmica do concelho de Bragança.

O anexo A pode ser consultado para localizar geograficamente as unidades geográficas que vão sendo referidas ao longo desta tese. Note-se que a perigosidade sísmica foi avaliada para as sedes do concelho e extrapolada, com o mesmo valor, para a área de todo o concelho.

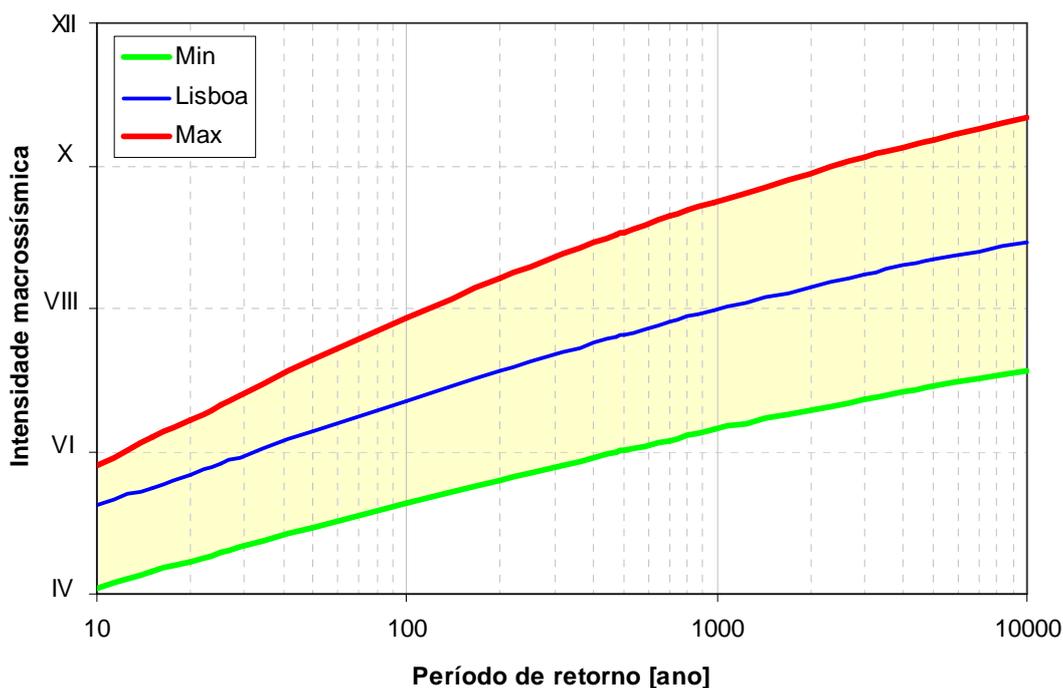


Figura 3.4 – Envolvente das curvas de perigosidade sísmica para todos os concelhos de Portugal Continental.

Fixaram-se três períodos de retorno para ilustrar o mapeamento dos resultados obtidos. Tal como foi referido no capítulo 2, foram escolhidos os períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos, ou seja, adoptaram-se as probabilidades de excedência (PE) de, respectivamente, 10%, num intervalo de tempo de exposição de 10 anos, 10% em 50 anos e 5% em 50 anos. O valor de 95 anos é o indicado no Eurocódigo 8 [CEN, 2004] para o período de retorno da acção sísmica correspondente ao “requisito de limitação de danos”. O valor de 475 anos é o indicado no Eurocódigo 8 para período de retorno da acção sísmica correspondente ao “requisito de não ocorrência de colapso”. Por outro lado, a acção sísmica especificada no RSA [RSA, 1983] corresponde ao período de retorno de 975 anos.

Na figura 3.5 exhibe-se a distribuição geográfica da perigosidade sísmica no território Continental, permitindo concluir que a perigosidade sísmica decresce de sudoeste para nordeste deste território, o que é concordante com os resultados de estudos publicados no passado para esta região [Sousa, 1996].

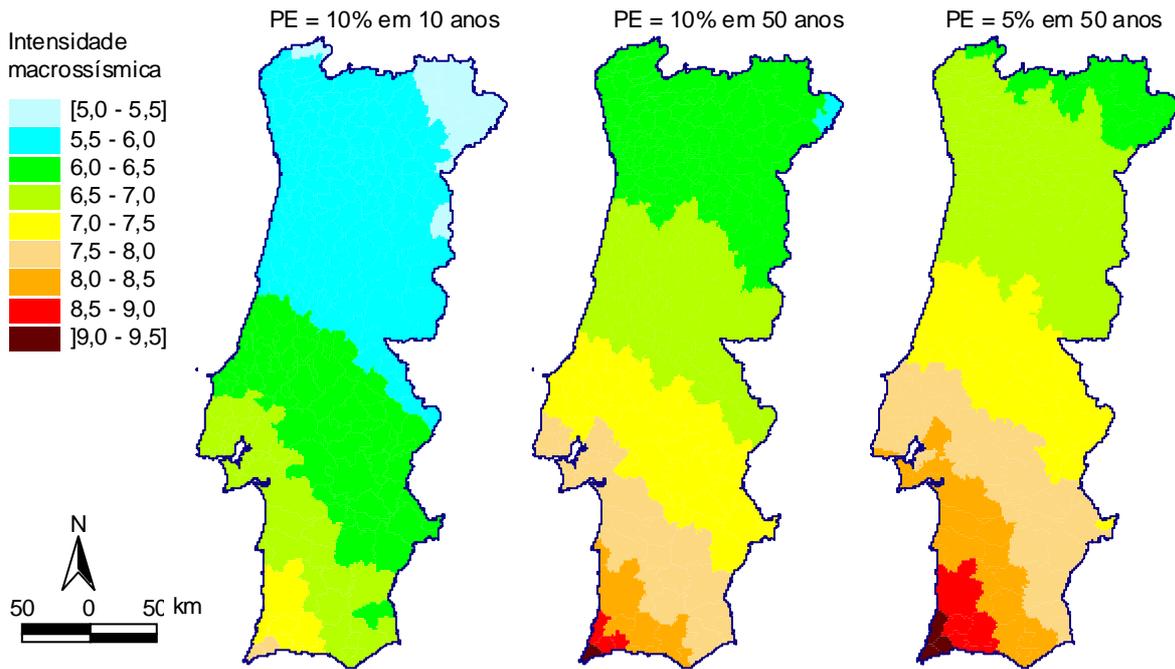


Figura 3.5 – Perigosidade sísmica para Portugal Continental; mapas desenhados com a resolução geográfica do concelho.

Na linha de estudos anteriores de perigosidade sísmica [Campos Costa *et al.*, 1998a e Sousa *et al.*, 1997b], ajustaram-se funções cumulativas de distribuição do tipo beta, às curvas de perigosidade sísmica anual dos 278 concelhos de Portugal Continental (figura 3.4). A descrição analítica da perigosidade sísmica assim obtida, é fundamental para a avaliação probabilística do risco sísmico e dos valores esperados anuais das perdas em consequência de sismos, nomeadamente para obtenção da função de densidade de probabilidade da perigosidade sísmica a partir da respectiva função cumulativa de distribuição (expressão 2.48 da secção 2.6.2).

Para efectuar o ajuste foi necessário proceder a uma transformação de variável,  $I' = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$ , tal que,  $0 \leq I' \leq 1$ , de forma a se obter uma distribuição beta padrão, descrita pelos parâmetros  $\alpha_j$  e  $\beta_j$ , em que o índice  $j$  identifica o concelho:

$$I'_j \sim \text{beta} \left( \frac{I - I_{min_j}}{I_{max_j} - I_{min_j}}, \alpha_j, \beta_j \right) \quad (3.3)$$

As linhas contínuas na figura 3.6 exemplificam os ajustes da distribuição beta à distribuição de perigosidade anual estimada, para 14 períodos de retorno, em três concelhos de Portugal Continental: Porto, Lisboa e Faro. Estes concelhos foram escolhidos para ilustrar alguns dos resultados deste capítulo, pois satisfazem simultaneamente dois requisitos: (i) representam grandes áreas metropolitanas do Continente, naturalmente candidatas a terem um risco sísmico elevado, e (ii) correspondem a níveis distintos de perigosidade deste território.

Na mesma figura especificam-se, por concelho, os dois parâmetros ajustados da distribuição beta,  $\alpha_j$  e  $\beta_j$ , e os limites inferior,  $I_{min_j}$ , e superior,  $I_{max_j}$ , da truncatura também ajustados às estimativas da perigosidade de cada concelho. Apresenta-se ainda a raiz quadrada do erro quadrático médio do ajuste,  $\sqrt{MSE}$ .

No universo dos 278 concelhos do Continente, os erros do ajuste,  $\sqrt{MSE}$ , medidos em graus de intensidade macrossísmica, variam entre  $1,3 \times 10^{-3}$  e  $6,1 \times 10^{-2}$ , exibindo uma média de  $1,2 \times 10^{-2}$ , valores que indicam um excelente ajuste.

Concelho	Porto	Lisboa	Faro
$I_{min_j}$	3,50	3,34	4,00
$I_{max_j}$	10,5	12,0	11,8
$\alpha_j$	0,537	0,839	0,302
$\beta_j$	9,11	8,52	5,82
$\sqrt{MSE}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$8,9 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$

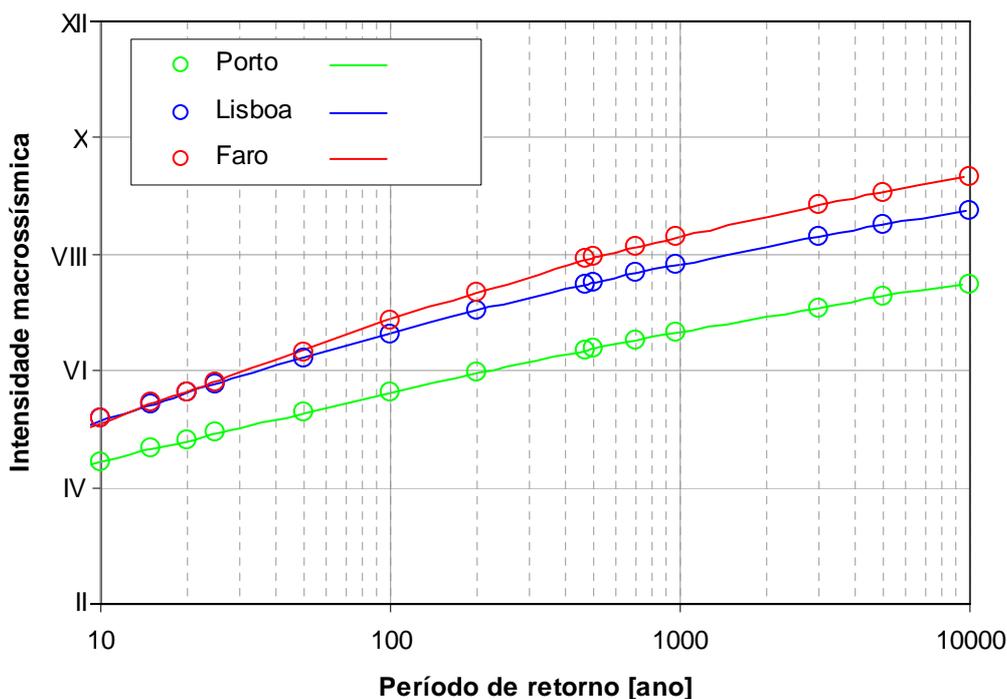


Figura 3.6 – Curvas de perigosidade sísmica para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e ajuste da função cumulativa de distribuição beta.

Na figura 3.7 representa-se a distribuição geográfica dos valores das quatro grandezas  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$ ,  $I_{min_j}$ , e  $I_{max_j}$  obtidas por ajuste simultâneo a cada um dos 278 concelhos.

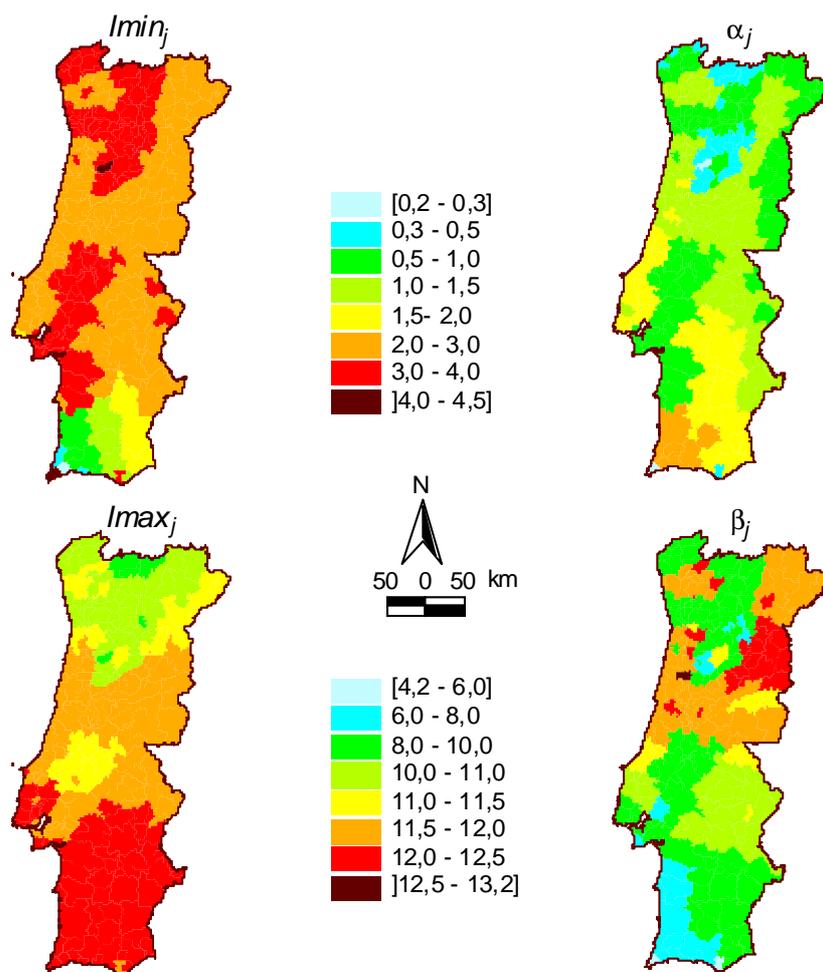


Figura 3.7 – Distribuição geográfica dos parâmetros da distribuição beta e limites de truncatura.

### 3.5. Análise de desagregação da perigosidade sísmica

#### 3.5.1. Enquadramento

Na secção 2.3.3 expõe-se o procedimento geral para efectuar a desagregação da perigosidade sísmica, mencionando-se a existência de uma vasta gama de técnicas, desde a designada desagregação 3D, em  $M-R-\epsilon$ , que contempla as três variáveis aleatórias básicas envolvidas na avaliação da perigosidade, até à mais simples desagregação 1D em  $M$ , em  $R$ , ou em  $\epsilon$ , passando pela desagregação 2D em  $M-R$ . Apresentou-se ainda a desagregação geográfica em  $(X, Y)$  e a sua conjugação com as restantes variáveis aleatórias de base, denominada de desagregação 4D em  $M-(X, Y)-\epsilon$ .

Obviamente, quanto maior for a dimensão do espaço de variáveis aleatórias envolvidas na análise maior será o esforço computacional respectivo. A análise de desagregação efectuada num espaço de menor dimensão permite aumentar, em contrapartida, a precisão do procedimento numérico, conduzindo a estudos de maior pormenor.

No que toca à determinação dos cenários de perigosidade sísmica não existem regras estabelecidas sobre o número de variáveis aleatórias a envolver na análise de desagregação ou sobre a escolha dos valores médios e / ou modais das distribuições para definir os cenários.

Bazzurro & Cornell [1999] defendem que, em rigor, o evento mais provável, entre todos os possíveis que preservam a condição  $I > I_0$ , será aquele que corresponde à moda da distribuição de probabilidade conjunta em  $M-R-\epsilon$ . Os autores justificam a necessidade de efectuar a desagregação 3D (ou 4D) pelo facto de todas as variáveis aleatórias envolvidas afectarem a probabilidade de excedência de  $I_0$ . Acresce que, ao contrário dos valores médios, os valores modais da distribuição de probabilidade conjunta, não coincidem necessariamente com os valores modais das distribuições marginais de uma só variável.

Por outro lado, no presente estudo, os cenários obtidos da análise de desagregação 2D, em que a variável  $\epsilon$  é descurada, poderão ter aplicações mais vastas do que os resultantes da análise de desagregação 3D. Por exemplo, um cenário definido pelos valores modais  $\hat{M}$ ,  $\hat{R}$ ,  $\hat{\epsilon}$  terá aplicação restrita aos modelos de atenuação de intensidades macrossísmicas, enquanto que um cenário definido pelos valores modais  $\hat{M}$ ,  $\hat{R}$ , poderá ser aplicado a outros modelos de atenuação do movimento, nomeadamente os espectrais.

Nesta secção efectua-se a análise de desagregação 4D para identificar cenários de perigosidade sísmica para todos os concelhos de Portugal Continental. Além disso, serão efectuadas análises de desagregação mais simplificadas numa tentativa de investigar se os cenários assim identificados reproduzem, ou se aproximam, dos cenários identificados pela análise de desagregação 4D, mais rigorosa, e aliviar desta forma o esforço computacional de trabalhos futuros nesta região.

O quadro 3.3 sintetiza a organização desta secção identificando os diversos métodos de análise de desagregação, as secções em que são aplicados e a formulação matemática subjacente.

*Quadro 3.3 – Síntese da organização da secção 3.5.*

Subsecção	Espaço de var. aleatórias	Expressões
3.5.2 – Desagregação unidimensional em $M$ e desagregação unidimensional em $\epsilon$	1D em $M$ e 1D em $\epsilon$	2.20 e 2.21
3.5.3 – Desagregação geográfica em $(X, Y)$	2D em $(X, Y)$	2.23
3.5.4 – Desagregação bidimensional em $M-R$	2D em $M-R$	2.22
3.5.5 – Desagregação 4D e cenários de perigosidade sísmica	4D em $M-(X, Y)-\epsilon$	2.19

Na prática as integrações expressas em 2.19 a 2.23 são efectuadas numericamente, concentrando-se as taxas de excedência elementares no ponto central das células escolhidas. As células utilizadas neste trabalho têm dimensões constantes em todo o domínio com os

valores:  $\Delta m = 0,1$ ,  $\Delta x = \Delta y = 10$  km e  $\Delta \varepsilon = 0,25$ . Por outro lado, como o processamento no espaço 1D é muito menos dispendioso computacionalmente do que o efectuado num espaço 4D, foi possível analisar a distribuição marginal da variável aleatória  $\varepsilon$  de forma mais fina. Adoptou-se nesta análise 1D células com uma dimensão constante,  $\varepsilon = 0,1$ , por substituição do valor de 0,25 das células da análise 4D.

Nas secções 3.5.2 a 3.5.4 as análises 1D e 2D são secundadas por gráficos ilustrativos dos resultados da desagregação. A representação da análise de desagregação 4D exigiria gráficos a cinco dimensões, de difícil construção e leitura, pelo que, na secção 3.5.5 o problema é abordado apenas na perspectiva dos cenários de perigosidade sísmica, remetendo-se para as secções anteriores a ilustração das funções de probabilidade marginais a duas e três dimensões.

Tendo em consideração que as células geográficas com contribuição nula para a perigosidade não foram contempladas na análise, o espaço 4D em  $M$ -( $X$ ,  $Y$ )- $\varepsilon$  acabou por ser subdividido em 871 497 células. Note-se que o volume total representado em cada gráfico das secções 3.5.2 a 3.5.4 iguala a unidade, uma vez que as contribuições foram normalizadas pela taxa anual de excedência total (ver expressão 2.19).

Ao longo da secção 3.5 a análise de desagregação foi condicionada por 13 do total dos 14 níveis de perigosidade obtidos na secção 3.4 para cada concelho. Os resultados foram mais uma vez ilustrados para os períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos e para os três concelhos atrás mencionados, Porto, Lisboa e Faro.

### 3.5.2. Desagregação unidimensional em $M$ e desagregação unidimensional em $\varepsilon$

Nas figuras 3.8 e 3.9 exibem-se as análises de desagregação 1D das variáveis  $M$  e  $\varepsilon$ , respectivamente, relativas aos concelhos do Porto, Lisboa e Faro, condicionadas pelos níveis de perigosidade correspondentes aos três períodos de retorno atrás mencionados. Os valores esperados,  $E[M]$  e  $E[\varepsilon]$ , e os valores modais,  $\hat{M}$  e  $\hat{\varepsilon}$ , das distribuições marginais das variáveis aleatórias magnitude e desvio também se encontram reunidos nessas figuras.

Da observação da figura 3.8 constata-se que:

1. Os valores esperados e modais da magnitude crescem com o aumento do período de retorno. É excepção o valor modal relativo ao concelho do Porto e período de retorno de 975 anos que é igual ao do período de retorno de 475 anos. A ausência de crescimento deste valor modal da magnitude com o período de retorno resulta da truncatura imposta pelos valores máximos da magnitude das zonas de geração, no presente caso a zona 6, que é a única a possuir uma magnitude máxima tão elevada (ver quadro 3.1).
2. O facto de nos períodos de retorno mais elevados os valores modais da magnitude se situarem perto ou sobre os limites da truncatura da magnitude explica porque é que os valores esperados são, regra geral, inferiores aos modais correspondentes.

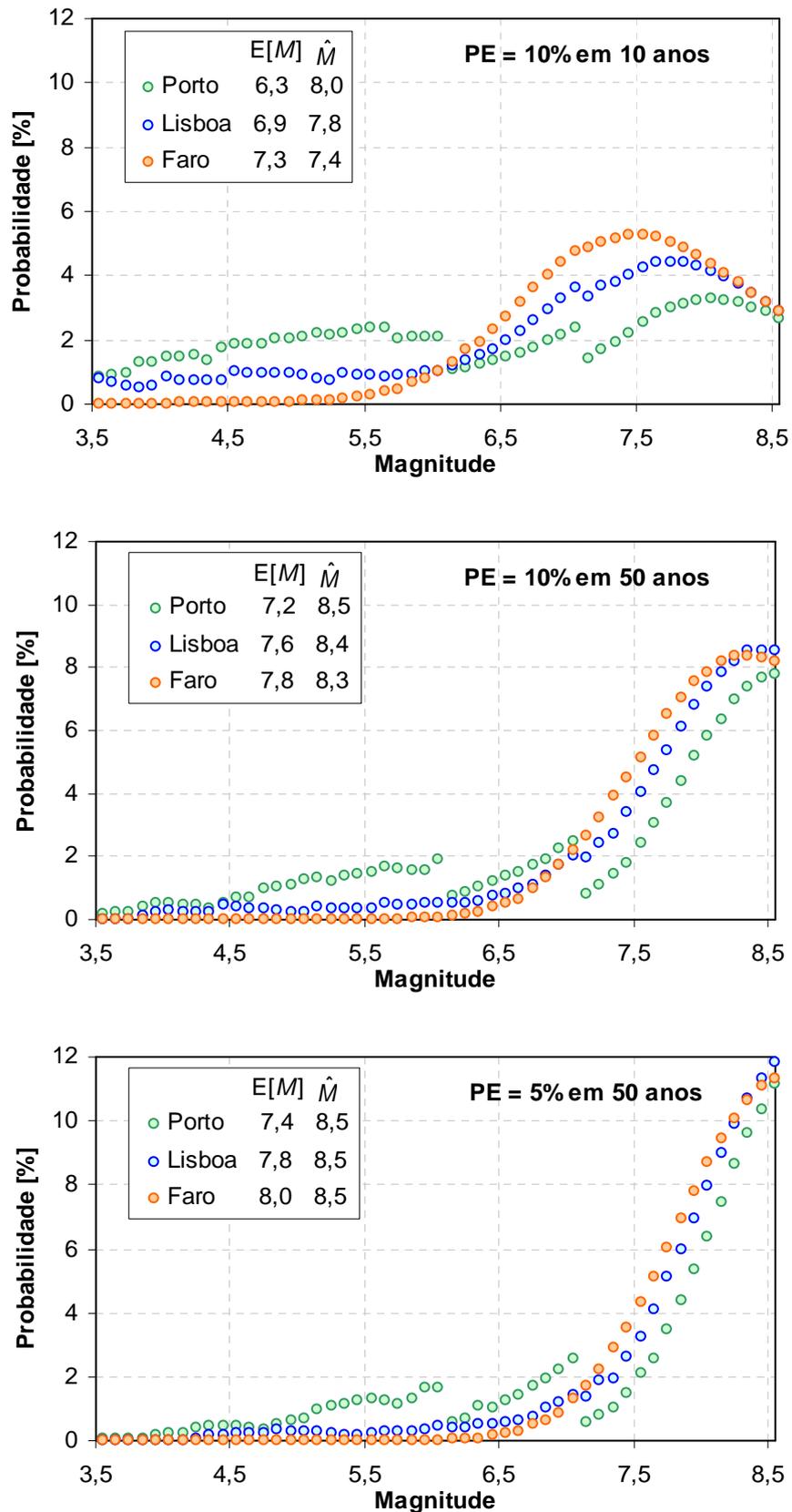


Figura 3.8 – Desagregação da perigosidade sísmica na variável aleatória  $M$  para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e para os períodos de retorno de 95 (em cima), 475 (no meio) e 975 anos (em baixo); valores esperados e modais de  $M$ .

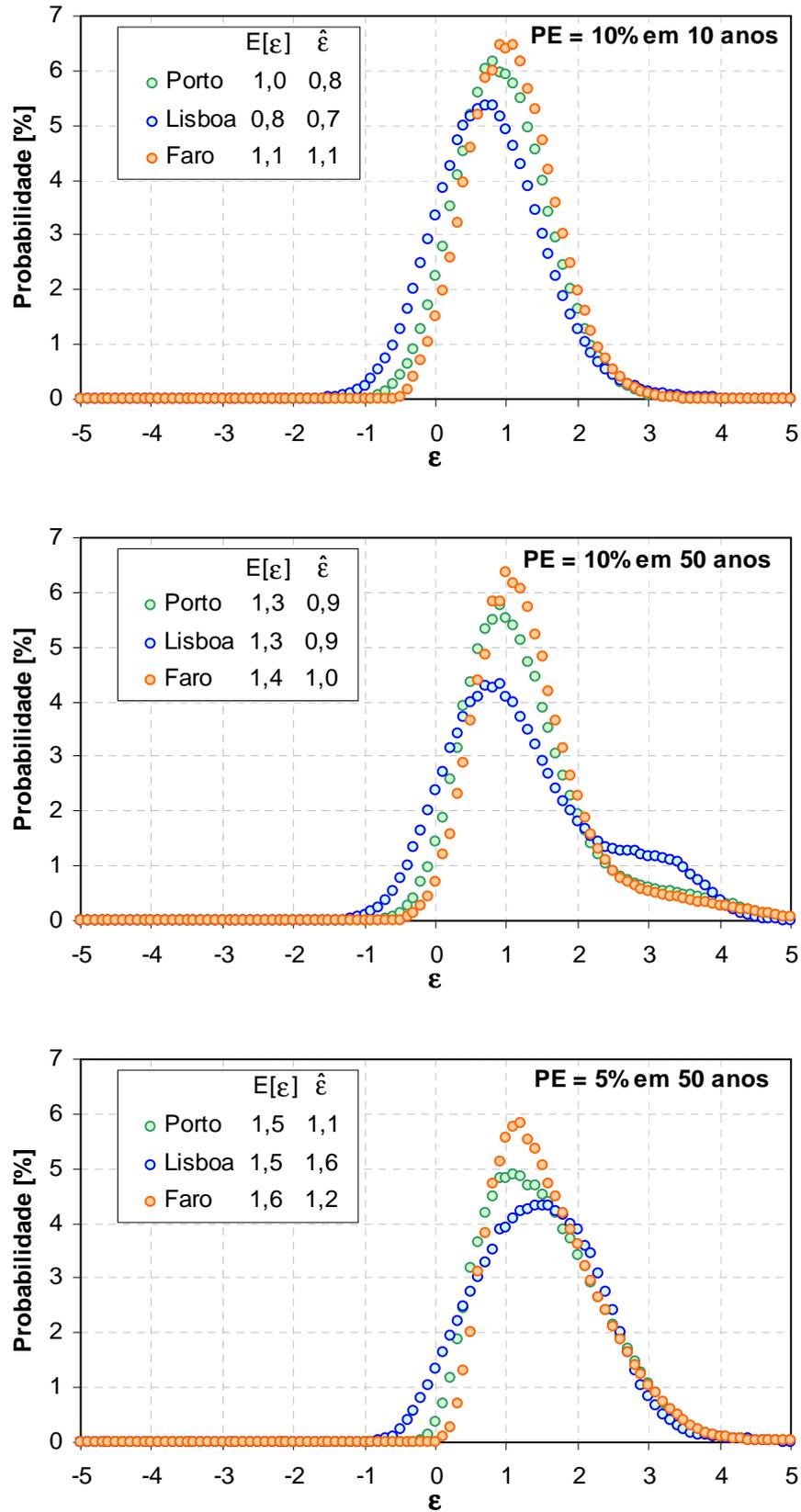


Figura 3.9 – Desagregação da perigosidade sísmica na variável aleatória  $\epsilon$  para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e para os períodos de retorno de 95 (em cima), 475 (no meio) e 975 anos (em baixo); valores esperados e modais de  $\epsilon$ .

3. Sobre a variação geográfica das distribuições verifica-se que os valores esperados da magnitude crescem do concelho do Porto para o de Faro, passando por um valor intermédio no concelho de Lisboa. Situação inversa observa-se relativamente aos valores modais da magnitude que decrescem do norte para o sul do território Continental, com excepção dos valores relativos ao período de retorno de 975 anos. Neste período de retorno de 975 anos e para todos os concelhos analisados os valores modais da magnitude de 8,5 coincidem com o limite superior de truncatura da distribuição de magnitudes da zona de geração 6.
4. No concelho do Porto e para os três períodos de retorno analisados, a distribuição possui um padrão multi-modal, em que as descontinuidades coincidem com os limites superiores de truncatura das zonas de geração mais próximas do concelho do Porto (ver figura 3.1 e quadro 3.1); tal padrão revela a existência de células nessas zonas cuja sismicidade contribui de forma relevante para a perigosidade sísmica do concelho do Porto. Padrão semelhante observa-se em Lisboa, para a probabilidade de excedência de 10% em 10 anos. Neste local as três distribuições ilustradas apresentam uma moda secundária, entre as magnitudes 6,5 e 7,5, que reflecte uma contribuição de menor monta para os níveis de perigosidade analisados neste concelho.

Da análise da figura 3.9 conclui-se que para os três concelhos analisados:

1. Os valores esperados e modais dos desvios do movimento do solo, condicionados pela excedência de um nível de intensidade  $I_0$ , são sempre positivos e variam em torno da unidade, ou seja, os movimentos dominantes são superiores em cerca de um grau de intensidade macrossísmica em relação à média prevista pela lei de atenuação.
2. As distribuições marginais condicionais dos desvios exibem assimetrias positivas, pois em geral, os valores modais dos desvios são inferiores aos valores médios correspondentes.
3. Os valores esperados e modais dos desvios crescem, em geral, com o período de retorno.
4. As distribuições marginais condicionais do desvio são, em geral, unimodais excepto para Lisboa e para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos em que a distribuição tem um padrão bi-modal, indicando a existência de um segundo cenário de perigosidade sísmica com um valor de  $\epsilon$  em torno de 3 graus de intensidade.

### 3.5.3. Desagregação geográfica em $(X, Y)$

A análise de desagregação geográfica 2D da perigosidade sísmica é ilustrada nas figuras 3.10a a 3.10c, representando-se as funções massa de probabilidade conjunta de  $(X, Y)$ , resultante da soma de todas as contribuições elementares  $\Delta m$  e  $\Delta \epsilon$  para a perigosidade do local em estudo.

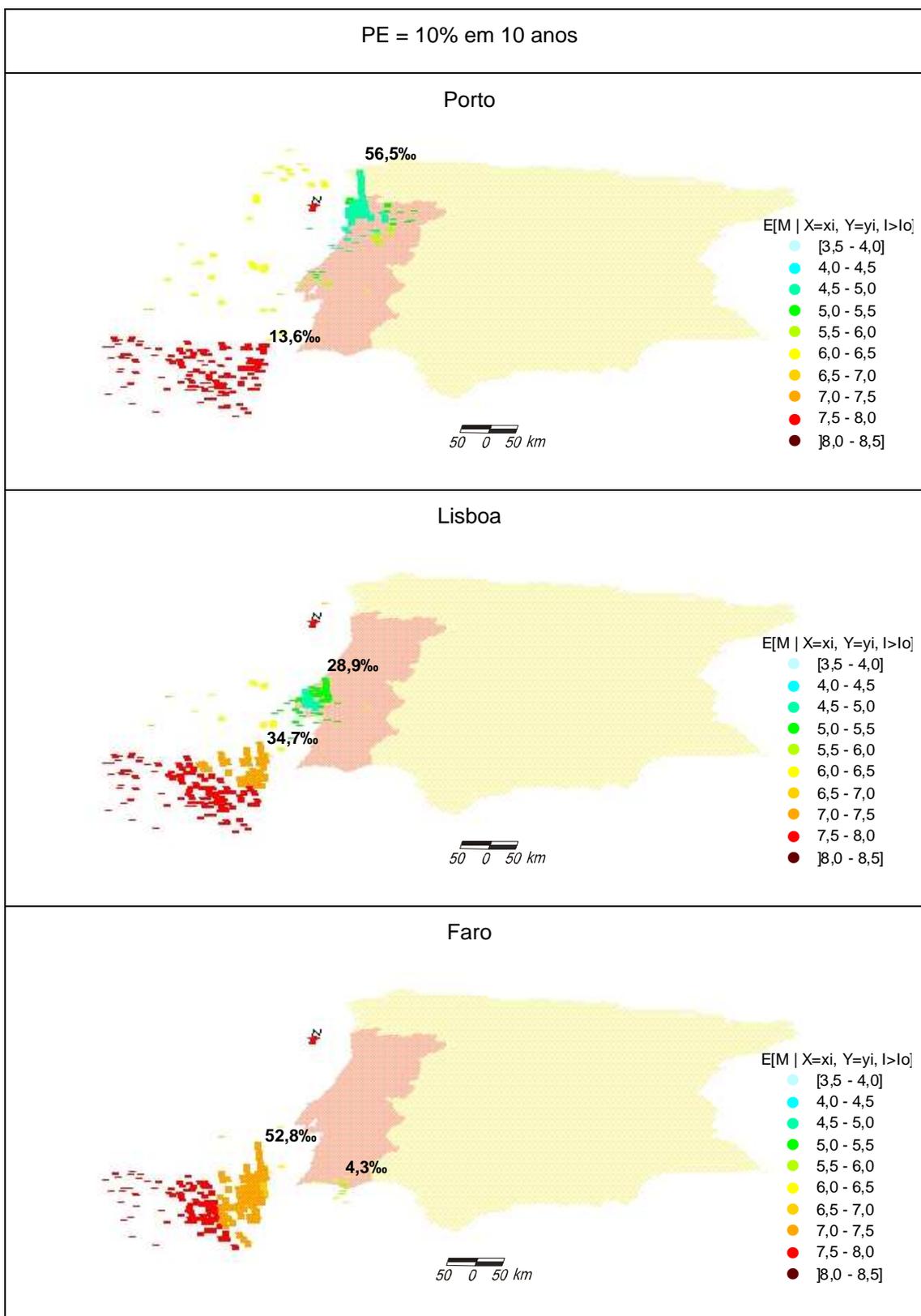


Figura 3.10a - Desagregação geográfica da perigosidade condicionada pela excedência do nível da acção sísmica correspondente ao período de retorno de **95 anos** para o Porto, Lisboa e Faro; magnitude esperada condicional de cada célula.

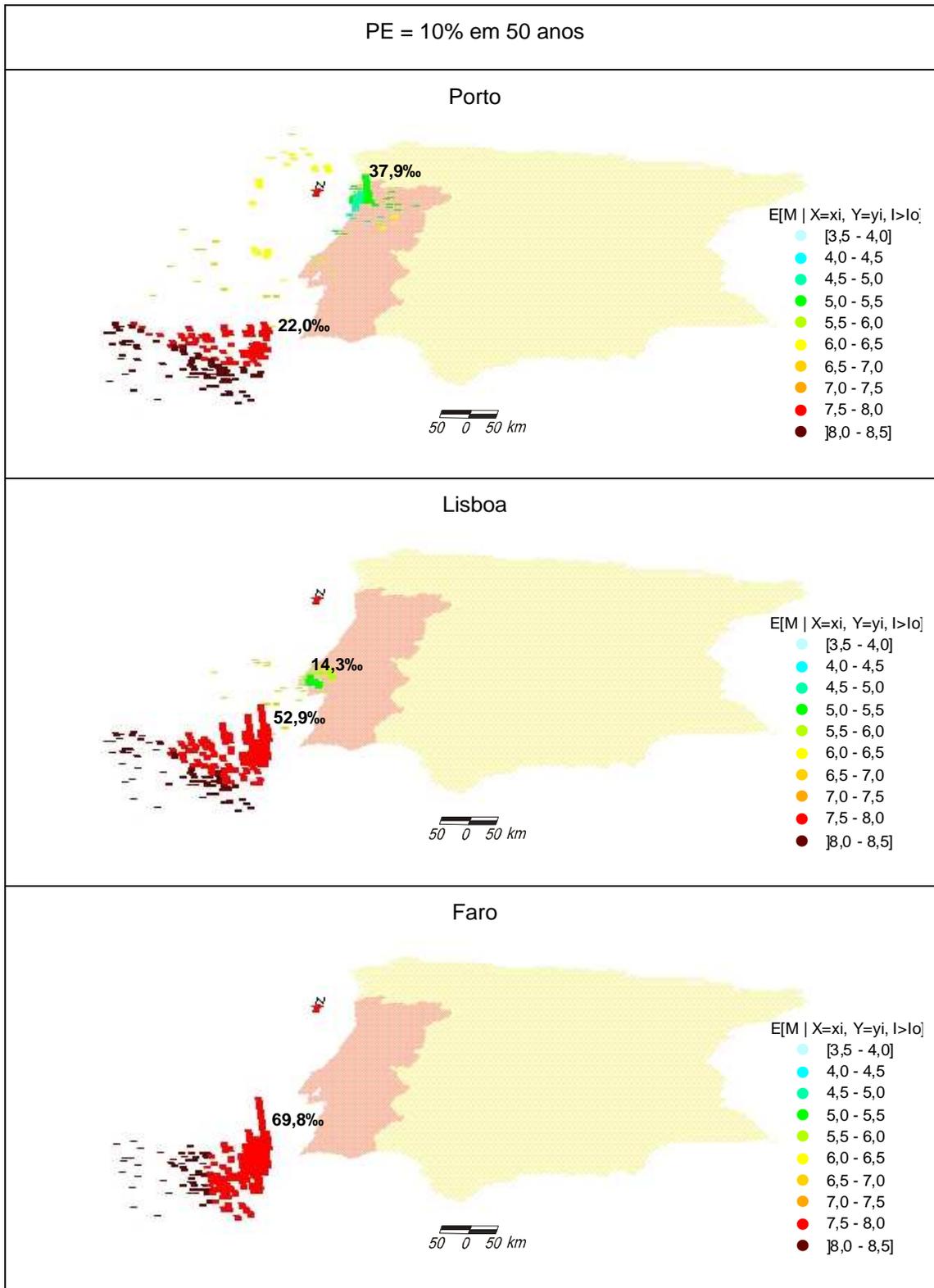


Figura 3.10b - Desagregação geográfica da perigosidade condicionada pela excedência do nível da acção sísmica correspondente ao período de retorno de **475 anos** para o Porto, Lisboa e Faro; magnitude esperada condicional de cada célula.

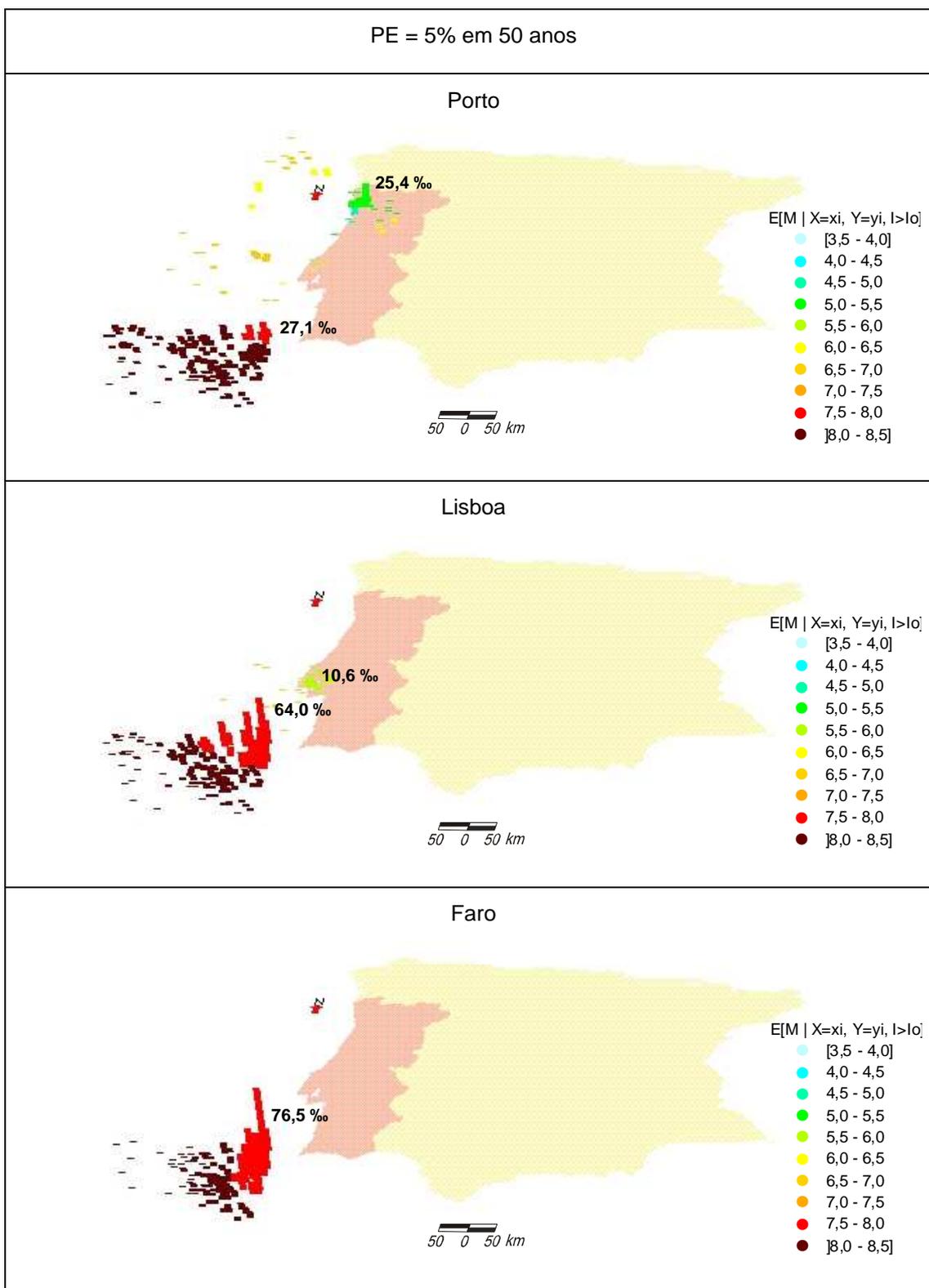


Figura 3.10c - Desagregação geográfica da perigosidade condicionada pela excedência do nível da acção sísmica correspondente ao período de retorno de 975 anos para o Porto, Lisboa e Faro; magnitude esperada condicional de cada célula.

A altura das barras destas figuras representa a contribuição relativa, para a perigosidade global do concelho, da sismicidade de cada célula geográfica em que se subdividiu a região sísmica; lembre-se que cada célula tem a dimensão de  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ . Especifica-se, em permilagem, a contribuição relativa dos picos modais para o nível de perigosidade de cada concelho. A cor presente nas figuras 3.10a a 3.10c identifica a magnitude esperada condicional,  $E[M | (X = x_i, Y = y_i), I > I_0]$ , que ocorre em cada célula geográfica  $i$  para cada um dos concelhos considerados.

No quadro 3.4 reúnem-se os valores modais resultantes da desagregação geográfica 2D, identificados por *1ª moda geográfica*, o módulo do vector  $\mathbf{R}$  correspondente, bem como o valor da sua contribuição relativa para a perigosidade global do concelho. Apresentam-se também as *2ªs modas geográficas* quando a sua contribuição relativa é comparável à da primeira moda. O mesmo quadro contém os valores esperados da magnitude e do desvio calculados para as células geográficas modais e condicionados pela excedência do nível de perigosidade respectivo. As cores representadas no quadro têm o objectivo de distinguir os períodos de retorno.

Quadro 3.4 – Valores modais da desagregação geográfica para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos; valores esperados condicionais de  $M$  e  $\mathcal{E}$ .

	Per. ret [ano]	Moda geog.	cont. [%o]	$(\hat{X}, \hat{Y})$ [km]	$\hat{R}$ [km]	$E[M   (x_i, y_i), I_0]$	$E[\mathcal{E}   (x_i, y_i), I_0]$
Porto	95	1ª	56,5	176,3; 481,2	23,8	4,8	1,83
	475	1ª	37,9	176,3; 481,2	23,8	5,1	2,29
		2ª	22,0	67,3; -4,4	477,9	7,9	1,00
	975	1ª	27,1	67,3; -4,4	477,9	8,0	1,13
		2ª	25,4	176,3; 481,2	23,8	5,2	2,47
Lisboa	95	1ª	34,7	67,3; -4,4	204,7	7,2	0,67
		2ª	28,9	146,5; 213,6	38,3	5,1	2,63
	475	1ª	52,9	67,3; -4,4	204,7	7,7	0,82
	975	1ª	64,0	67,3; -4,4	204,7	7,8	0,94
Faro	95	1ª	52,8	67,3; -4,4	150,8	7,0	0,66
	475	1ª	69,8	67,3; -4,4	150,8	7,6	0,77
	975	1ª	76,5	67,3; -4,4	150,8	7,8	0,82

Os aspectos que sobressaem da análise das figuras 3.10a a 3.10c e do quadro 3.4 são:

1. Os valores esperados condicionais da magnitude crescem com o período de retorno e com a distância entre a célula geográfica e o local em estudo, como seria de esperar. Os valores esperados condicionais do desvio são mais elevados para os cenários locais de magnitude mais baixa do que para os cenários afastados de maior magnitude.
2. Nos períodos de retorno mais baixos as células geográficas localizadas na proximidade do concelho em análise apresentam uma maior contribuição relativa para a perigosidade global; tal significa que quanto menor é o período de retorno mais influente é a sismicidade local, exceptuando-se o concelho de Faro. Pelo contrário, as contribuições modais das fontes afastadas crescem com o aumento do período de retorno.
3. As maiores contribuições para a perigosidade dos concelhos de Faro e Lisboa resultam de uma mesma célula localizada a cerca de 70 km a WSW do Cabo de S. Vicente. A sismicidade desta célula geográfica contribui, grosso modo, com valores entre cerca de 35 e 65‰ para a perigosidade sísmica do concelho de Lisboa e entre 50 e 80‰ para a perigosidade sísmica do concelho de Faro. Esta célula localiza-se na vizinhança do vértice da zona de geração 6 mais próximo do Continente Português.
4. No concelho de Faro as contribuições relativas das células próximas são muito reduzidas, tendo uma expressão diminuta, de 4‰, para o período de retorno de 95 anos. As células que exibem alguma contribuição relativa para a perigosidade deste concelho são afastadas e geograficamente mais concentradas. Em Faro, a característica unimodal da análise de desagregação permite escolher cenários dominantes únicos para todos os períodos de retorno.
5. No concelho de Lisboa e para o período de retorno de 95 anos, a característica marcadamente bi-modal da distribuição permitiria escolher um segundo cenário dominante localizado perto de Benavente. A contribuição relativa da segunda moda geográfica (28,9‰), próxima, não está muito longe da contribuição da primeira moda geográfica (34,7‰), afastada. A magnitude esperada do cenário próximo é naturalmente mais baixa que a do afastado enquanto que o desvio esperado do cenário próximo é superior ao do cenário afastado.
6. No concelho do Porto a desagregação geográfica da perigosidade também possui um padrão bi-modal, principalmente nos períodos de retorno de 475 e 975 anos. Para os períodos de retorno de 95 e 475 anos, a célula geográfica que constitui a primeira moda localiza-se na proximidade do concelho do Porto. A célula geográfica que constitui a segunda moda no período de retorno de 475 anos, é a mesma que domina a perigosidade dos concelhos de Faro e Lisboa, tendo uma influência crescente para a perigosidade do concelho do Porto à medida que o período de retorno aumenta, passando mesmo a ser a primeira moda no período de retorno de 975 anos.

### 3.5.4. Desagregação bidimensional em $M-R$

Na figura 3.11 ilustra-se a análise de desagregação 2D em que as variáveis aleatórias consideradas são, simultaneamente, a magnitude e a distância.

Na mesma figura exibem-se ainda os valores modais da distribuição de probabilidade conjunta e os dois momentos de primeira ordem,  $E[M]$  e  $E[R]$  das variáveis aleatórias  $M$  e  $R$ . Nesta figura o volume total representado deveria igualar 1000%. Contudo, para aligeirar a representação gráfica foram eliminadas as contribuições inferiores a 0,01%.

Note-se que, para um mesmo período de retorno os gráficos foram construídos com a mesma escala vertical, assegurando uma análise de maior pormenor nos períodos de retorno mais baixos.

As conclusões a retirar da análise de desagregação nas variáveis  $M$  e  $R$  são as seguintes:

1. No que toca ao Porto, a moda da distribuição no espaço geográfico localizava-se na proximidade deste concelho, até ao período de retorno de 475 anos. Quando a análise de desagregação passou a envolver simultaneamente as variáveis aleatórias magnitude e distância, a moda da distribuição passou a localizar-se, já a partir dos 475 anos de período de retorno, numa célula geográfica afastada e, conseqüentemente, com uma magnitude modal associada elevada. Ainda relativamente ao concelho do Porto, é evidente, na figura 3.11, a influência, para a sua perigosidade, das zonas de geração que lhe são próximas. Efectivamente, tal como na figura 3.8 para o concelho do Porto a distribuição possui um padrão multi-modal e as suas descontinuidades indicam a não unicidade dos cenários de ocorrência dominantes.
2. Também no concelho de Lisboa é patente, na figura 3.11, o carácter multi-modal da desagregação 2D em  $M-R$ , sendo esse padrão mais acentuado no período de retorno de 95 anos. Ao contrário do Porto, a análise de desagregação em  $M-R$  para Lisboa confirma os cenários modais afastados já apontados pela desagregação geográfica.
3. A análise de desagregação em  $M-R$  para o concelho de Faro confirma os cenários modais indicados pela desagregação geográfica, bem como o domínio da sismicidade da zona de geração 6 para a sua perigosidade, para todos os períodos de retorno.
4. Os momentos de primeira ordem  $E[M]$  da desagregação bidimensional em  $M-R$  coincidem praticamente com os valores médios da distribuição marginal da magnitude ilustrada na figura 3.8.

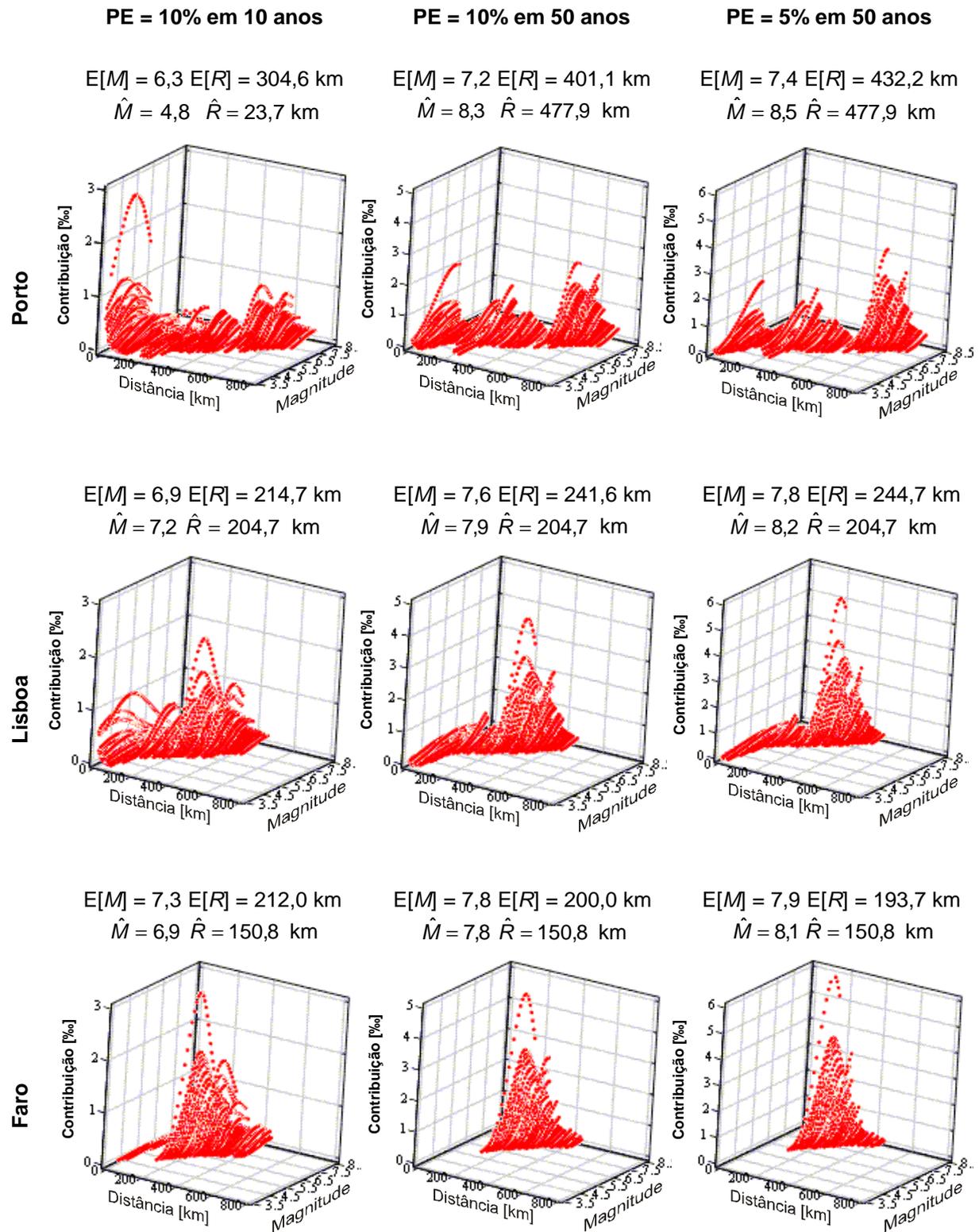


Figura 3.11 – Distribuição de probabilidade conjunta da magnitude e distância para os períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos e para o Porto, Lisboa e Faro.

### 3.5.5. Desagregação 4D e cenários de perigosidade sísmica

#### 3.5.5.1. Cenários de perigosidade sísmica para os 278 concelhos de Portugal Continental

Nesta secção sintetizam-se os resultados da análise de desagregação 4D da perigosidade sísmica de cada concelho de Portugal Continental numa única medida estatística de tendência central: a moda da distribuição de probabilidade conjunta das variáveis  $M-(X, Y)-\varepsilon$ , condicionada pela excedência de um nível de intensidade,  $I_0$ , para cada concelho. Deste modo cumpre-se o objectivo de se identificar um cenário de perigosidade sísmica fisicamente realizável para cada concelho, tal como se ilustra na figura 3.12.

Nos três mapas da parte superior da figura 3.12, representam-se, para os períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos, a localização e a magnitude dos cenários de perigosidade sísmica. As localizações dos círculos nela desenhados coincidem com o epicentro dos cenários, enquanto que a sua dimensão e cor identificam a magnitude do mesmo. Os concelhos são pintados da mesma cor da magnitude do seu cenário. Nos três mapas da parte inferior da figura 3.12 representam-se os valores do desvio  $\varepsilon$  por concelho que, em simultâneo com a localização e com a magnitude, caracterizam integralmente os cenários de perigosidade sísmica, condicionados pela excedência de um nível de intensidade associado a cada concelho e período de retorno.

Os traços mais importantes que ressaltam na figura 3.12 são os seguintes:

1. Quanto mais baixo é o período de retorno (i) maior é o número de cenários modais próximos do concelho, (ii) menor é, em geral, a magnitude do cenário do concelho e (iii) maior é a amplitude do desvio  $\varepsilon$ , principalmente nas regiões de Lisboa e Vale do Tejo, Alto Alentejo e Alentejo Central.
2. Para todos os períodos de retorno, a perigosidade sísmica dos concelhos do sul do Continente é dominada por um cenário localizado na célula de coordenadas militares  $(\hat{X}, \hat{Y}) = (67,3; -4,4)$  km.
3. Para os períodos de retorno de 475 e 975 anos, também é este o cenário que domina a perigosidade sísmica da maioria dos concelhos do Continente; são excepção os concelhos do norte do território e, no período de retorno de 475 anos, o concelho de Salvaterra de Magos. O cenário que mais provavelmente originará no concelho de Salvaterra de Magos um movimento sísmico que excede o nível da perigosidade sísmica do período de retorno de 475 anos tem um epicentro próximo de Benavente, uma magnitude de 5,0 e um desvio,  $\varepsilon$ , com uma amplitude de três graus de intensidade macrossísmica.
4. No caso dos cenários afastados, quanto mais a norte se situa o concelho analisado maior é a magnitude do cenário de perigosidade sísmica respectivo.

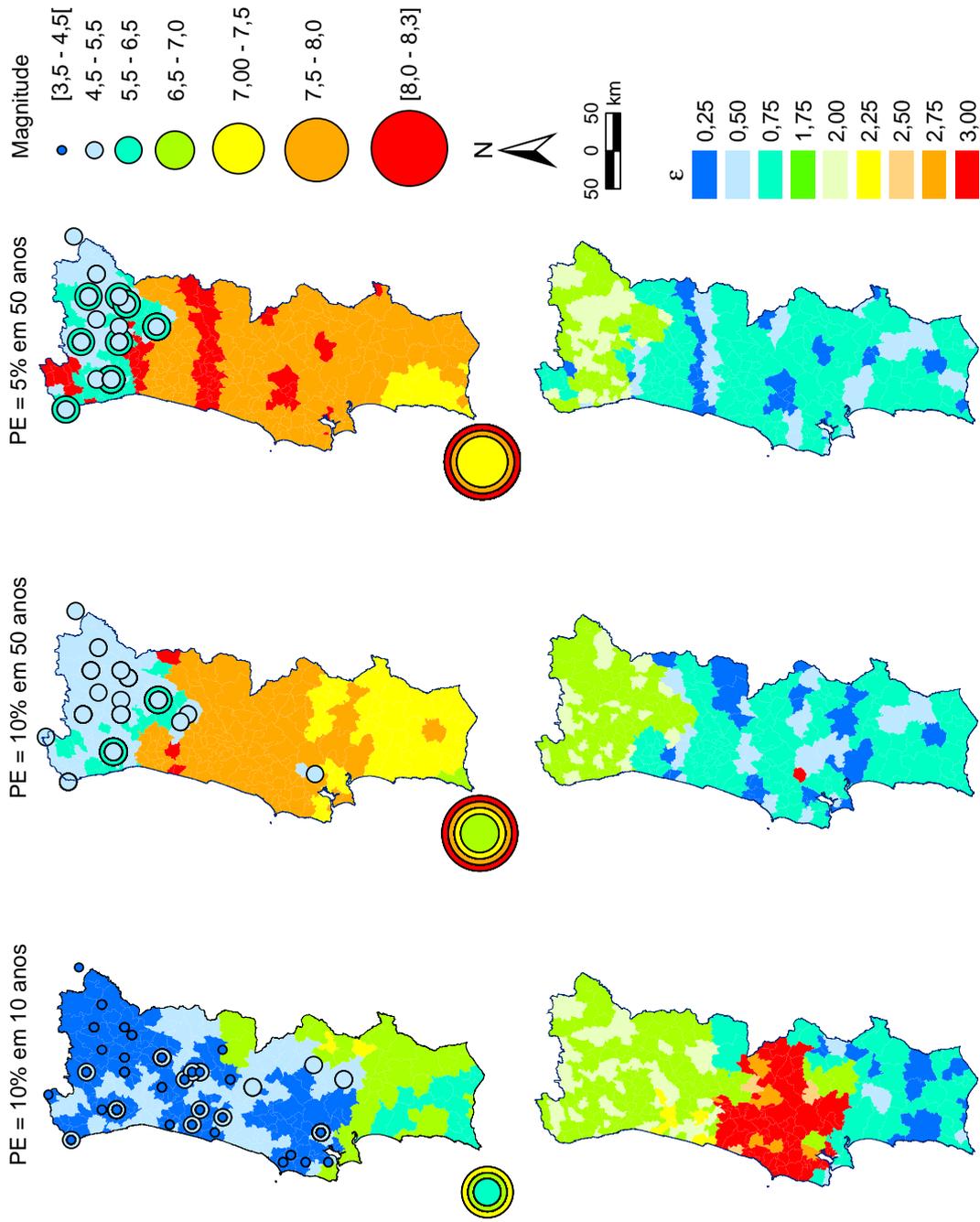


Figura 3.12 - Mapas dos cenários de perigosidade sísmica, por concelho, resultantes da análise de desagregação 4D. Em cima, localização geográfica e magnitude dos cenários. Em baixo, valor do desvio para cada concelho.

5. Existe complementaridade entre os mapas superiores relativos aos valores da magnitude e os inferiores relativos aos valores do desvio, verificando-se que magnitudes mais elevadas correspondem a desvios mais reduzidos e vice-versa. A heterogeneidade que surge no mapa do canto superior direito da figura resulta da ausência de suavização no traçado dos mapas. De facto, os concelhos assinalados pela faixa encarnada à latitude de Coimbra correspondem a cenários com magnitudes entre 8,0 a 8,2, enquanto que os seus vizinhos a norte e a sul correspondem a cenários com magnitudes entre 7,8 e 7,9, não existindo por isso uma grande variação na magnitude dos cenários. Já no mapa do canto inferior esquerdo da figura os valores elevados dos desvios modais observados na zona de Lisboa e Vale do Tejo e na região do Alto Alentejo resultam da necessidade de contrabalançar as intensidades reduzidas previstas pelo valor médio das leis de atenuação das zonas 5 e de terra, evocadas por cenários locais de baixa magnitude, de forma a assegurar a excedência dos níveis de perigosidade sísmica dos 95 anos de período de retorno.

A figura 3.12 tem a virtude de caracterizar, de forma sintética, os cenários de perigosidade sísmica para todos os concelhos de Portugal Continental, permitindo visualizar globalmente as variações de cariz regional e com os períodos de retorno. Não obstante, esta figura peca por não associar, de forma unívoca, alguns concelhos à localização e magnitude dos respectivos cenários. Por exemplo, no período de retorno de 95 anos, não é possível localizar, por concelho e inequivocamente, os cenários que possuem magnitude inferior a 5,5, enquanto que nos períodos de retorno de 475 e 975 anos não é possível localizar, sem qualquer dúvida, aqueles que possuem magnitude inferior a 6,5.

Para colmatar as lacunas de representação mencionadas listam-se, exaustivamente, no anexo B os cenários de perigosidade sísmica para os 278 concelhos de Portugal Continental descritos pelos valores modais da análise de desagregação 4D, ou seja, pelas células que mais provavelmente contribuem para a excedência dos níveis de perigosidade de 95, 475 e 975 anos de período de retorno. Listam-se também os valores das contribuições relativas para esses níveis de perigosidade. Neste anexo sobressaem os valores reduzidos das contribuições relativas dos cenários modais para a perigosidade total. Contudo, essas contribuições são inversamente proporcionais ao número de células em que se subdividiu a região em análise sendo, no presente caso, um número elevado, pois, como foi atrás referido, o espaço 4D em  $M$ ,  $(X, Y)$  e  $\varepsilon$  foi subdividido em 871 497 células.

A figura 3.13 exhibe os histogramas de frequência absoluta das magnitudes (em cima), módulo de  $\mathbf{R}$  (no meio) e desvios (em baixo) dos cenários de perigosidade sísmica 4D dos 278 concelhos de Portugal Continental.

Relativamente à distribuição da magnitude modal dos cenários (figura 3.13 em cima) observa-se que quanto maior for o período de retorno maior é o número de concelhos com cenários de magnitude elevada. Constata-se também que na desagregação 4D, e nos períodos de retorno exemplificativos, as magnitudes dos cenários não atingem a maior magnitude máxima da região sísmica, facto ocorrido na desagregação unidimensional em magnitude (figura 3.8).

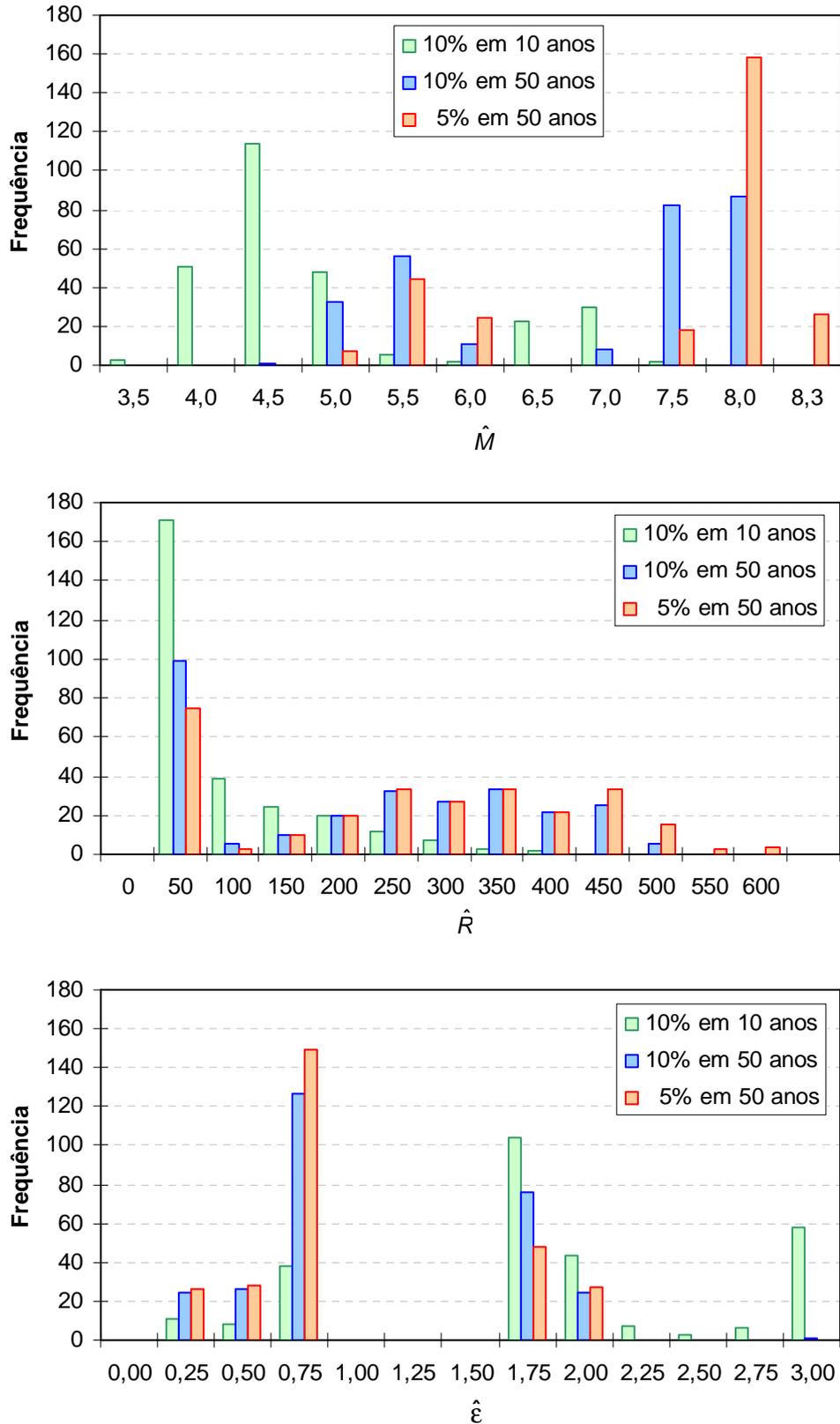


Figura 3.13 – Histograma das magnitudes, distâncias e desvios dos cenários de perigosidade sísmica dos períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos para os concelhos de Portugal Continental.

Sobre a distribuição das distâncias entre os cenários e os concelhos (figura 3.13 ao meio) constata-se que existem 171, 99 e 75 cenários a uma distância inferior a 50 km do concelho analisado, para os períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos, respectivamente, concluindo-se que o número de cenários próximos diminui com o aumento do período de retorno. No período de retorno de 95 anos, 58 (21%) dos cenários ocorrem na proximidade de Benavente enquanto outros 57 (21%) se localizam na célula situada a cerca de 70 km a WSW do Cabo de S. Vicente. Nos períodos de retorno de 475 e 975 anos esse último número cresce para 177 (64%) e para 203 (73%), respectivamente, não ocorrendo um número relevante de cenários na proximidade de Benavente. Assim se verifica a importância da zona de geração 6 para a perigosidade sísmica da maioria dos concelhos de Portugal Continental, particularmente nos períodos de retorno elevados.

Na distribuição dos desvios modais, representada na figura 3.13 em baixo, observa-se que estes variam entre 0,25 e 3,0 graus de intensidade macrossísmica, colocando em evidência a ausência de valores modais negativos para todos os concelhos de Portugal Continental. Na mesma figura ressalta também que para os períodos de retorno mais elevados (475 e 975 anos) a maioria dos concelhos apresenta cenários com desvios inferiores ou iguais a 0,75, enquanto que no período de retorno de 95 anos a maioria dos concelhos apresenta cenários com desvios superiores ou iguais a 1,75. Esta última constatação já tinha sido apontada no ponto 5 da análise da figura 3.12 quando se apreciou o mapa dos desvios correspondentes ao período de retorno de 95 anos. É possível justificá-la pela conjugação de uma série de factores:

1. Quanto menor for o período de retorno mais elevado é o número de concelhos com cenários locais. Relativamente aos concelhos pertencentes à região de Lisboa e Vale do Tejo esses cenários locais estão localizados na zona de geração 5, onde foi originado o sismo de Benavente de 1909 (figuras 3.1 e 3.12).
2. Esta zona de geração 5 é a que possui um valor  $b$  da lei exponencial negativa de Gutenberg-Richter mais elevado (expressão 2.7 e quadro 3.1), logo maior é o peso da densidade de probabilidade associada aos sismos de magnitude mais baixa.
3. Também esta zona de geração possui a maior dispersão da respectiva lei de atenuação (quadro 3.2), favorecendo contribuições para a excedência do nível de perigosidade à custa dessa dispersão.

A principal conclusão a retirar da análise da distribuição dos desvios modais é que para períodos de retorno mais baixos a perigosidade sísmica é dominada por cenários locais, com magnitude modal relativamente baixa e com um desvio modal elevado, por forma a assegurar a condição de excedência do nível  $I_0$  da perigosidade do concelho.

### 3.5.5.2. Análise de desagregação para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro

Apesar de tudo, a síntese apresentada no anexo B não traduz integralmente a análise efectuada, pois nos concelhos em que a perigosidade sísmica é dominada por eventos

múltiplos, particularmente nos concelhos das regiões Norte, Centro e Lisboa e Vale do Tejo e / ou nos períodos de retorno mais baixos, a utilização de uma estatística única é claramente insuficiente para descrever as características dos eventos sísmicos que mais provavelmente afectam o concelho.

Quando se pretende compreender, com maior pormenor, os factores regionais que controlam a perigosidade sísmica num local, é recomendável [Bazzurro & Cornell, 1999] conhecer, na íntegra, a distribuição multidimensional que caracteriza a desagregação e analisar os seus picos principais. Por exemplo, nos casos em que o mapa de desagregação do concelho revela a existência de duas ou mais localizações geográficas distintas, com massas de probabilidade 4D proeminentes, as respectivas células  $(\Delta m, (\Delta x, \Delta y), \Delta \epsilon)$  deverão ser encaradas como cenários sísmicos relevantes, para além do cenário modal.

No quadro 3.5 repetem-se os cenários modais constantes do anexo B respeitantes aos concelhos do Porto, Lisboa e Faro, identificados por *1ª moda geográfica*. Expõem-se, também, cenários secundários, bem como a sua contribuição relativa para a perigosidade, quando, para um dado período de retorno, se detecta a exposição de um determinado concelho a mais de que uma fonte de sismicidade, com localização geográfica distinta e com importância comparável à da primeira moda. Estes cenários secundários são identificados no quadro 3.5 por *2ª moda geográfica*. Os resultados da análise de desagregação da perigosidade sísmica 4D são assim descritos de forma mais completa para os três concelhos exemplificativos.

Os resultados da desagregação 4D que constam do quadro 3.5 apontam para a existência de duas modas geográficas relevantes no concelho do Porto para os períodos de retorno de 475 e 975 anos e no concelho de Lisboa para o período de retorno de 95 anos. No concelho de Faro a desagregação revela um carácter unimodal para todos os períodos de retorno.

Importa frisar que este padrão já tinha sobressaído na desagregação geográfica constante das figuras 3.10 (*a a c*) e do quadro 3.4, donde se retira a conclusão, válida para os três concelhos e períodos de retorno exemplificativos, que a desagregação geográfica 2D pode ser indicativa das localizações onde se efectuar a desagregação 4D completa. Observe-se também que, nas referidas situações exemplificativas, as magnitudes e os desvios esperados, condicionais às células geográficas modais e à excedência dos níveis de perigosidade (figura 3.10 e quadro 3.4), encontram-se relativamente próximos das magnitudes e desvios modais dos cenários 4D correspondentes (quadro 3.5). Porém, entre os cenários apurados pela desagregação geográfica (quadro 3.4) e os apurados pela desagregação 4D (quadro 3.5) verificaram-se dois casos de troca da primeira moda geográfica pela segunda. São os casos do concelho do Porto para o período de retorno de 975 anos e do concelho de Lisboa para o período de retorno de 95 anos.

Em contrapartida, os cenários geográficos identificados com base na desagregação 2D em  $(X, Y)$  conjugados com os valores médios ou com as modas das distribuições marginais 1D em  $M$  e  $\epsilon$  (figuras 3.8 e 3.9) conduzem a cenários caracterizados por valores de variáveis

pouco consistentes entre si e bastante diferentes dos cenários de perigosidade sísmica identificados pela desagregação 4D.

Quadro 3.5 – Cenários de perigosidade sísmica para os concelhos do Porto, Lisboa e Faro e para as probabilidades de excedência de 10% em 10 e 50 anos e de 5% em 50 anos.

	Per. ret [ano]	Moda geog.	cont. [%o]	$(\hat{X}, \hat{Y})$ [km]	$\hat{R}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{\epsilon}$
Porto	95	1 <sup>a</sup>	1,74	176,3; 481,2	23,8	4,5	1,75
	475	1 <sup>a</sup>	1,53	176,3; 481,2	23,8	5,4	1,75
		2 <sup>a</sup>	0,70	67,3; -4,4	477,9	7,8	0,75
	975	1 <sup>a</sup>	1,44	176,3; 481,2	23,8	5,8	1,75
		2 <sup>a</sup>	1,10	67,3; -4,4	477,9	8,0	0,75
	Lisboa	95	1 <sup>a</sup>	0,70	146,5; 213,6	38,3	4,5
2 <sup>a</sup>			0,63	67,3; -4,4	204,7	6,7	0,75
475		1 <sup>a</sup>	1,21	67,3; -4,4	204,7	7,4	0,75
975		1 <sup>a</sup>	1,89	67,3; -4,4	204,7	7,8	0,50
Faro	95	1 <sup>a</sup>	0,94	67,3; -4,4	150,8	6,4	0,75
	475	1 <sup>a</sup>	1,59	67,3; -4,4	150,8	7,2	0,75
	975	1 <sup>a</sup>	2,17	67,3; -4,4	150,8	7,5	0,75

Já a desagregação 2D em  $M-R$  (figura 3.11) conduz a cenários de perigosidade sísmica caracterizados por distâncias modais praticamente iguais às distâncias modais da desagregação 4D, nos casos em que os cenários de apurados pelas duas técnicas coincidem na mesma região. Entre os nove casos analisados a distância modal dos cenários é coincidente em seis. Efectivamente, a desagregação 4D prevê quatro cenários próximos, enquanto que a desagregação 2D em  $M-R$  apenas consegue prever um cenário próximo, o do concelho do Porto para o período de retorno de 95 anos. Nos restantes casos esta técnica aponta para a 2<sup>a</sup> moda geográfica preconizada pela desagregação 4D. Acresce que as magnitude modais indicadas pela desagregação 2D em  $M-R$  são sistematicamente superiores à previstas pela desagregação 4D, pois neste caso o modelo de atenuação recorre ao desvio  $\epsilon$  para satisfazer a condição de excedência do nível  $I_0$  de perigosidade do concelho.

### 3.5.5.3. Mapas do movimento do solo para os cenários escolhidos

Para terminar esta secção aborda-se a questão da distribuição geográfica do movimento do solo para os cenários de perigosidade sísmica escolhidos.

Com efeito, como foi referido na secção 2.5.2 quando os parâmetros que caracterizam o cenário de perigosidade sísmica são substituídos na lei de atenuação obtém-se um nível de movimento sísmico próximo dos níveis obtidos pela análise probabilística de perigosidade, constringido, teoricamente, a exceder esse nível. A experiência de Bazzurro & Cornell [1999] nesta matéria permite-lhes afirmar que diferenças relativas entre os movimentos previstos pelas leis de atenuação das fontes dominantes (modais) e os níveis do movimento obtidos pela análise probabilística da perigosidade são inferiores a 20%.

Porém, no presente trabalho observou-se que a substituição dos valores modais  $\hat{M}$ ,  $(\hat{X}, \hat{Y})$ ,  $\hat{\epsilon}$  na lei de atenuação da zona de geração em que se localiza o cenário conduziu a diferenças muito reduzidas relativamente ao nível de perigosidade dos concelhos. Estas diferenças variam entre 0,0001 e 2,77%, com um valor médio de 0,58% e um desvio padrão de 0,45%, entre os 14 períodos analisados e no universo dos 278 concelhos do Continente. Verificou-se ainda que os movimentos previstos pelo modelo de atenuação excedem sempre os níveis de perigosidade associados aos cenários.

Para os três períodos de retorno exemplificativos as diferenças relativas entre o movimento previsto e o nível de perigosidade correspondente são ainda mais reduzidas atingindo um valor máximo de 1,56%. Em conclusão, a reprodução dos movimentos sísmicos a partir dos cenários de perigosidade sísmica conduziu a mapas que não se distinguem dos representados na figura 3.5, pelo que não são repetidos nesta secção.

### **3.6. Comparação com os resultados de outros estudos**

Uma breve comparação dos resultados deste trabalho com os de outros estudos permite tecer algumas considerações apresentadas nesta secção.

Sobre a reavaliação probabilística da perigosidade sísmica, os níveis agora obtidos são ligeiramente inferiores aos preconizados por Sousa [1996], o que constitui um resultado coerente, pois os modelos de atenuação agora utilizados não discriminam as formações geológicas superficiais do local em análise, sendo influenciados maioritariamente pela informação relativa a locais classificados como rocha, que constituem cerca de 70% das 3209 observações constantes da Base de Dados de Informação Macrossísmica [Sousa & Oliveira, 1997].

A perigosidade sísmica agora reavaliada possui níveis ligeiramente inferiores aos publicados por Montilla [2000] e Montilla & Casado [2002] para a mesma região. Em particular, na região de Lisboa, na Península de Setúbal e no Alentejo Litoral a sul desta Península os resultados médios apresentados pelos referidos autores chegam a ser superiores em cerca de um grau aos resultados agora obtidos. Em Faro os resultados agora obtidos são, em média, cerca de meio grau de intensidade macrossísmica inferiores aos publicados por esses autores. Note-se que no presente trabalho a perigosidade de Faro é mais severa que a de Lisboa, configurando a situação inversa da apresentada pelos autores espanhóis. Nas regiões Norte e Centro do território Continental essas diferenças não são tão acentuadas. As diferenças

mencionadas são razoavelmente explicadas pela disparidade dos modelos utilizados, principalmente os de atenuação, que são, como foi atrás referido, uma das maiores fontes de incerteza num estudo probabilístico de perigosidade sísmica.

Por outro lado, os resultados obtidos não são directamente comparáveis com os trabalhos de Vilanova [2004] e Vilanova & Fonseca [2004] que trabalharam com leis de atenuação em acelerações máximas [Ambraseys, 1996; Atkinson & Boore, 1997 e Toro *et al.*, 1997, citados por Vilanova & Fonseca, 2004]. Os resultados apresentados por estes autores restringem-se ao período de retorno de 475 e à região do vale inferior do Tejo. No entanto, tentou-se uma comparação aproximada, convertendo o mapa da figura 3.5, ao centro, traçado em intensidades macrossísmicas, para acelerações de pico, recorrendo ao modelo de Trifunac & Brady [1975]. Com este procedimento obtiveram-se, na região do vale inferior do Tejo, valores ligeiramente superiores aos que constam do mapa de Vilanova & Fonseca [2004] que resultou da média ponderada das leis de atenuação referidas. Obviamente, o mapa agora obtido não apresenta a protuberância no concelho de Vila Franca de Xira que surge no mapa de Vilanova & Fonseca [2004] e que decorre destes autores terem introduzido no cálculo da perigosidade um modelo de falha para a sismicidade acima da magnitude 6.

Quanto aos resultados da análise de desagregação da perigosidade sísmica eles são diferentes dos publicados por Montilla [2000] e por Montilla *et al.* [2002]. No primeiro trabalho o autor efectuou a análise de desagregação 2D em  $M$  e  $R$  para algumas cidades seleccionadas da Península Ibérica, entre elas as cidades Portuguesas de Lisboa e Faro. No estudo de 2002 os autores efectuaram a análise de desagregação 2D em termos de  $M$  e  $R$ , e subsequente desagregação geográfica em termos do azimute, para o período de retorno de 475 anos, em 15 cidades do sul e oeste da Península Ibérica, incluindo sete cidades de Portugal Continental. Montilla *et al.* [2002] concluem que a perigosidade na cidade de Lisboa para os 475 anos de período de retorno é inteiramente ou quase inteiramente controlada pela sismicidade local. Na cidade de Faro, embora o cenário modal se encontre a uma distância inferior a 50 km, não se pode ignorar a perigosidade gerada a distâncias entre 150 e 250km, relacionada com a sismicidade localizada a oeste e sudoeste do Cabo de S. Vicente. A relevância do cenário sísmico localizado a 70 km a WSW do Cabo de S. Vicente, ou a 200km a SSW da cidade de Lisboa, ou ainda a 150 km a oeste de Faro não é tão evidente na análise dos autores espanhóis, embora estes também concluam sobre a grande importância da zona sísmica situada a sudoeste do Cabo de S. Vicente para a perigosidade da região.

Na presente análise verificou-se que os resultados obtidos são muito dependentes da distribuição geográfica da sismicidade, facto que, por um lado, pode ser discutível para períodos de retorno elevados, e que, por outro, conduziu à opção de se utilizar um catálogo instrumental, filtrado de réplicas, para o qual existe maior confiança nas localizações epicentrais do que a existente para o catálogo histórico. Em conformidade, as discrepâncias observadas são justificáveis pelas diferenças dos catálogos utilizados e também pelas diferenças já mencionadas nas leis de atenuação.

### **3.7. Conclusões**

Ao longo do capítulo 3 detalharam-se as várias etapas conducentes à reavaliação da perigosidade sísmica em Portugal Continental com vista a efectuar a sua desagregação. Cumpriu-se um dos principais objectivos deste capítulo, estabelecendo-se os cenários de perigosidade sísmica para os 278 concelhos de Portugal Continental. Desta forma, e citando McGuire [1995], «fecha-se o ciclo» entre a análise probabilística da perigosidade sísmica e o estabelecimento de cenários que prevejam a ameaça sísmica nos locais em análise.

#### ***Avaliação da perigosidade sísmica e análise da desagregação***

Os traços mais salientes revelados pelos resultados da avaliação probabilística da perigosidade sísmica e pela análise de desagregação são:

1. A reavaliação probabilística da perigosidade sísmica tendo em consideração a distribuição espacial da actividade sísmica na região conduz a resultados concordantes com os de estudos efectuados no passado [Sousa, 1996]. O excelente ajuste das distribuições beta às curvas de perigosidade sísmica de todos os concelhos do Continente providencia uma descrição analítica da perigosidade que é fundamental para as avaliações de risco sísmico efectuadas no capítulo 7.
2. A desagregação geográfica 2D revelou ser uma excelente indicadora de localizações específicas onde efectuar a desagregação 4D, restringindo sobremaneira o domínio da análise 4D, possibilitando assim um procedimento bastante mais económico em termos de tempo de processamento. Esta conclusão foi verificada para os três períodos de retorno e concelhos exemplificativos.
3. Os resultados obtidos pela análise de desagregação são muito dependentes da distribuição geográfica da sismicidade o que sugere a realização de um estudo de sensibilidade sobre os catálogos utilizados.

#### ***Estudo dos cenários de perigosidade sísmica***

Do estudo de cenários de perigosidade sísmica tiram-se as seguintes conclusões:

1. Quanto mais baixo for o período de retorno maior o número de cenários modais próximos dos concelhos analisados, bem como a amplitude do desvio,  $\epsilon$ . No período de retorno de 95 anos, 21% dos cenários dos concelhos de Portugal Continental situam-se na proximidade de Benavente, têm uma magnitude inferior a 5,3 e um desvio superior a 1,75. Conclui-se que a zona de sismogénese que engloba o vale inferior do Tejo é relativamente importante, nos períodos de retorno baixos, para a perigosidade de alguns concelhos dos distritos de Lisboa, Leiria, Santarém, Évora e Portalegre.
2. A perigosidade sísmica da maioria dos concelhos de Portugal Continental é dominada por eventos geograficamente afastados e severos, com magnitude tanto maior quanto

mais a norte se situar o concelho analisado. Para todos os concelhos do sul do Continente e períodos de retorno a análise de desagregação aponta para cenários unimodais, localizados concretamente numa célula a cerca de 70 km a WSW do Cabo de S. Vicente. Esta célula constitui a localização geográfica dos cenários de 21, 64 e 73% dos concelhos de Portugal Continental, nos períodos de retorno de 95, 475 e 975 anos, respectivamente. Conclui-se que zona de sismogénese localizada a sudoeste do Cabo de S. Vicente é a zona de maior importância para a perigosidade sísmica de Portugal Continental, pois nela se concentra a maioria dos cenários, em particular os relativos aos períodos de retorno elevados.

3. A existência de uma diferença muito reduzida entre o movimento previsto pelos cenários modais e o nível de perigosidade correspondente, permite substituir um mapa de perigosidade sísmica do Continente, traçado para um dado período de retorno, por 278 cenários representativos desse período de retorno. Essa proximidade dos níveis de movimento é conseguida à custa de valores elevados do desvio do movimento do solo no caso do cenário ser próximo e de valores mais reduzidos desse desvio no caso do cenário ser afastado.

### ***Conclusões de índole geral***

Em termos gerais os aspectos que sobressaem da pesquisa efectuada são:

1. Os resultados e conclusões do estudo de cenários de perigosidade sísmica permitem delinear uma metodologia possível, de base probabilística, para a avaliação de cenários regionais de risco sísmico. É neste último contexto que a desagregação probabilística da perigosidade sísmica terá aplicações no decorrer do presente trabalho, pois cenários fundamentados na desagregação, são utilizados na avaliação do risco sísmico acumulado em regiões extensas de Portugal Continental (secção 7.5.3).
2. A análise de desagregação é uma oportunidade para melhor compreender os resultados da análise probabilística da perigosidade sísmica, na perspectiva de identificar as fontes sísmicas que dominam esses resultados, providenciando uma caracterização fundamentada dos movimentos sísmicos previstos para o local em análise. Por exemplo, o conhecimento da desagregação, em particular da desagregação geográfica, facilita a comunicação e a interpretação dos resultados da análise probabilística da perigosidade sísmica.
3. Noutra perspectiva, a análise de desagregação auxilia a compreensão da influência da informação de base, das etapas metodológicas e das opções tomadas sobre os resultados da análise probabilística da perigosidade sísmica, apontando para um processo iterativo de aperfeiçoamento de todo o procedimento. Por exemplo, a ausência de folga para o crescimento das magnitudes modais observada na análise 1D em magnitude (figura 3.8) indica que se deverá devotar uma atenção especial à estimativa da magnitude máxima de cada zona de geração. Outro exemplo refere-se à localização de cenários de

perigosidade sísmica de magnitudes elevadas na vizinhança do vértice da zona de geração 6 mais próximo do Continente Português. Tal localização e valores de magnitude não são compatíveis com a integração nesta zona de geração de estruturas tectónicas com desenvolvimento para norte ou para este deste vértice e que sejam capazes de gerar sismos de magnitude elevada. Neste contexto levanta-se a hipótese de se efectuar a revisão do modelo de zonas de geração de forma a contemplar propostas recentes sobre os modelos de rotura do sismo de 1755.

4. A identificação de cenários de ocorrência com base na desagregação da perigosidade sísmica permite a realização de estudos mais detalhados, com aplicação de modelos mais sofisticados que recorram aos cenários identificados como informação de partida. Por exemplo, os cenários de perigosidade sísmica podem ser usados (i) para sintetizar acelerogramas consistentes com os eventos sísmicos que dominam a perigosidade e estimar a sua duração, (ii) na modelação da resposta local de depósitos de solos ou (iii) na avaliação de danos com base em modelos que prevejam a resposta sísmica do edificado. Obviamente, para introduzir um cenário de perigosidade sísmica numa lei de atenuação espectral ter-se-ia que integrar a variável  $\varepsilon$  e realizar a desagregação num espaço 2D em  $M-R$ .

### ***Trabalho futuro***

Por fim, referem-se alguns desafios de desenvolvimento que decorrem das conclusões atrás apontadas:

1. A verificação da importância da zona de sismogénese localizada a sudoeste do Cabo de S. Vicente para a perigosidade de Portugal Continental, fundamenta a relevância da investigação sobre a localização da fonte do sismo de 1755, sobre a localização das fontes de outros sismos históricos severos e sobre o estabelecimento de leis de atenuação espectrais válidas para esta zona e compatíveis com os sismos de grande magnitude que ela é capaz de gerar.
2. A utilidade da análise de desagregação nos estudos de perigosidade sísmica sugere que seja aplicada na actualização das características da acção sísmica para efeitos regulamentares, sobretudo se essa análise de desagregação for realizada em ordenadas espectrais tendo por base a perigosidade avaliada em termos de espectros de resposta uniformes.
3. Uma vez que, em boa aproximação, os cenários modais de cada local e período de retorno são capazes de prever o nível de perigosidade que os condiciona, é tentador propor o desenvolvimento de uma página de rede interactiva, semelhante à da USGS. Nela o utilizador poderia escolher um concelho do Continente e um período de retorno, recebendo em troca os resultados da análise de desagregação para esse concelho, acessíveis sob a forma de gráficos e ficheiros de texto, compatíveis com os níveis de perigosidade regulamentares, podendo ainda obter os sismogramas sintéticos associados ao cenário solicitado.

## 4. INVENTÁRIO DOS ELEMENTOS EM RISCO

### 4.1. Introdução

O inventário dos elementos em risco efectuado neste estudo baseou-se na informação apurada no XIV Recenseamento Geral da População e no IV Recenseamento Geral da Habitação (Censos 2001) realizados pelo Instituto Nacional de Estatística em 2001 [INE, 2002a].

A recolha efectuada sobre a informação estatística dos Censos 2001 regeu-se por três objectivos principais: (i) o apuramento dos quantitativos habitacionais e populacionais existentes em Portugal Continental, (ii) o conhecimento da distribuição geográfica dos elementos expostos ao risco sísmico e (iii) a caracterização das tipologias construtivas mais representativas e frequentes de Portugal Continental para, no capítulo 5, caracterizar a respectiva vulnerabilidade à acção sísmica.

Para o efeito, são identificadas na secção 4.2 as unidades estatísticas e variáveis a apurar nos Censos 2001 consideradas relevantes para a concretização dos objectivos atrás mencionados, enquanto que nas secções 4.3 e 4.4 se procede, respectivamente, à apresentação das estatísticas e da distribuição geográfica dos quantitativos habitacionais e populacionais. Na secção 4.5 analisam-se as estatísticas apresentadas e o capítulo termina, com a secção 4.6, em que se apresentam as principais conclusões retiradas da análise do inventário dos elementos em risco.

Neste levantamento adoptou-se a freguesia como unidade geográfica de análise adequada ao detalhe do estudo. À data dos Censos 2001, Portugal Continental encontrava-se dividido em 4 037 freguesias.

Foi ponderada a hipótese de se recorrer a informação estatística de um nível mais desagregado, como sejam as secções ou as subsecções estatísticas que em 2001 representavam, respectivamente, 15 536 e 170 145 áreas homogéneas de construção no território do Continente. Essa escolha implicaria, obviamente, um grande acréscimo do volume de dados a analisar, teria custos acrescidos de georeferenciação e aumentaria o esforço computacional de forma proporcional ao número de unidades analisadas. A opção de se utilizar as freguesias como unidades geográficas de análise justifica-se pelo facto de existir, para estas divisões administrativas, informação estatística facilmente acessível, referenciada geograficamente e considerada suficiente para ilustrar a aplicação das metodologias de avaliação de danos e perdas em consequência de sismos.

Por outro lado, considerou-se que não seria viável, no âmbito desta pesquisa, modelar a mobilidade espacial e o tipo de ocupação dos indivíduos presentes nas 4 037 freguesias de Portugal Continental para diversos períodos do dia, da semana e épocas do ano, bem como a quantificação das existências de tipologias construtivas de edifícios não residenciais em que essa população se encontra.

Em consequência das limitações apontadas ao inventário utilizado, o estudo de risco sísmico subsequente apresentará dois condicionalismos importantes: (i) o parque edificado analisado restringe-se ao habitacional e (ii) as estimativas de perdas humanas reportam-se a cenários de ocorrência de sismos em que a maioria dos indivíduos se encontram nas suas habitações, nomeadamente a eventos que ocorrem durante a noite.

## 4.2. Apuramentos efectuados nos Censos 2001

As unidades estatísticas primárias *edifício*, *alojamento* e *indivíduo*, observadas nos Censos 2001, são identificadas como os elementos em risco sobre os quais se pretende recolher informação. Não serão apurados os quantitativos globais das unidades estatísticas alojamento e indivíduo pois, face aos objectivos do presente inventário, não é relevante a informação relativa aos *alojamentos do tipo familiar não clássico* (barracas, casas rudimentares de madeira, alojamentos improvisados em construção não destinada à habitação, alojamentos móveis, locais não destinados à habitação) nem a informação relativa aos indivíduos temporariamente presentes nos alojamentos, mas não residentes.

Foram assim analisados os *Questionários de Edifício, Alojamento e Individual* dos Censos 2001 de forma a identificar as variáveis consideradas pertinentes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco, a que se chamarão *factores de vulnerabilidade*.

Os três questionários referidos e as definições de conceitos associados às unidades estatísticas e variáveis seleccionadas podem ser encontrados em INE [2002b].

Identificada a informação estatística a recolher foram solicitados ao Instituto Nacional de Estatística os seguintes apuramentos:

1. Número de *edifícios (clássicos)*, segundo a *época de construção ou reconstrução do edifício*<sup>1</sup> por *número de pavimentos*<sup>2</sup> e por *tipo de estrutura da construção do edifício*<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> *Época de construção* - período de construção do edifício propriamente dito, ou o período de construção da parte principal do edifício, isto é, aquela que corresponde à estrutura, quando diferentes partes de um edifício correspondem a épocas distintas, ou o período de reconstrução, para os edifícios que sofreram uma transformação completa [INE, 2003].

<sup>2</sup> *Pavimento* - cada um dos planos habitáveis ou utilizáveis do edifício, qualquer que seja a sua relação com o nível do terreno. São considerados como *pavimento* o rés-do-chão, assim como as caves e águas furtadas habitáveis ou utilizáveis com funções complementares à habitação [INE, 2003].

<sup>3</sup> *Tipo de estrutura da construção do edifício* - identifica os elementos utilizados na construção ou reconstrução dos edifícios, no que respeita à estrutura que os suporta. Assim, deverão ser identificados os elementos resistentes do edifício, ou seja, os materiais que servem de estrutura à própria construção e que servem de suporte aos pavimentos, independentemente dos materiais empregues nas paredes exteriores [INE, 2003].

2. Número de *alojamentos familiares clássicos*, segundo a *época de construção ou reconstrução do edifício* por número de pavimentos e por tipo de estrutura da construção do edifício.
3. Número de *alojamentos colectivos*, segundo a *época de construção ou reconstrução do edifício* por número de pavimentos e por tipo de estrutura da construção do edifício.
4. Número de *indivíduos residentes*<sup>4</sup> em alojamentos familiares clássicos e do tipo colectivo, segundo a *época de construção ou reconstrução do edifício* por número de pavimentos e por tipo de estrutura da construção do edifício.

Para garantir a exaustividade dos apuramentos de alojamentos e indivíduos residentes foi necessário contabilizar todos os edifícios do *tipo clássico* independentemente do seu *tipo de utilização*, que somaram, no território Continental, 2 997 659 edifícios.

Relembre-se que, como o próprio nome indica (*Censos 2001 - XIV Recenseamento Geral da População e IV Recenseamento Geral da Habitação*) apenas foram apurados nos Censos 2001 os edifícios habitacionais e conseqüentemente, como foi referido na introdução, os edifícios não residenciais serão excluídos da análise de risco sísmico subsequente.

Os edifícios recenseados dividem-se entre *principalmente residenciais* e *principalmente não residenciais*, em que os primeiros representam 98,9% do total dos edifícios do Continente e os segundos conferem os restantes 1,1%. Por sua vez, os edifícios principalmente residenciais subdividem-se em *exclusivamente residenciais* e em *parcialmente residenciais*. Os primeiros representam 91,1% do total de edifícios clássicos e os segundos 7,8% do mesmo total.

No quadro 4.1 reúnem-se as modalidades das variáveis seleccionadas do Questionário de Edifício dos Censos 2001 com o objectivo de caracterizar a vulnerabilidade sísmica destes elementos em risco. Neste quadro as variáveis são identificadas pelo número respectivo da pergunta deste questionário. Para simplificar a análise, a variável número de pavimentos foi classificada em 7 classes também constantes do quadro 4.1. Também por uma questão de simplificação de linguagem as variáveis *época de construção ou reconstrução do edifício* e *tipo de estrutura da construção do edifício* passarão a ser designadas simplesmente por *época de construção* ou *época* e por *tipo de estrutura*, respectivamente.

Uma recolha de dados estatísticos semelhante à agora realizada já tinha sido previamente efectuada para caracterizar os elementos em risco e a vulnerabilidade do parque habitacional de Portugal Continental [Sousa *et al.*, 2000a] e da Área Metropolitana de Lisboa e concelhos limítrofes [Carvalho *et al.*, 2002a], também com um nível de análise geográfica da freguesia. Essa recolha diferia da actual pois incidia sobre os apuramentos dos Censos 91,

---

<sup>4</sup> Ao longo do presente trabalho os *indivíduos residentes em alojamentos familiares clássicos e do tipo colectivo* serão designados simplesmente por *ocupantes, indivíduos, população ou pessoas residentes*.

pelo que além das contagens conduzirem a quantitativos distintos também algumas variáveis então apuradas não coincidiam com as dos Censos 2001.

Quadro 4.1 – Factores de vulnerabilidade e respectivas modalidades obtidos nos Censos 2001.

6. Número de pavimentos	13. Época de construção ou reconstrução dos edifícios	14. Tipo de estrutura da construção do edifício
1	Antes de 1919	Estrutura de Betão armado
2	1919 a 1945	
3	1946 a 1960	Paredes de alvenaria argamassada, com placa
4	1961 a 1970	Paredes de alvenaria argamassada, sem placa
5 a 7	1971 a 1980	Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta
8 a 15	1981 a 1985	
+ de 15	1986 a 1990	Outros (madeira, metálica, etc.)
	1991 a 1995	
	1996 a 2001	

De facto, as variáveis número de pavimentos e tipo de estrutura da construção do edifício poderão levantar problemas de comparabilidade inter-censitária. Entre os Censos 91 e os 2001 ocorreu uma alteração na forma de contar o número de pavimentos dos edifícios e na variável que classifica “os materiais que servem de estrutura à própria construção”.

Assim, nos Censos 91 só eram considerados pavimentos os que se encontravam acima do solo, sendo o rés-do-chão incluído; as águas-furtadas não eram consideradas e as caves também não, exceptuando as que dispusessem de luz natural [INE, 1994]. Nos Censos 2001 a variável número de pavimentos inclui todos os planos habitáveis ou utilizáveis do edifício, qualquer que seja a sua relação com o nível do terreno, sendo considerado como «pavimento» o rés-do-chão, assim como as caves e águas furtadas habitáveis ou utilizáveis com funções complementares à habitação [INE, 2002a].

A variável dos Censos 91 *principais materiais utilizados na construção - elementos resistentes* foi substituída nos Censos 2001 pela variável *tipo de estrutura da construção do edifício*. Graças à participação do LNEC nos trabalhos preparatórios dos Censos 2001, as modalidades desta variável são agora mais consentâneas com a prática construtiva do País.

Além das alterações na variável número de pavimentos e na variável que caracteriza a resistência estrutural dos edifícios, os Censos 2001 também contemplaram novas variáveis pertinentes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional. Listam-se de seguida essas novas variáveis seguindo, mais uma vez, a numeração constante do Questionário de Edifício dos Censos 2001:

8. *Configuração do R/C.*
9. *O edifício é isolado ou é cinco vezes mais alto que os edifícios adjacentes?*
10. *O edifício é de gaveto ou de extremo de banda?*
11. *O edifício é mais alto (mais do que dois pavimentos) do que qualquer dos edifícios adjacentes?*
17. *Necessidade de reparações:*
  - 17.1. *Na estrutura;*
  - 17.2. *Na cobertura;*
  - 17.3 *Nas paredes e caixilharias exteriores.*

As modalidades da variável Necessidade de reparações constam do quadro 4.2. No anexo C (secção C.2) apresenta-se a descrição destas modalidades para o caso concreto da variável Necessidade de reparações na estrutura.

A estas novas variáveis primárias adicionou-se ainda uma nova variável derivada que traduz o *Estado de conservação* global do edifício, cujas modalidades, apresentadas no quadro 4.2, são obtidas através da ponderação das respostas da variável Necessidade de reparações.

*Quadro 4.2 – Modalidades das variáveis Necessidade de reparações e Estado de conservação.*

Necessidade de reparações	Estado de conservação
Nenhumas	Sem necessidade de reparação
Pequenas	A necessitar de pequenas reparações
Médias	A necessitar de médias reparações
Grandes	A necessitar de grandes reparações
Muito Grandes	Muito degradado

É sobejamente conhecido que os factores de vulnerabilidade atrás mencionados condicionam a resposta sísmica das estruturas. Refiram-se por exemplo os trabalhos de Carvalho & Oliveira [1999], Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004], Oliveira [1989 a e b] e Tiedemann [1992] que mencionam diversos factores estruturais de agravamento do comportamento sísmico estrutural semelhantes às novas variáveis dos Censos 2001. Este tema será abordado com maior detalhe no capítulo 5.

### 4.3. Estatísticas dos elementos em risco

Na presente secção mostram-se algumas estatísticas sobre os elementos em risco, bem como de cruzamentos das variáveis seleccionadas dos Censos 2001 para caracterizar a sua vulnerabilidade sísmica.

No quadro 4.3 sintetizam-se as contagens das existências apuradas nos Censos 2001 para Portugal Continental.

*Quadro 4.3 – Valores totais das existências dos elementos em risco em Portugal Continental*

Elementos em risco	Portugal Continental
Edifícios	2 997 659
Alojamentos familiares clássicos	4 832 537
Alojamentos colectivos	7 369
Alojamentos familiares clássicos + alojamentos colectivos <sup>5</sup>	4 839 906
Ocupantes	9 789 109

Nas figuras 4.1 a 4.4 apresentam-se, por época de construção, as existências dos elementos em risco, em termos de números absolutos e relativos (representados por barras) e acumulados (representados por pontos). Nestas figuras as barras mais escuras e os pontos a cheio identificam as existências anteriores ao primeiro regulamento Português de projecto sísmo-resistente [RSCCS, 1958].

De realçar que estes gráficos incluem duas escalas horizontais e duas verticais. No que toca às escalas verticais, a da esquerda, que se refere às barras, mede as existências absolutas por época e a da direita, que se refere aos pontos, mede as existências acumuladas em cada época, em percentagem. No que toca às escalas horizontais, a inferior é uma escala ordinal em que foram classificadas as existências por época de construção e, entre parêntesis, assinalado o número de anos correspondente a cada época. O facto das classes observadas na variável época de construção não corresponderem a intervalos de tempo iguais conduziu à construção da segunda escala horizontal onde são representadas as existências acumuladas até ao final de cada época. No canto superior direito das figuras mostram-se, a negrito, os valores totais apurados para cada elemento em risco.

---

<sup>5</sup> Ao longo do presente trabalho a soma dos alojamentos familiares clássicos com os alojamentos colectivos será chamada simplesmente de *alojamentos*.

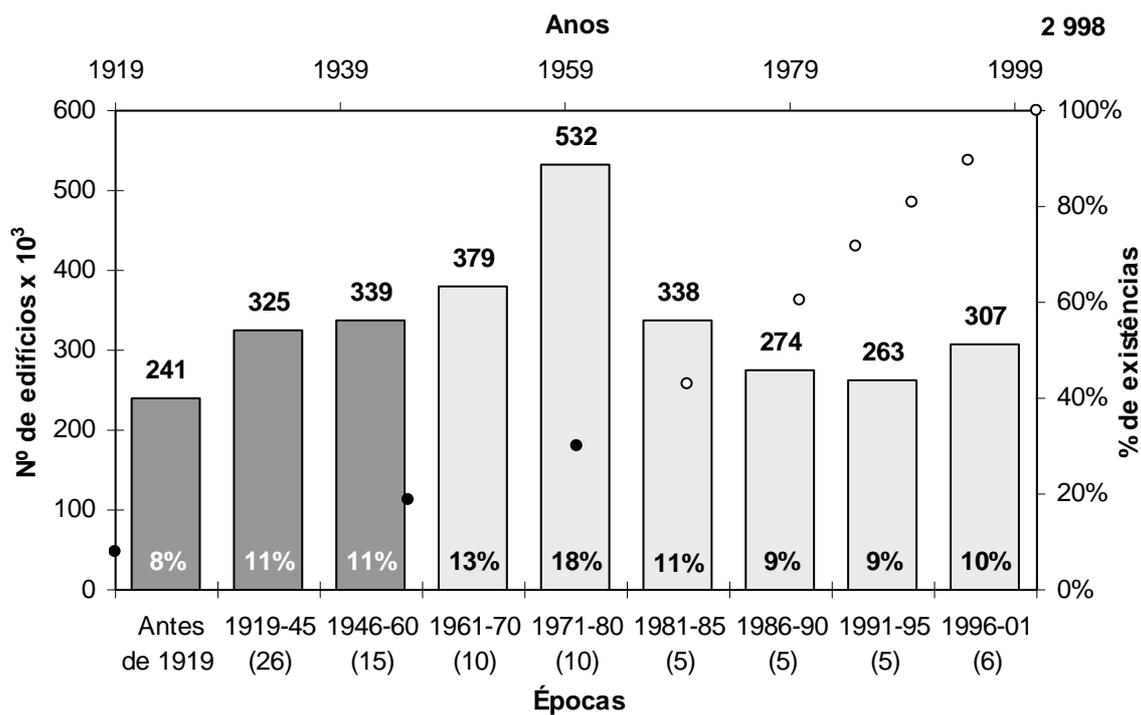


Figura 4.1 – Número de *edifícios* por *época de construção* (Censos 2001).

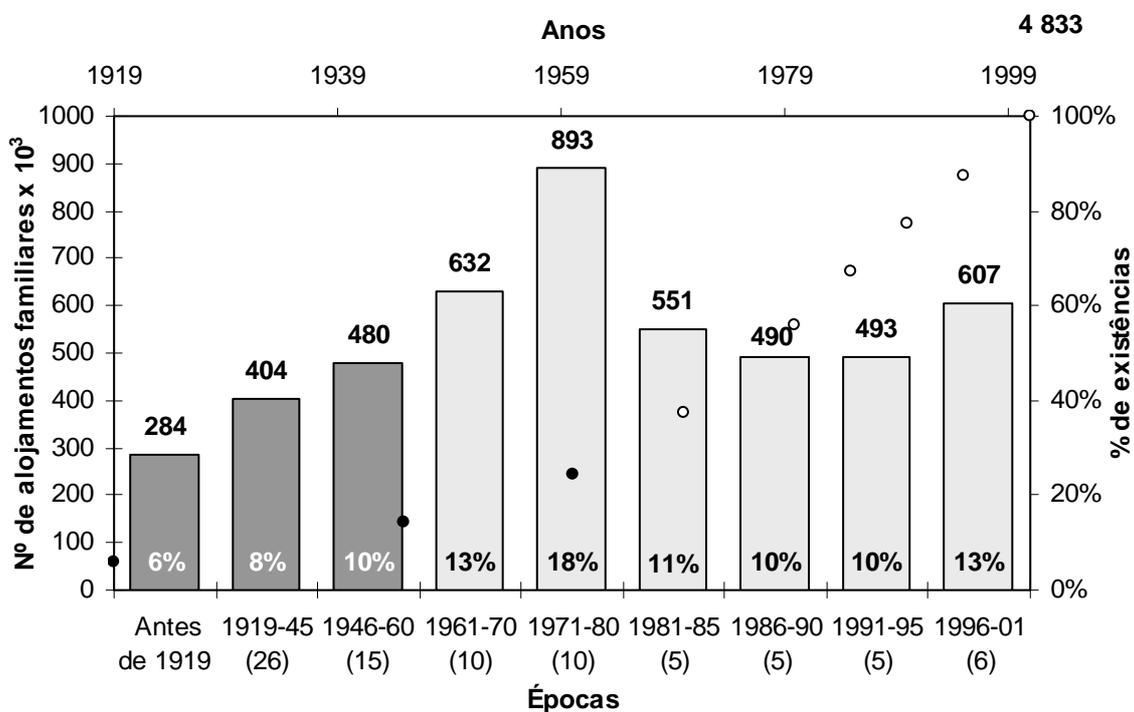


Figura 4.2 – Número de *alojamentos familiares clássicos* por *época de construção* (Censos 2001).

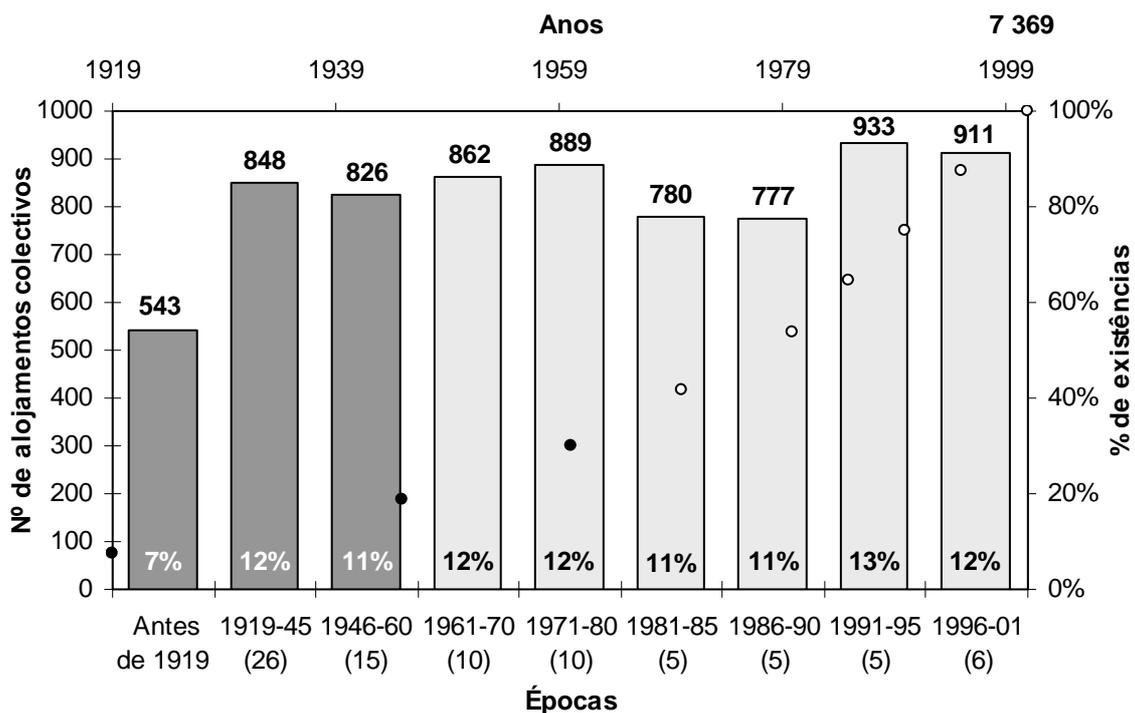


Figura 4.3 – Número de alojamentos colectivos por época de construção (Censos 2001).

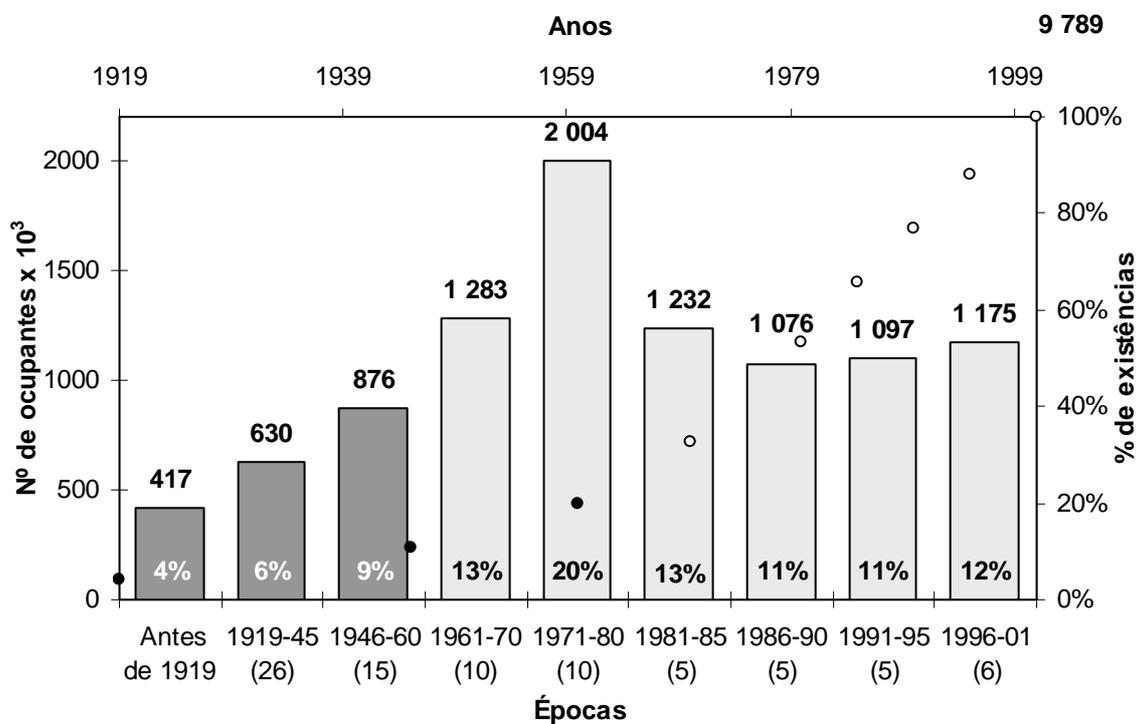


Figura 4.4 – Número de ocupantes residentes em alojamentos familiares clássicos e em alojamentos colectivos, por época de construção (Censos 2001).

Entre os Censos 91 e 2001 verificou-se uma variação positiva global de todos os elementos em risco. No quadro 4.4 sintetizam-se os acréscimos das existências ocorridos neste período de 10 anos em Portugal Continental, em valores absolutos e em valores relativos aos quantitativos globais de 1991 (taxas de variação).

Quadro 4.4 – Variação das existências entre os Censos 91 e 2001.

Elementos em risco	#2001 - #1991	(#2001 - #1991) / #1991 [%]
Edifícios	284 793	10,5
Alojamentos	831 427	20,7
Indivíduos	486 768	5,23

O INE [INE, 2002b] destaca que a forte expansão do parque habitacional nacional se deveu ao crescimento dos alojamentos familiares ocupados mas de *uso sazonal ou secundário* que cresceram a uma taxa muito superior (40,2%) à do total de alojamentos. Em 2001, estes alojamentos possuíam um peso de 18% no universo dos alojamentos nacionais. Por outro lado os *alojamentos familiares vagos* representam uma percentagem de 11% no mesmo universo. Salienta-se assim a importância das residências não habituais no parque habitacional nacional.

Para apreciar a forma como as eventuais demolições e reconstruções de edifícios se repartem pelas épocas de construção construiu-se a figura 4.5 ilustrando a diferença entre os números de edifícios contabilizados nos Censos 2001 e 91.

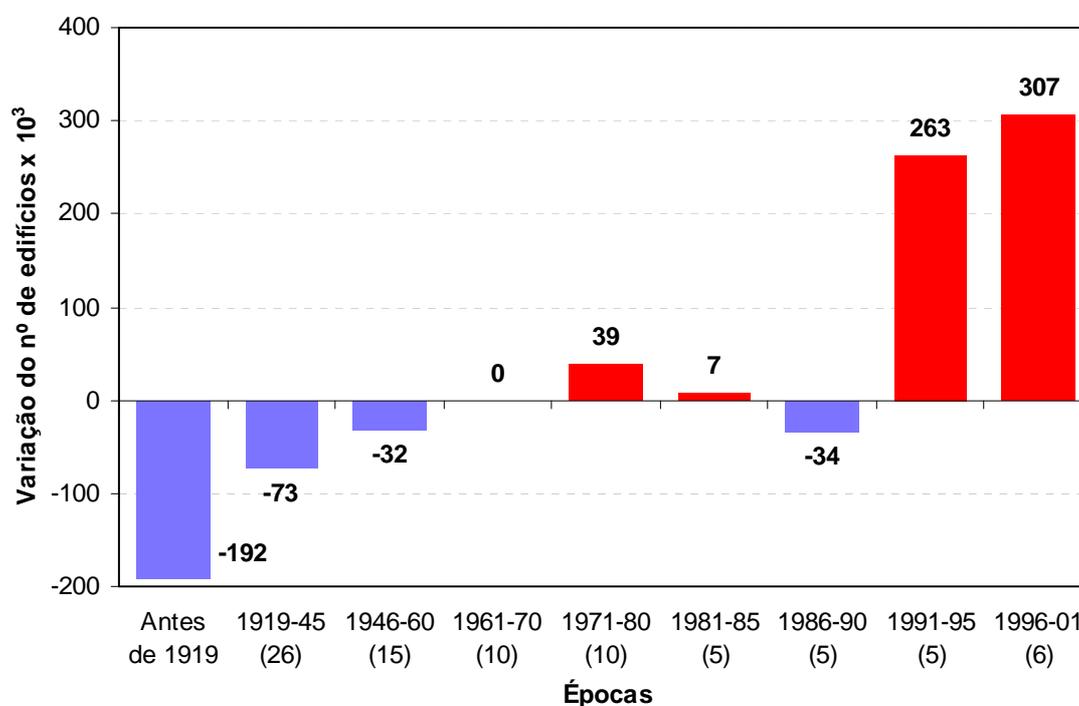


Figura 4.5 – Variação, por época de construção, do número de edifícios entre os Censos 91 e 2001.

As variações positivas (barras vermelhas) registadas nas épocas de 1971 a 1980 e de 1981 a 1985 poderão corresponder a erros cometidos na classificação da época de construção dos edifícios nos Censos 91 ou 2001, pois não é possível, no período compreendido entre 1991 e 2001, terem sido construídos ou remodelados os edifícios datados da época de 1971 a 1985.

A figura 4.6 ilustra, por época de construção, a razão entre o número de alojamentos familiares clássicos e o número de edifícios, indicando-se do lado direito (em itálico e negro) a razão dos respectivos valores totais.

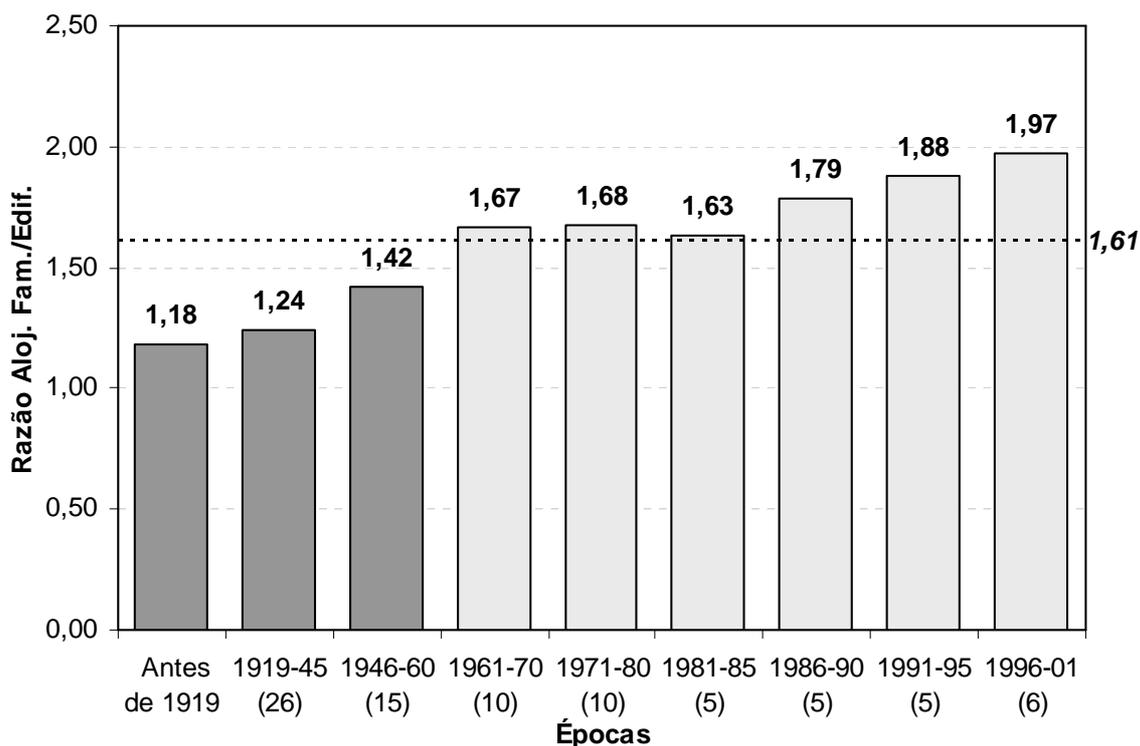


Figura 4.6 – Razão entre o número de alojamentos familiares clássicos e o número de edifícios, por época de construção (Censos 2001).

Na figura 4.7 apresenta-se, por época de construção, a razão do número de ocupantes residentes em alojamentos familiares clássicos e em alojamentos colectivos pela soma do número de alojamentos familiares clássicos com o número de alojamentos colectivos, indicando-se do lado direito (em itálico e negro) o indicador de ocupação global para o território continental. Em 2001 a dimensão média das famílias clássicas no Continente era de **2,79** pessoas.

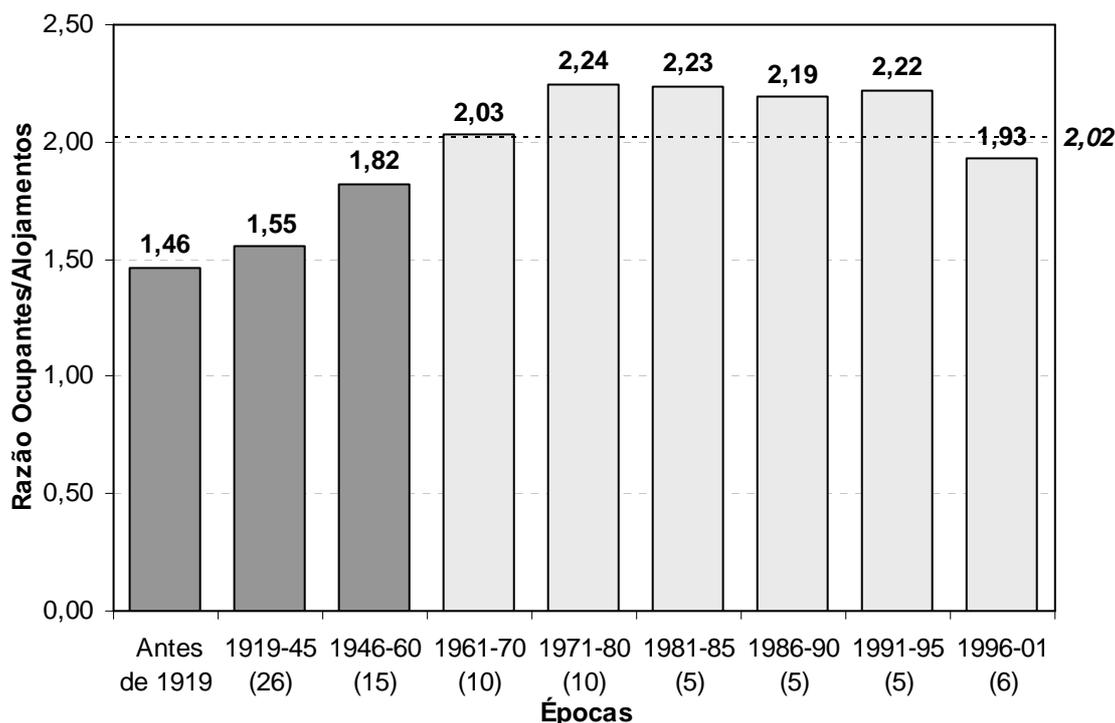


Figura 4.7 – **Razão** entre o número de **ocupantes** residentes em alojamentos familiares clássicos e em alojamentos colectivos e o número de **alojamentos** familiares clássicos e alojamentos colectivos, por **época de construção** (Censos 2001).

Analisa-se, de seguida, a relação entre os quantitativos de elementos em risco e as datas de entrada em vigor dos regulamentos de projecto sismo-resistente Portugueses, de forma apresentar-se um primeiro indicador da vulnerabilidade do parque habitacional Português.

O primeiro, o Regulamento de Segurança das Construções contra os Sismos, data de 1958 [RSCCS, 1958], tendo sido parcialmente revogado em 1961 pelo Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes [RSEP, 1961]; o regulamento actualmente em vigor, o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, data de 1983 [RSA, 1983].

Para efeito de contabilização das existências e respectiva vulnerabilidade atendeu-se às datas de entrada em vigor dos regulamentos e aos períodos de transição da sua aplicação, assumindo-se que (i) nas épocas de construção anteriores a 1960 os edifícios não sofreram dimensionamento sismo-resistente, (ii) entre 1961 e 1985 os edifícios não dispensados de dimensionamento para as acções sísmicas terão sido projectados segundo as disposições do RSCCS e RSEP e (iii) nas épocas posteriores a 1985 terão sido projectados de acordo com o disposto no RSA.

No quadro 4.5 apresentam-se as percentagens de edifícios construídos em data anterior à entrada em vigor do primeiro regulamento, as percentagens de alojamentos familiares

clássicos e colectivos existentes nestes edifícios e a percentagem de pessoas residentes nesses edifícios, comparando os apuramentos efectuados nos Censos 91 com os dos Censos 2001.

*Quadro 4.5 – Percentagem de existências em edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento de projecto sismo-resistente.*

Elementos em risco (<= 1960)	Censos 91	Censos 2001
Edifícios [%]	44,3	30,2
Alojamentos familiares clássicos + alojamentos colectivos [%]	37,8	24,2
Pessoas residentes [%]	34,5	19,6

No quadro 4.6 reúnem-se as existências em edifícios de Betão armado construídos durante a vigência dos regulamentos de projecto sismo-resistente. Os valores percentuais constantes deste quadro são relativos aos quantitativos totais de cada elemento em risco em Portugal Continental.

*Quadro 4.6 – Existências em edifícios de **Betão armado** construídos durante a vigência dos regulamentos de projecto sismo-resistente.*

Época de construção	Elementos em risco	Portugal Continental
1961-85 (RSCCS, 1958 RSEP, 1961)	Edifícios	451 875 (15,1%)
	Alojamentos familiares clássicos	1 103 325 (22,8%)
	Alojamentos colectivos	1 441 (19,6%)
	Pessoas residentes	2 397 584 (24,5%)
1986-2001 RSA, 1983	Edifícios	377 062 (12,6%)
	Alojamentos familiares clássicos	1 018 108 (21,1%)
	Alojamentos colectivos	1 545 (21,0%)
	Pessoas residentes	2 079 699 (21,2%)

As restantes figuras desta secção incidem primordialmente sobre a unidade estatística edifício, de forma a analisar estatisticamente os respectivos factores de vulnerabilidade que condicionarão o risco sísmico dos restantes elementos expostos, ou seja dos alojamentos e dos ocupantes.

Na figura 4.8 ilustra-se a distribuição do número de edifícios por tipo de estrutura e na figura 4.9 apresenta-se a distribuição do número de edifícios por tipo de estrutura e por época de construção. A frequência do número de edifícios, por tipo de estrutura, condicionada pela época de construção, é exibida na figura 4.10.

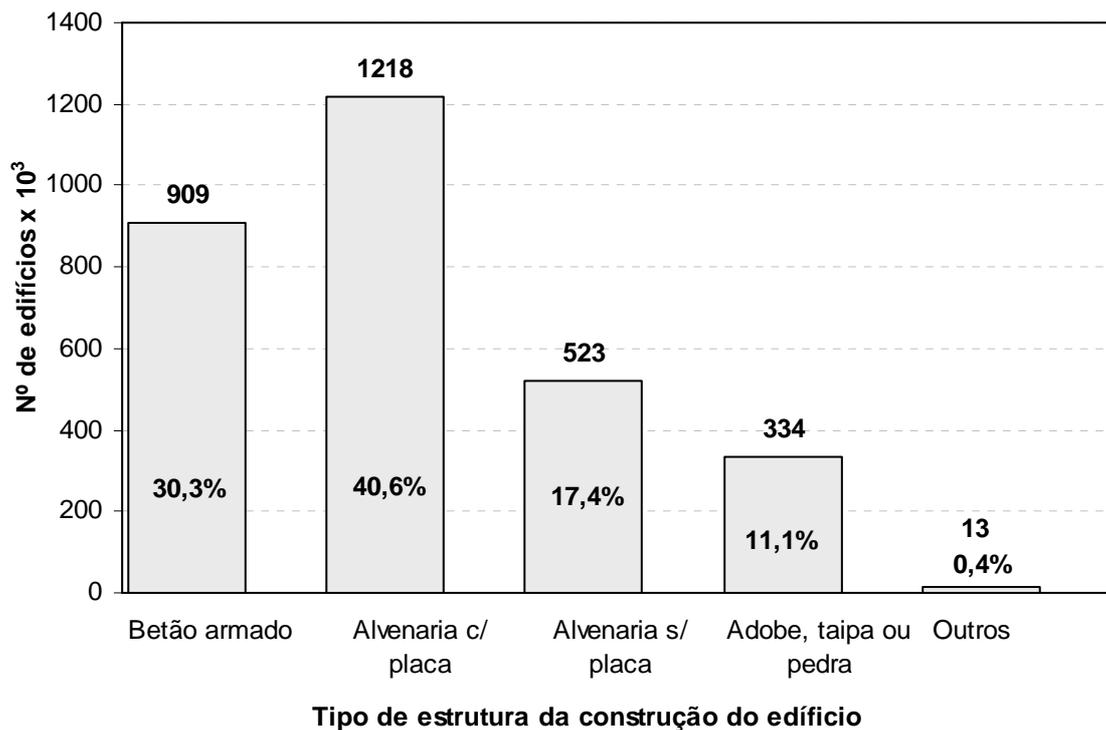


Figura 4.8 – Número de edifícios por tipo de estrutura (Censos 2001).

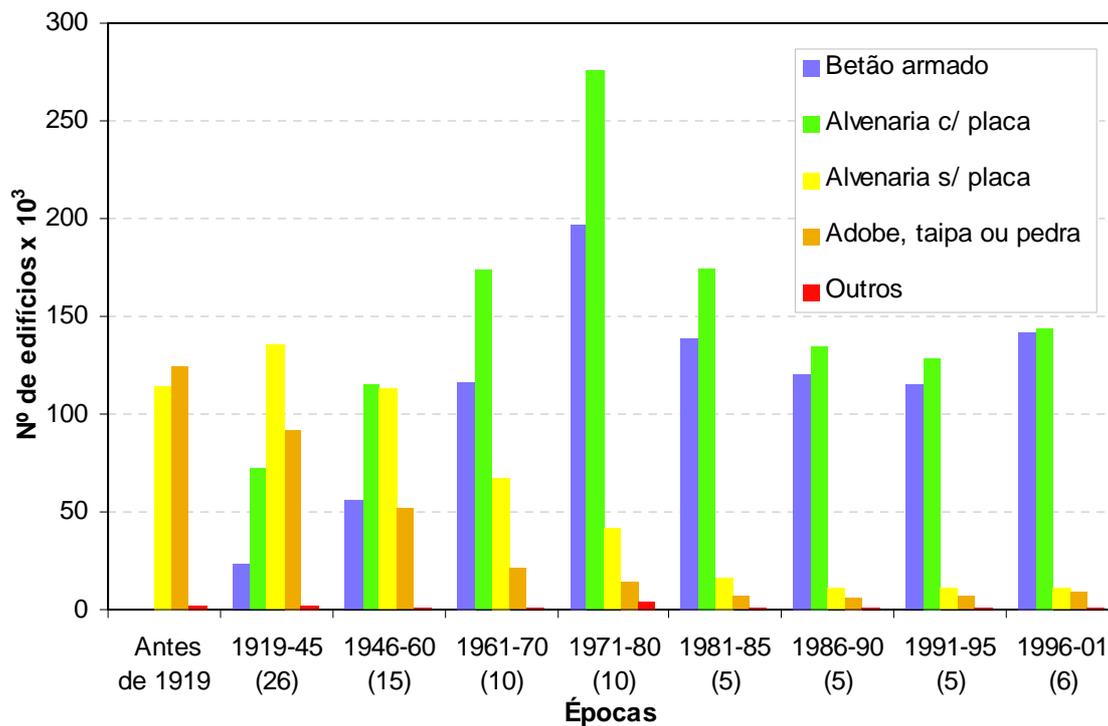


Figura 4.9 – Número de edifícios por época de construção e tipo de estrutura (Censos 2001).

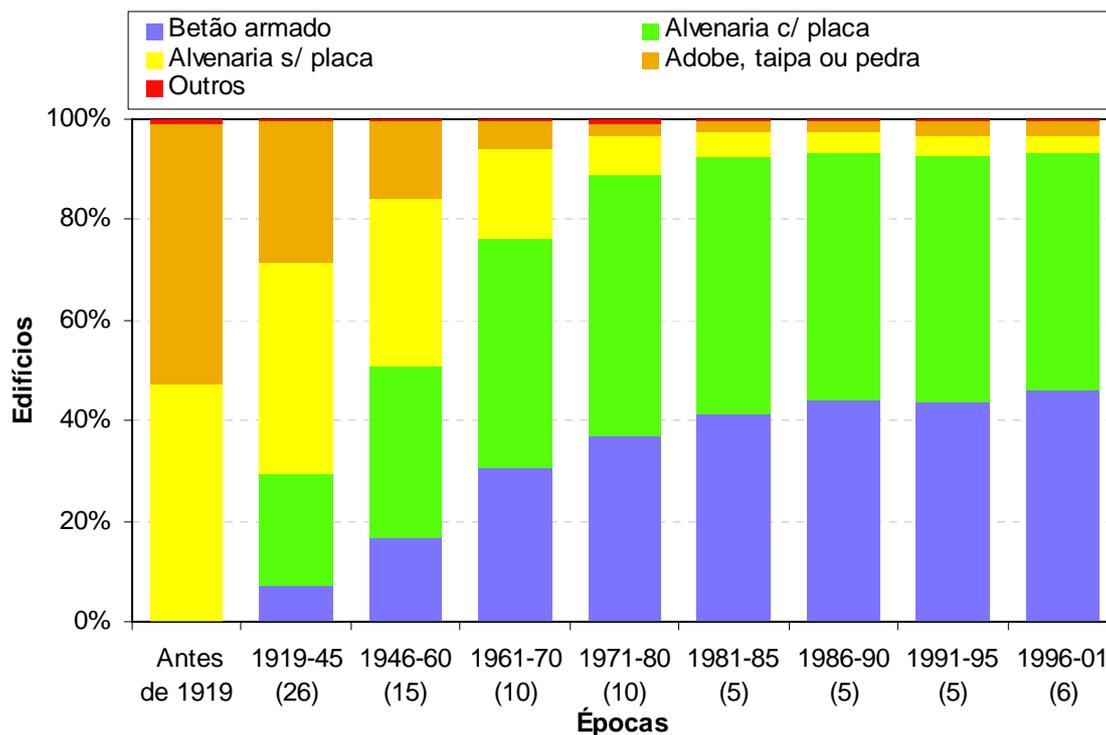


Figura 4.10 – Percentagem de *edifícios* por *tipo de estrutura* dada a *época de construção* (Censos 2001).

No quadro 4.7 apresenta-se a distribuição dos elementos em risco por número de pavimentos.

Quadro 4.7 – Distribuição de elementos em risco por número de pavimentos.

Pavimentos	Edifícios		Alojamentos		Ocupantes	
	#	[%]	#	[%]	#	[%]
1	1 246 149	41,6	1 302 896	26,9	2 484 466	25,4
2	1 312 102	43,8	1 518 058	31,4	3 255 426	33,3
3	273 133	9,11	495 068	10,3	1 043 190	10,7
4	79 735	2,66	446 480	9,23	910 509	9,30
5-7	67 018	2,24	660 488	13,7	1 288 749	13,2
8-15	18 814	0,628	390 181	8,06	758 540	7,75
+ de 15	708	0,024	26 735	0,552	48 229	0,493
Total	2 997 659	100	4 839 906	100	9 789 109	100

Nas figuras 4.11 a 4.13 mostram-se os apuramentos relativos aos cruzamentos das variáveis número de pavimentos e época de construção dos edifícios. Saliente-se que a nível nacional, em 2001, o número médio de pavimentos por edifício era de **1,85** [INE, 2002b], enquanto que no concelho de Lisboa era cerca de **3,67**. O número médio de pavimentos

apresentado para o concelho de Lisboa não é exacto, pois foi estimado com base em dados que agrupam o número de pavimentos em 7 classes, três das quais agrupando edifícios com diferentes números de pavimentos (classes 5 a 7, 8 a 15 e mais de 15 pavimentos).

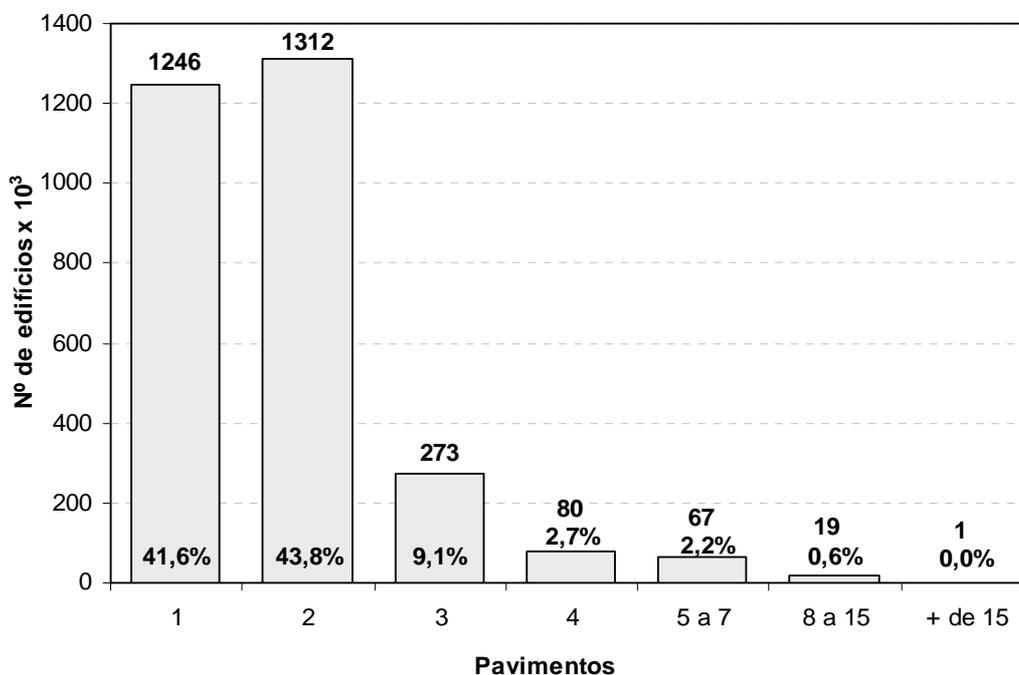


Figura 4.11 – Número de *edifícios* por *número de pavimentos* (Censos 2001).

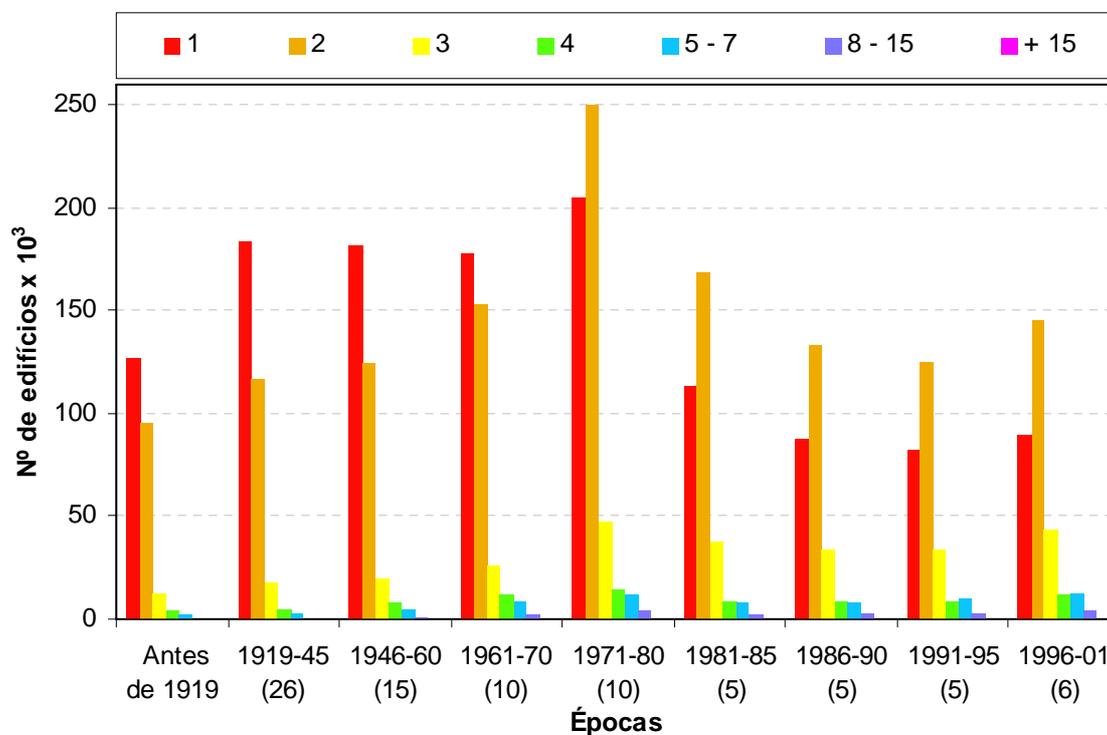


Figura 4.12 – Número de *edifícios* por *época de construção* e *número de pavimentos* (Censos 2001).

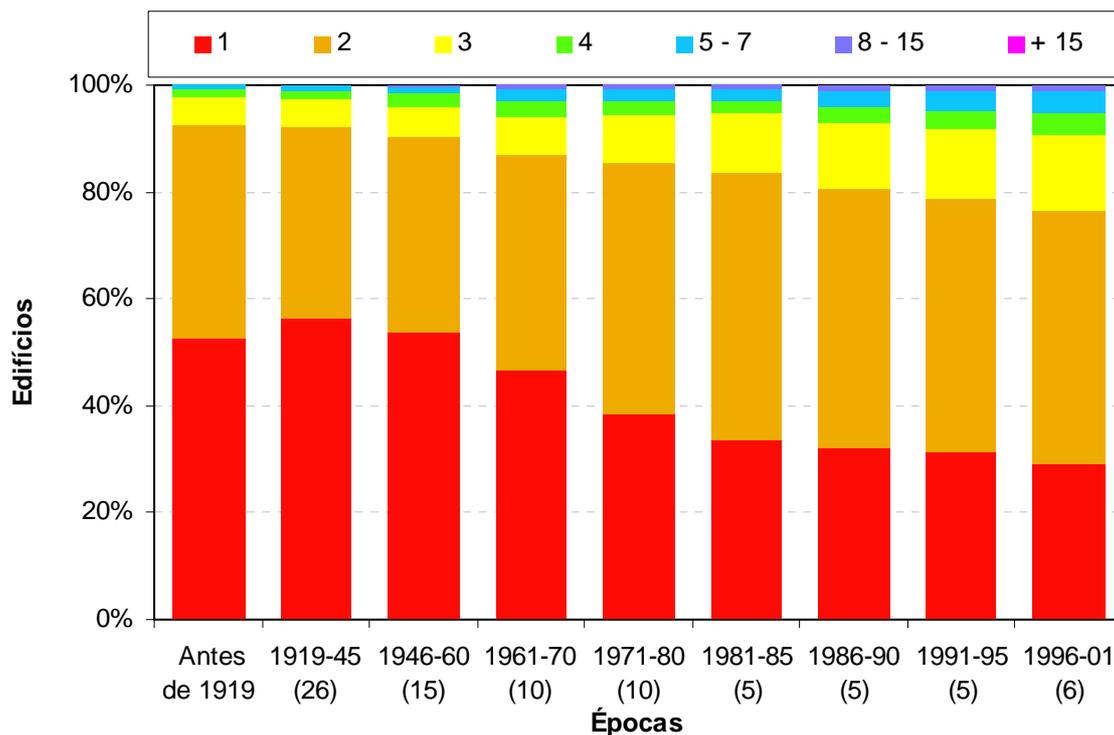


Figura 4.13 – Percentagem de edifícios por número de pavimentos dada a época de construção (Censos 2001).

Os cruzamentos das variáveis número de pavimentos e tipo de estrutura permitiram obter os quantitativos de edifícios ilustrados nas figuras 4.14 e 4.15.

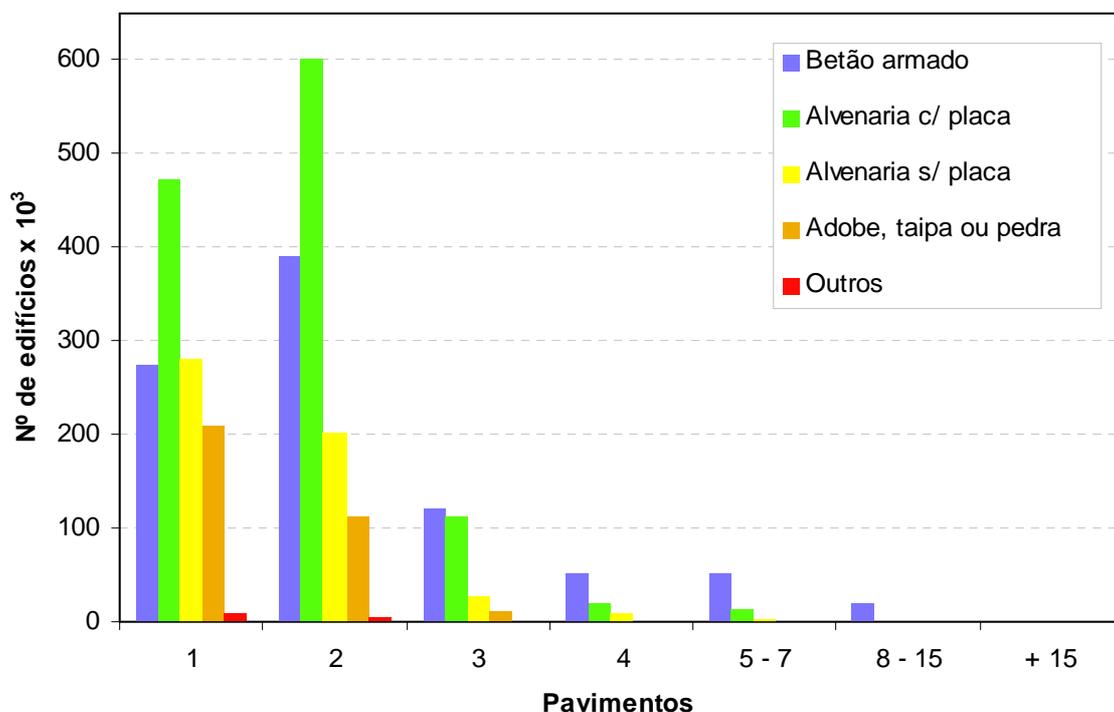


Figura 4.14 – Número de edifícios por número de pavimentos e tipo de estrutura (Censos 2001).

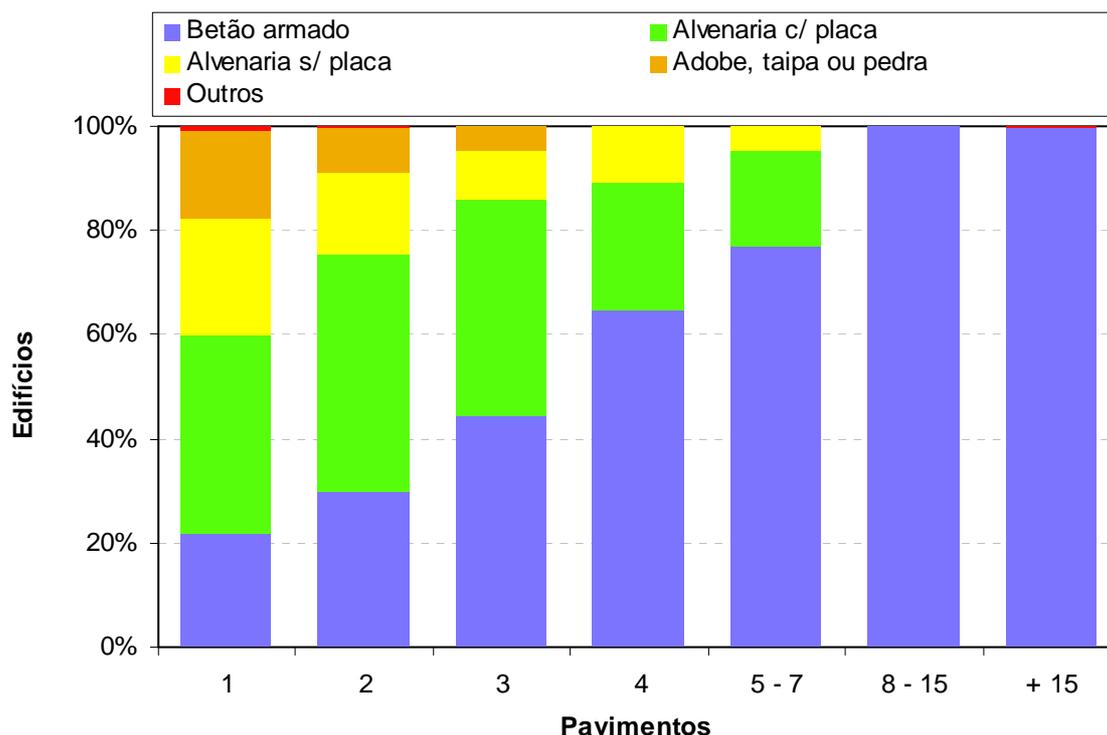


Figura 4.15 – Percentagem de **edifícios por tipo de estrutura** dado o **número de pavimentos** (Censos 2001).

As figuras 4.16 a 4.18 exibem a síntese de toda a informação analisada, apresentando as percentagens de edifícios, alojamentos familiares clássicos e ocupantes pelas várias épocas de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos.

A árvore traçada no lado esquerdo da figura representa a divisão das existências pelas nove épocas de construção dos Censos 2001. Em cada ramo desta árvore foi desenhado um histograma circular que ilustra a distribuição das existências pelos 5 tipos de estruturas<sup>6</sup>, para uma dada época de construção. Os valores percentuais das existências de cada tipo de estrutura, para uma dada época de construção, são reunidos em 9 árvores, com 5 ramos cada, traçadas a partir de cada histograma circular. As percentagens que rematam o lado direito da figura representam as existências, por tipo de estrutura e época de construção, relativas ao parque habitacional global do Continente. As 45 barras horizontais desenhadas encontram-se divididas nas percentagens relativas a cada classe de número de pavimentos.

<sup>6</sup> As siglas apresentadas representam as modalidades do tipo de estrutura do parque habitacional, recapitulando: BA – estrutura de Betão Armado; ACP – paredes de Alvenaria argamassada, Com Placa; ASP – paredes de Alvenaria argamassada, Sem Placa; ATAPS – paredes de Adobe, Taipa ou de Alvenaria de Pedra Solta.

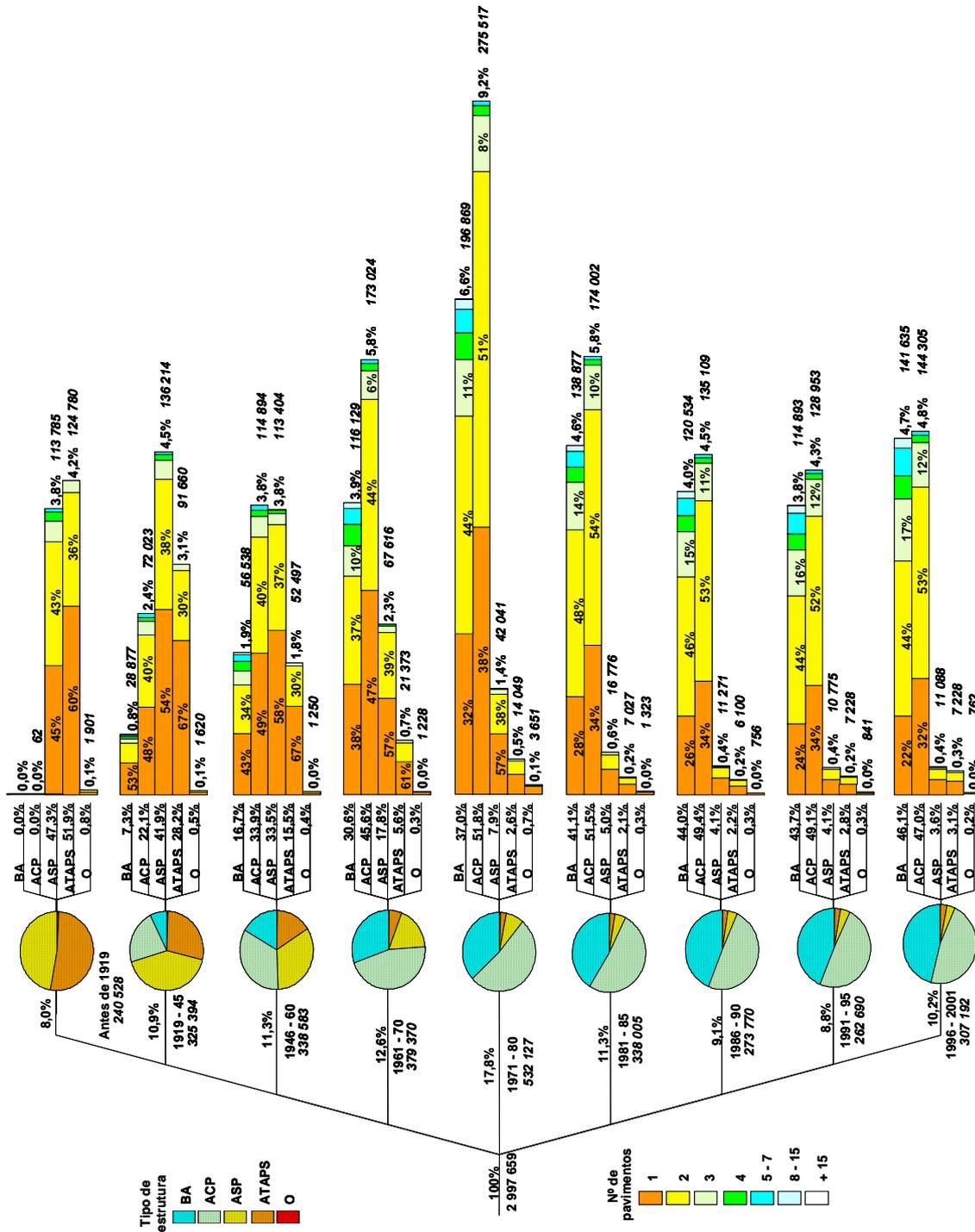


Figura 4.16 – Distribuição de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).

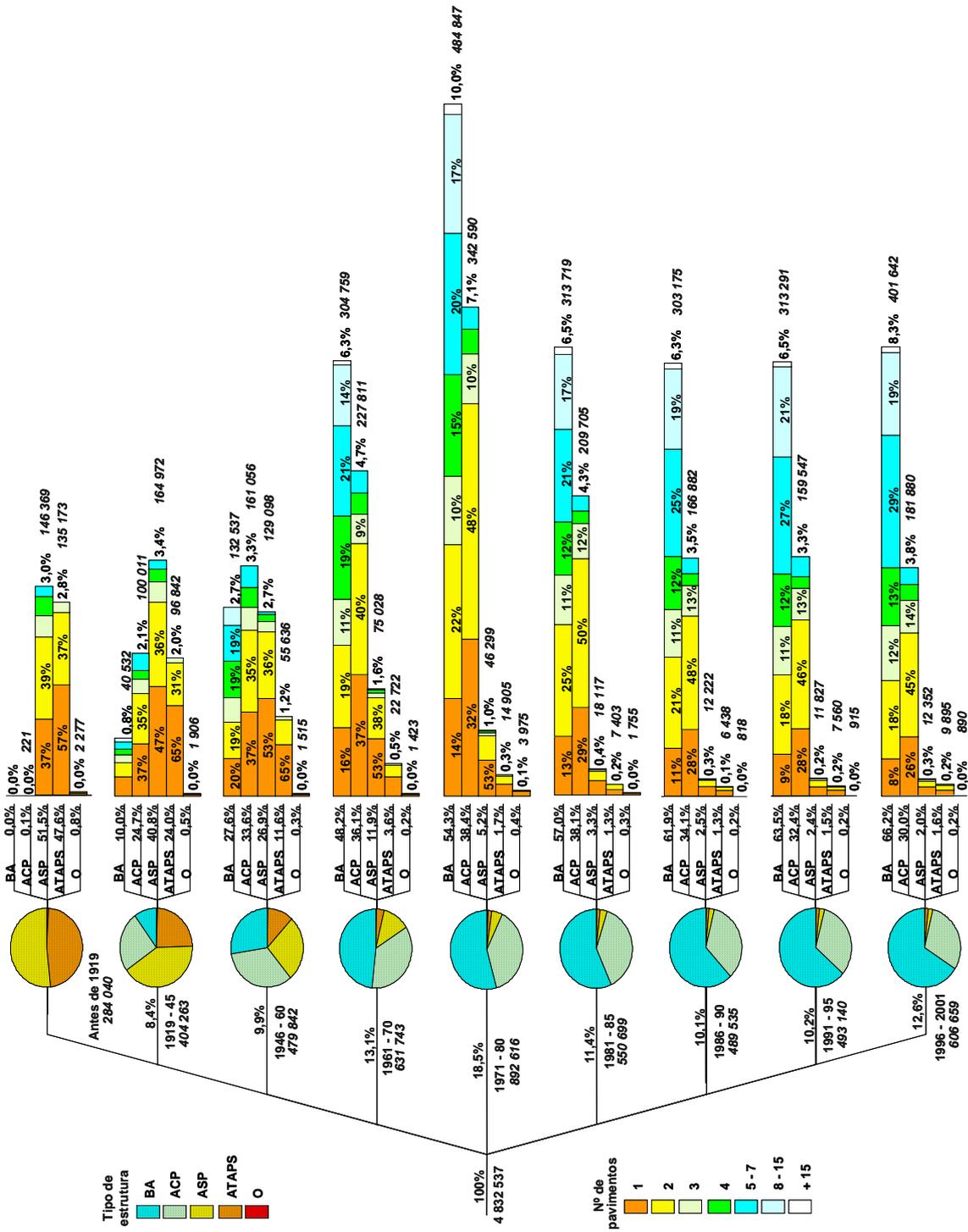


Figura 4.17 – Distribuição de alojamentos familiares clássicos por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).

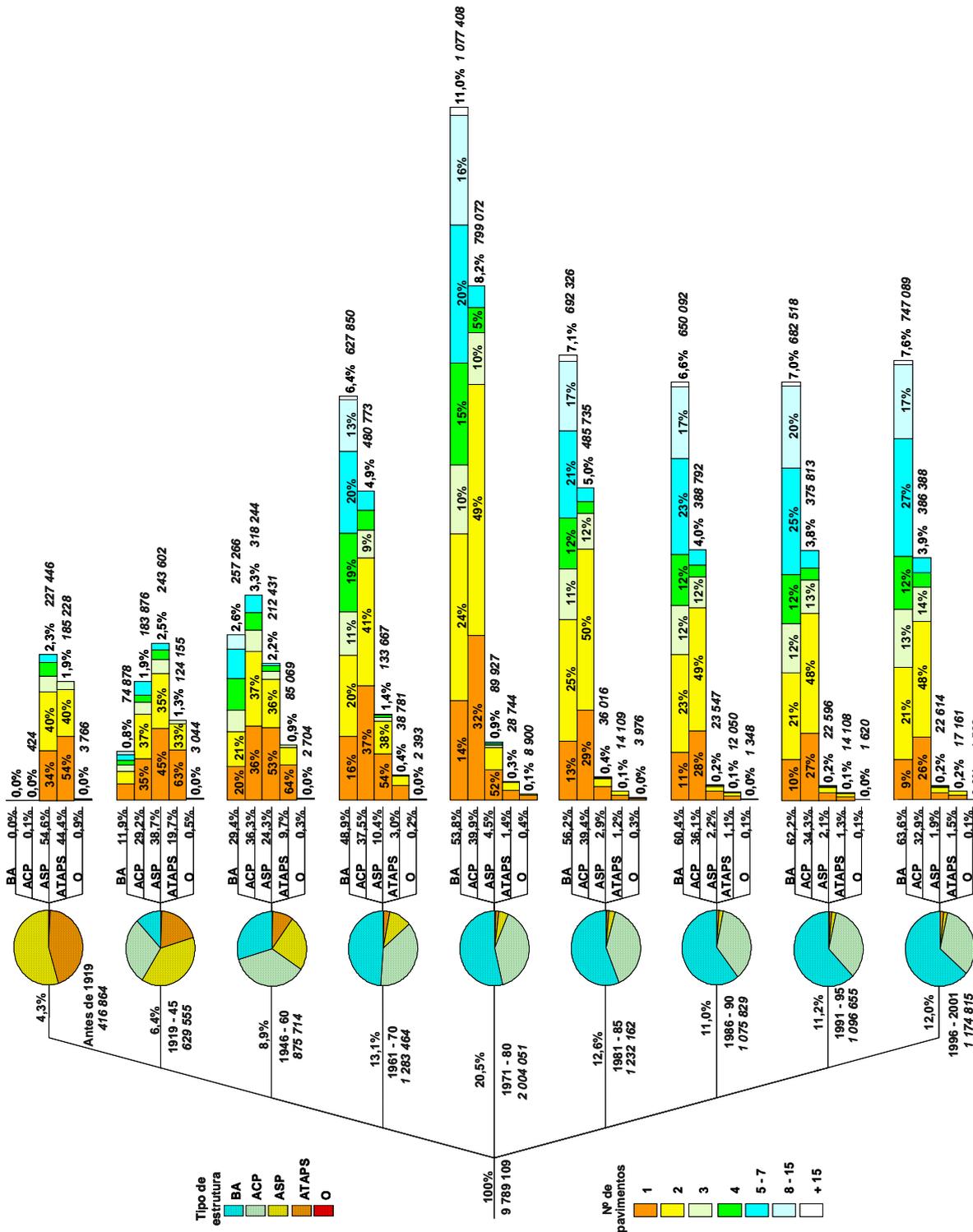


Figura 4.18 – Distribuição de ocupantes por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).

Os dois tipos de estruturas mais representativos, de cada época de construção são identificados no quadro 4.8, em que as percentagens apresentadas são relativas às existências globais de edifícios no território analisado.

*Quadro 4.8 – Tipos de estruturas predominantes em cada época de construção dos edifícios do Continente Português.*

Época de construção	Tipo mais frequente		2º tipo mais frequente	
	Tipo de estrutura	Edifícios [%]	Tipo de estrutura	Edifícios [%]
Antes de 1919	ATAPS	4,2	ASP	3,8
1919 a 1945	ASP	4,5	ATAPS	3,1
1946 a 1960	ACP	3,8	ASP	3,8
1961 a 1970	ACP	5,8	BA	3,9
1971 a 1980	ACP	9,2	BA	6,6
1981 a 1985	ACP	5,8	BA	4,6
1986 a 1990	ACP	4,5	BA	4,0
1991 a 1995	ACP	4,3	BA	3,8
1996 a 2001	ACP	4,8	BA	4,7

No quadro 4.9 destacam-se, por ordem de importância decrescente, os tipos de estruturas da construção do edifício e época de construção com existências superiores a 5% no universo global dos edifícios, alojamentos familiares clássicos e ocupantes do Continente Português.

Note-se que as épocas de construção de 1981 a 1985 e de 1986 a 1990 foram agrupadas numa única época, 1981 a 1990, enquanto que as épocas de 1991 a 1995 e de 1996 a 2001 também foram agrupadas numa única época, 1991 a 2001, para não corresponderem a intervalos de tempo muito mais curtos que os das restantes épocas.

*Quadro 4.9 – Ordenação dos tipos de estruturas e épocas de construção mais representativos no universo de edifícios, alojamentos familiares clássicos e ocupantes do Continente Português.*

Classes	Edifícios [%]	Classes	Alojamentos [%]	Classes	Ocupantes [%]
ACP 1981-90	10,3	BA 1991-01	14,8	BA 1991-01	14,6
ACP 1971-80	9,2	BA 1981-90	12,8	BA 1981-90	13,7
ACP 1991-01	9,1	BA 1971-80	10,0	BA 1971-80	11,0
BA 1981-90	8,6	ACP 1981-90	7,8	ACP 1981-90	9,0
BA 1991-01	8,5	ACP 1991-01	7,1	ACP 1971-80	8,2
BA 1971-80	6,6	ACP 1971-80		ACP 1991-01	7,7
ACP 1961-70	5,8	BA 1961-70	6,3	BA 1961-70	6,4

Por fim nas figuras 4.19 a 4.24 ilustram-se as estatísticas relativas às novas variáveis apuradas no Questionário de Edifícios dos Censos 2001.

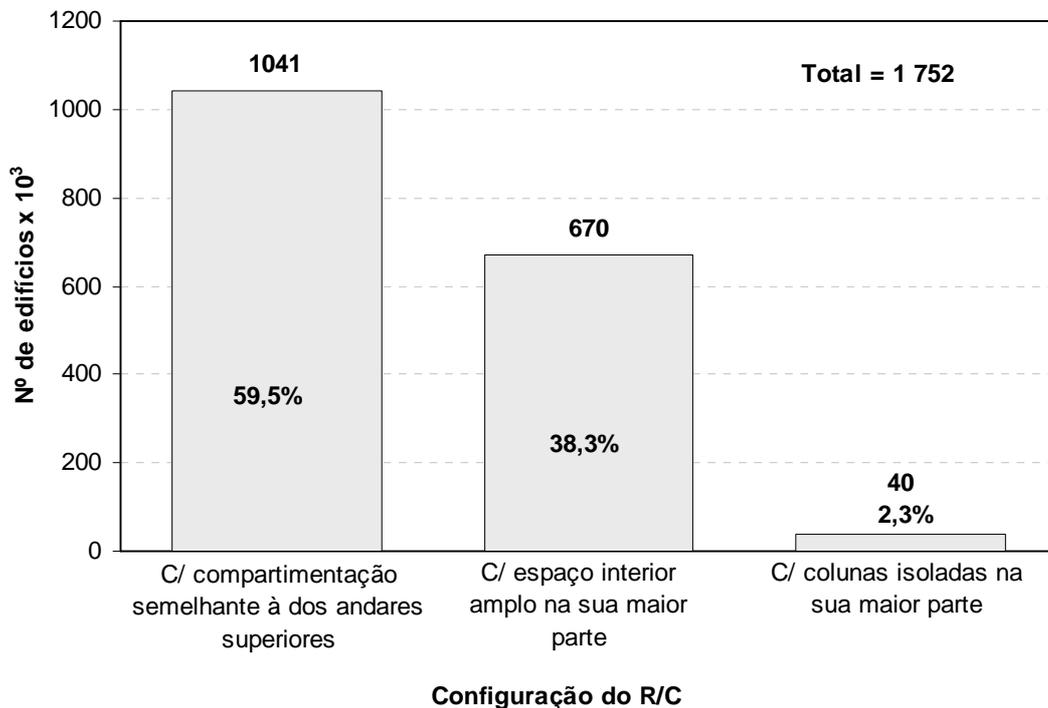


Figura 4.19 – Número de *edifícios*, com mais de 1 pavimento, pela configuração do R/C (Censos 2001).

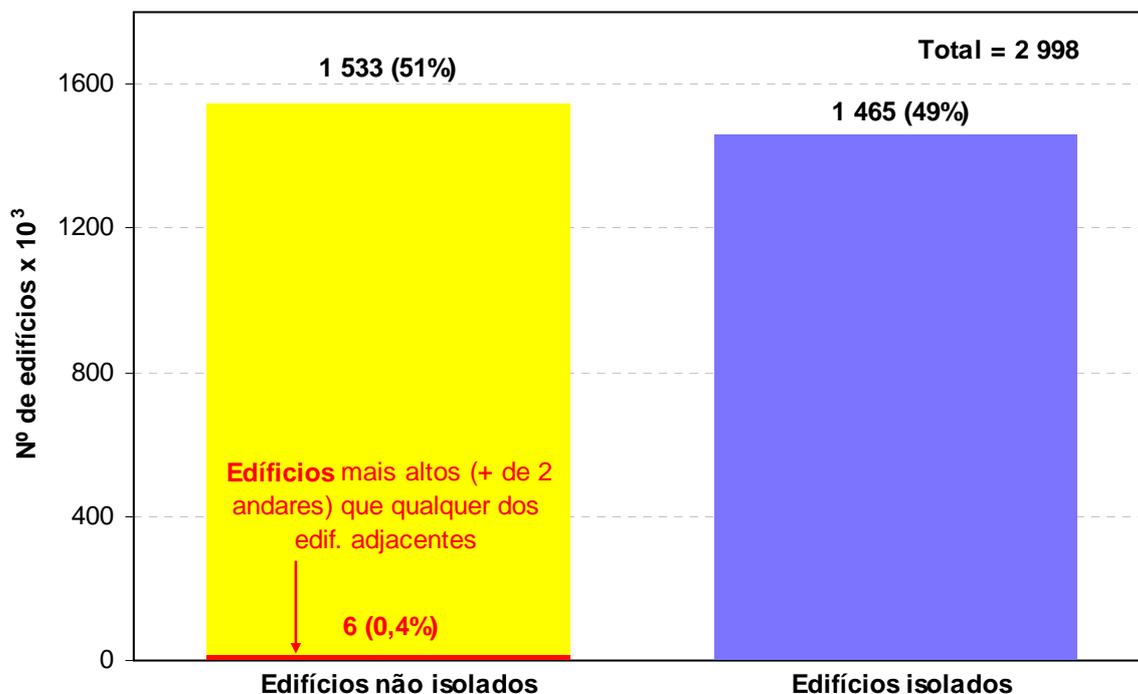


Figura 4.20 – Número de *edifícios* pela altura relativa a edifícios adjacentes (Censos 2001).

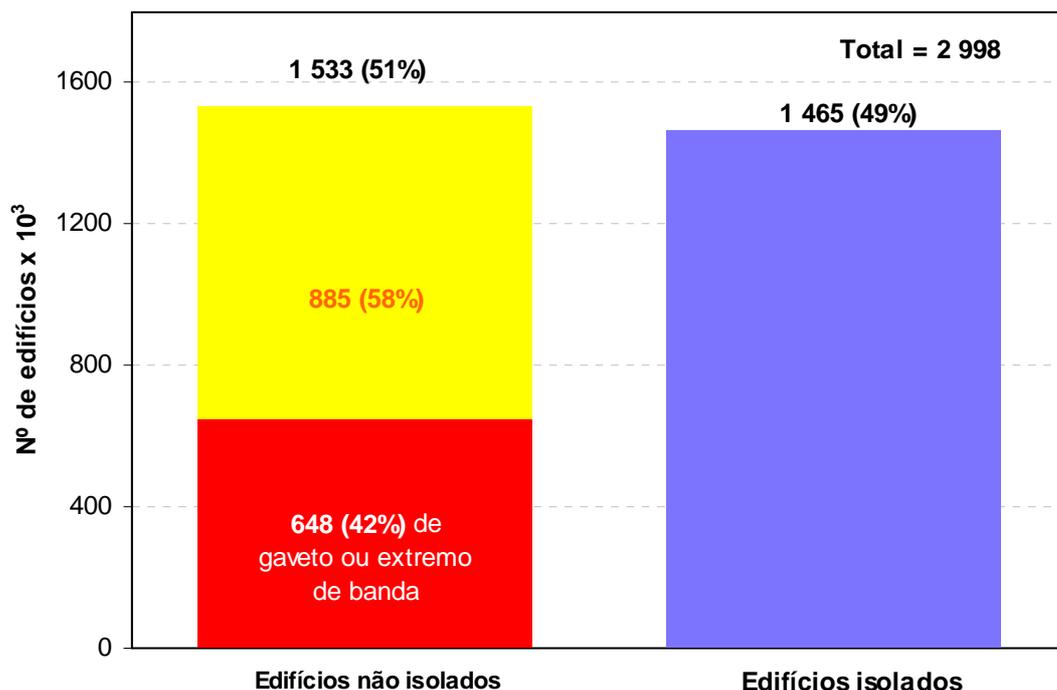


Figura 4.21 – Número de *edifícios* pelo *posicionamento relativo a edifícios adjacentes* (Censos 2001).

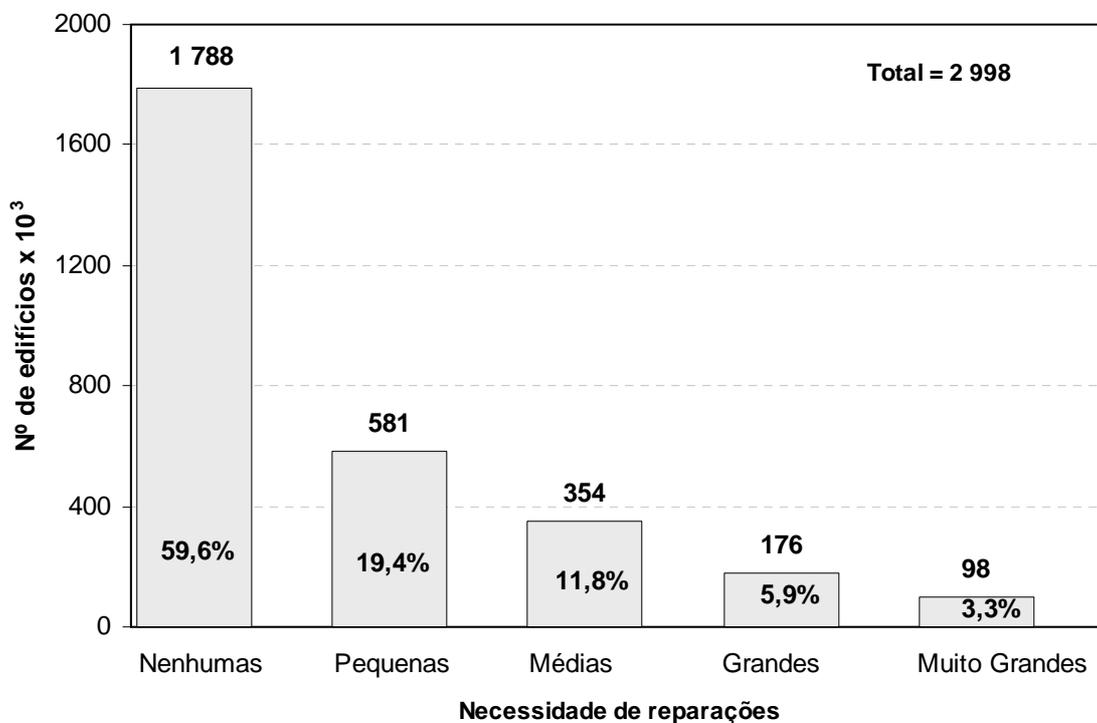


Figura 4.22 – Número de *edifícios* por *necessidade de reparações na estrutura* (Censos 2001).

Na figura 4.23 agruparam-se algumas das modalidades da variável Estado de conservação em apenas três classes.

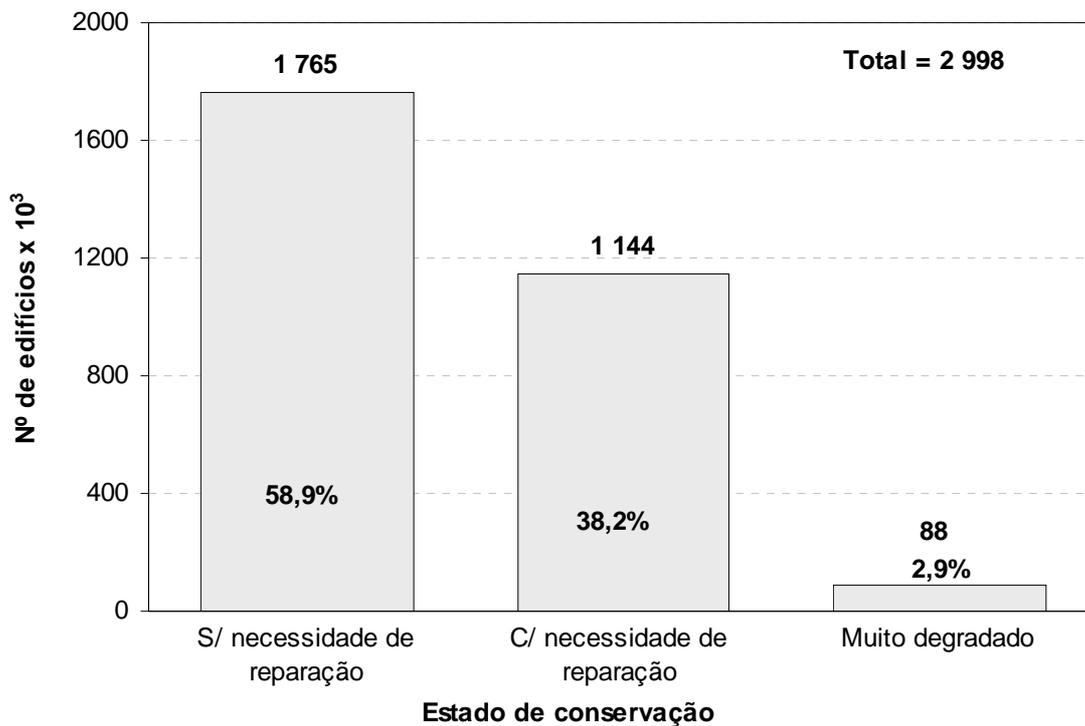


Figura 4.23 – Número de *edifícios por estado de conservação* (Censos 2001).

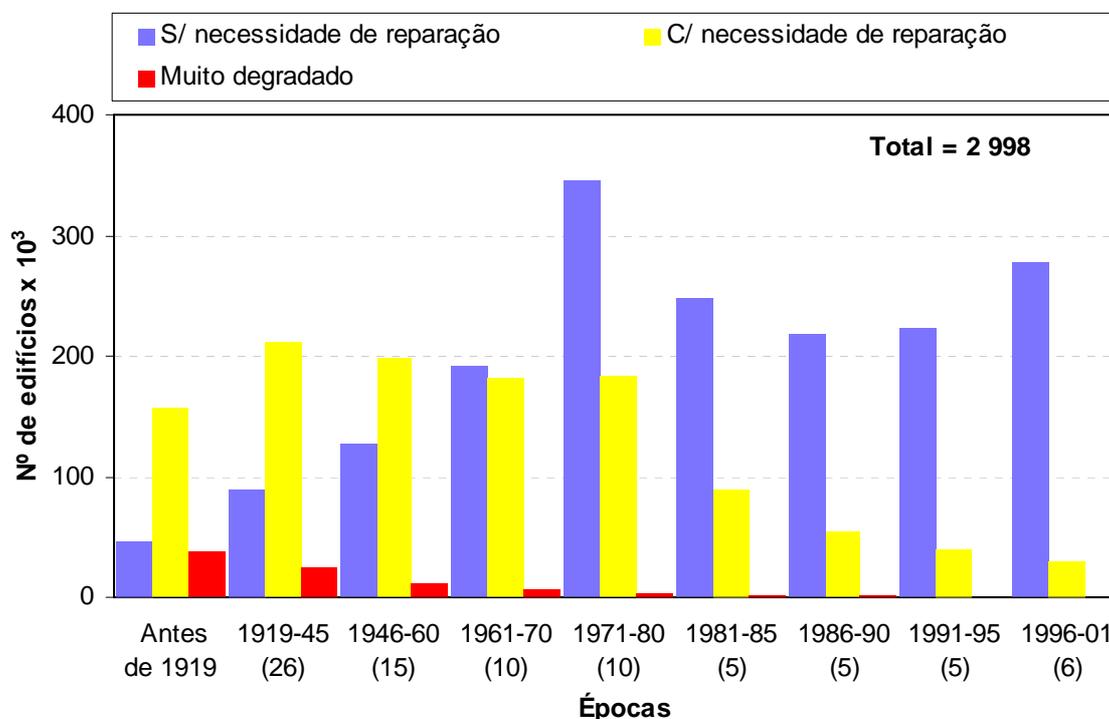


Figura 4.24 – Número de *edifícios por estado de conservação, dada a época de construção* (Censos 2001).

#### 4.4. Distribuição geográfica dos elementos em risco

Para analisar a forma como os elementos em risco se distribuem geograficamente, foram elaborados mapas de densidades de edifícios, densidades de alojamentos familiares clássicos e colectivos e densidades populacionais, por unidade geográfica da freguesia do território continental (figura 4.25).

Para facilitar a localização geográfica das parcelas do território Continental mencionadas ao longo do texto consulte-se o Anexo A que, como já foi referido no capítulo 3, contem dois mapas ilustrativos da divisão do território Continental em termos de NUTS II e III, de distritos e de alguns concelhos que vão sendo referidos ao longo do texto.

Com o intuito de se apresentar uma visão de maior pormenor da distribuição geográfica das densidades atrás mencionadas, destaca-se, na figura 4.26, a Área Metropolitana de Lisboa (AML) em que, a par de freguesias com as maiores densidades de elementos em risco de Portugal Continental, coexistem freguesias com densidades muito baixas desses elementos.

A distribuição geográfica de alguns dos factores de vulnerabilidade identificados no início da secção 4.2 é exibida nas figuras 4.27 e 4.28.

Na figura 4.27 apresentam-se os mapas das densidade de alojamentos familiares clássicos e colectivos por tipo de estrutura e na figura 4.28 os mapas das percentagens de alojamentos familiares clássicos e colectivos por número de pavimentos.

A figura 4.29 ilustra as existências de edifícios, alojamentos familiares clássicos e colectivos e ocupantes nos períodos anteriores ao primeiro regulamento Português de projecto sísmo-resistente [RSCCS, 1958]. Para evidenciar a evolução, numa década, destas construções mais vulneráveis, foram elaborados dois conjuntos de figuras: à esquerda apresentam-se as figuras relativas às existências apuradas no Censos 91 e, à direita, as figuras relativas às existências apuradas nos Censos 2001.

Finalmente, a figura 4.30 mostra as regiões do país em que o número de edifícios apresentou uma variação positiva ou negativa entre os Censos 2001 e os Censos 91, quantificando-se essa variação. Nesta figura também se apresenta o detalhe da Área Metropolitana de Lisboa.

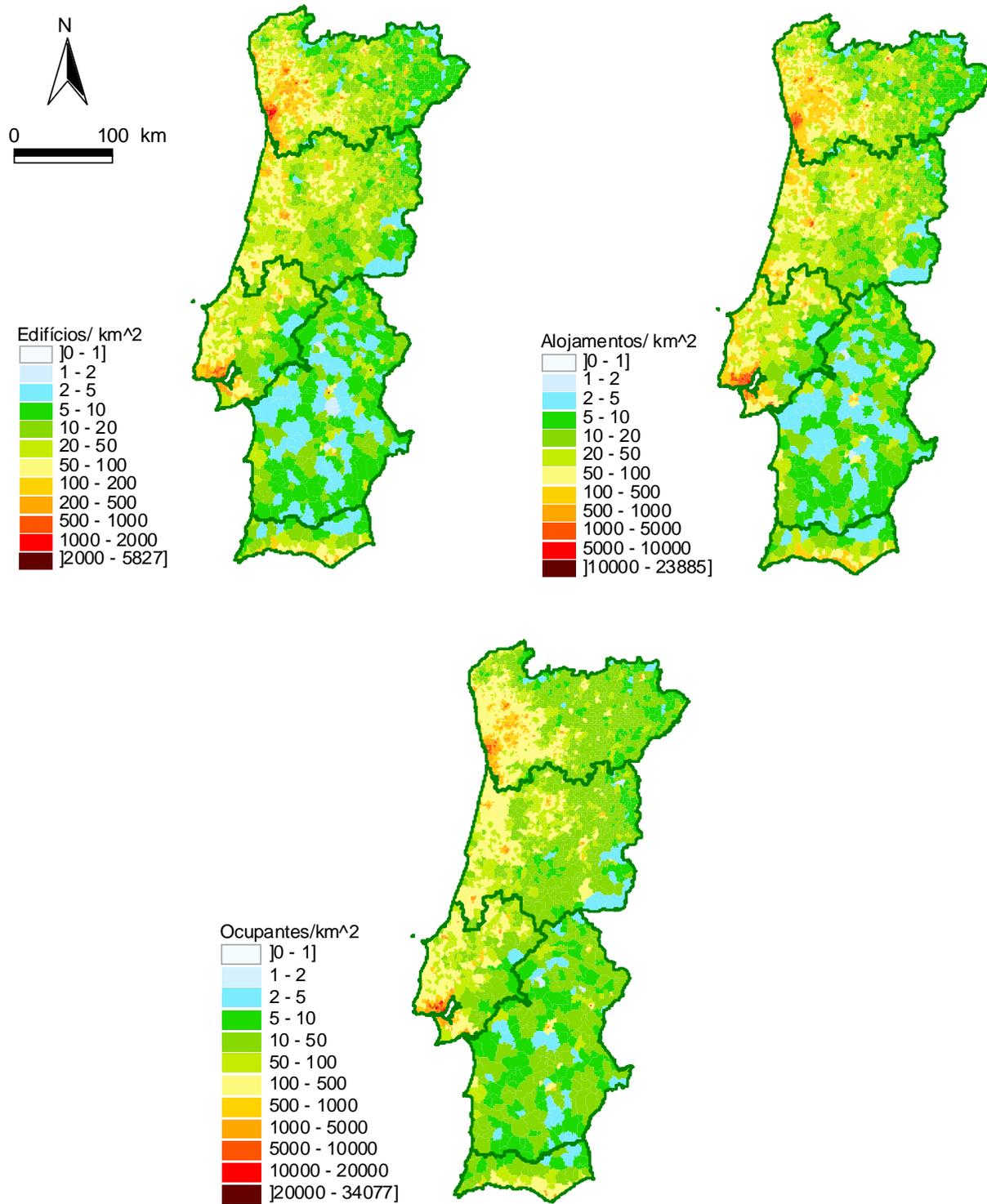


Figura 4.25 – Densidades de edifícios, de alojamentos familiares clássicos e colectivos e densidade populacional em Portugal Continental (Censos 2001).

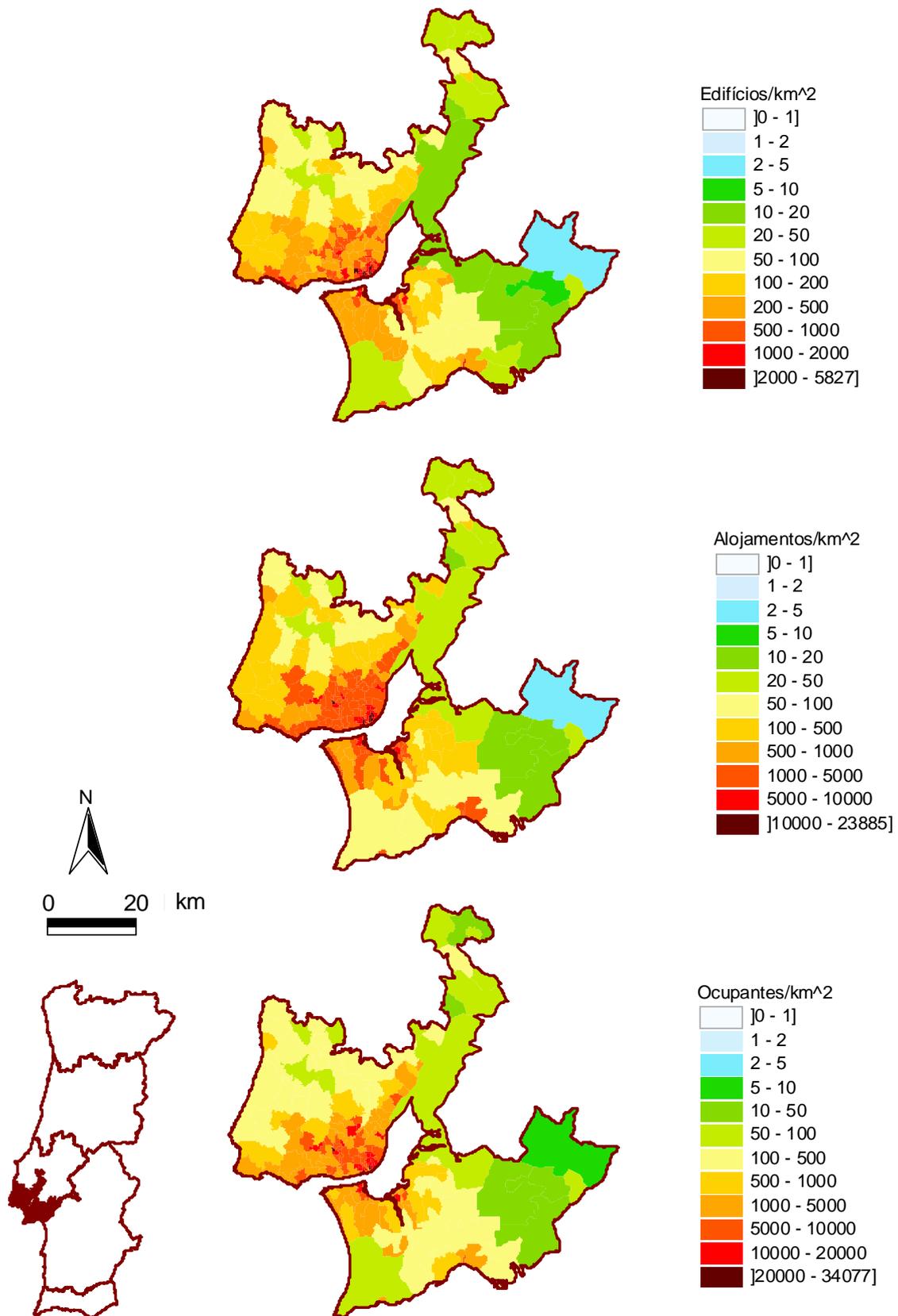


Figura 4.26 – Densidades de *edifícios*, de *alojamentos familiares clássicos e colectivos* e densidade *populacional* na Área Metropolitana de Lisboa (Censos 2001).

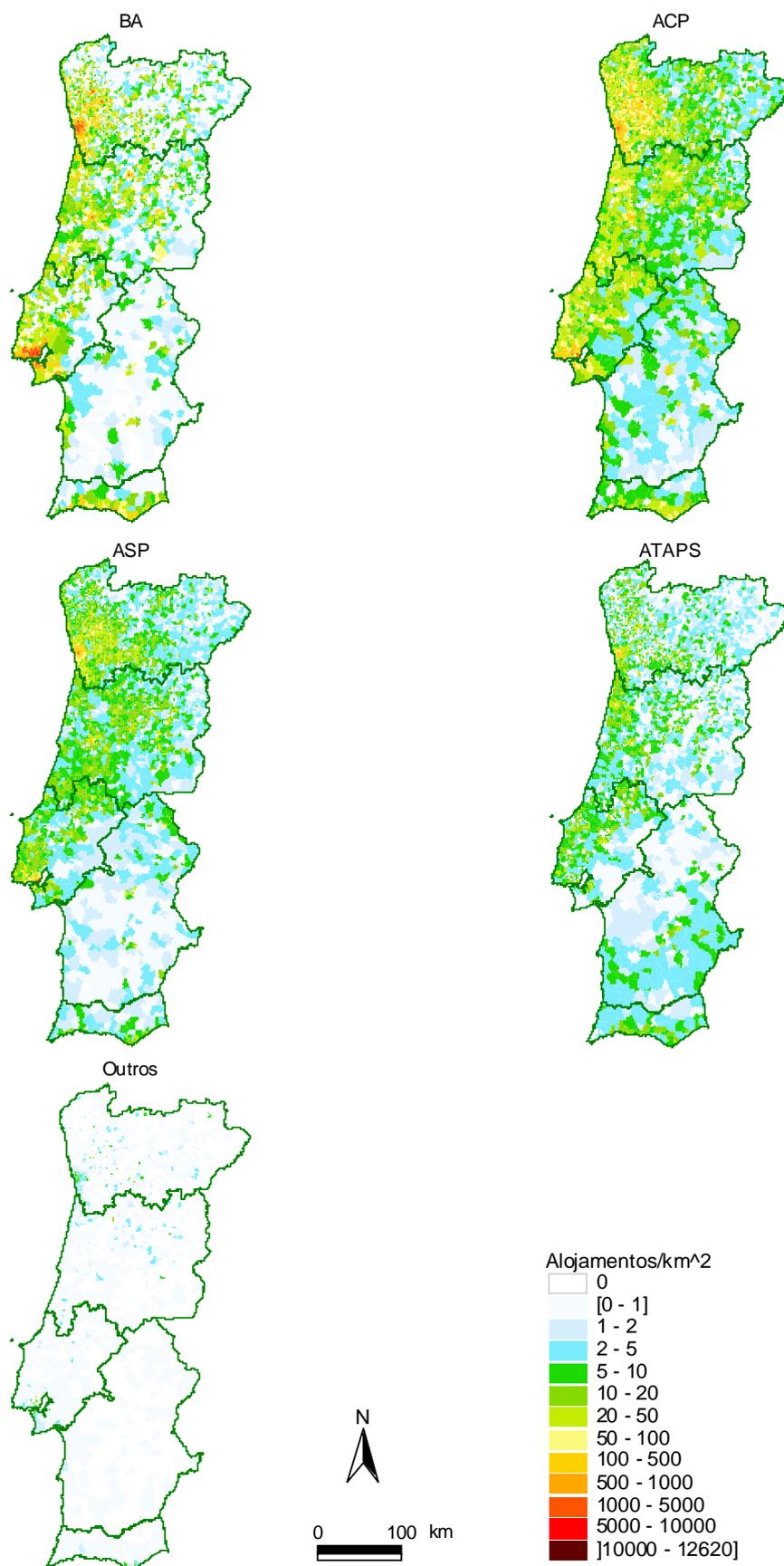


Figura 4.27 – Densidades de alojamentos familiares clássicos e colectivos por tipo de estrutura (Censos 2001).

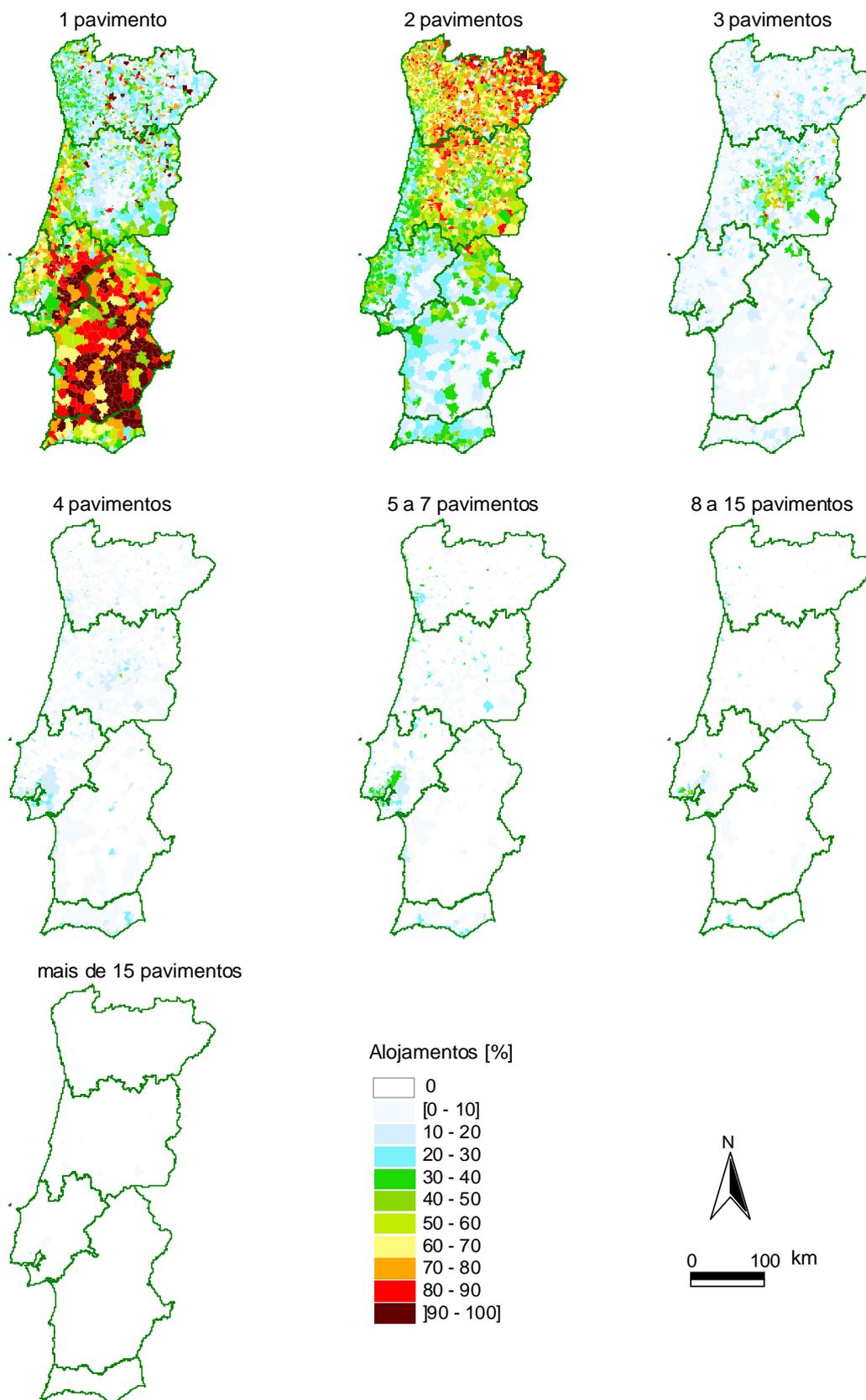


Figura 4.28 – Percentagens de alojamentos familiares clássicos e colectivos por número de pavimentos (Censos 2001).

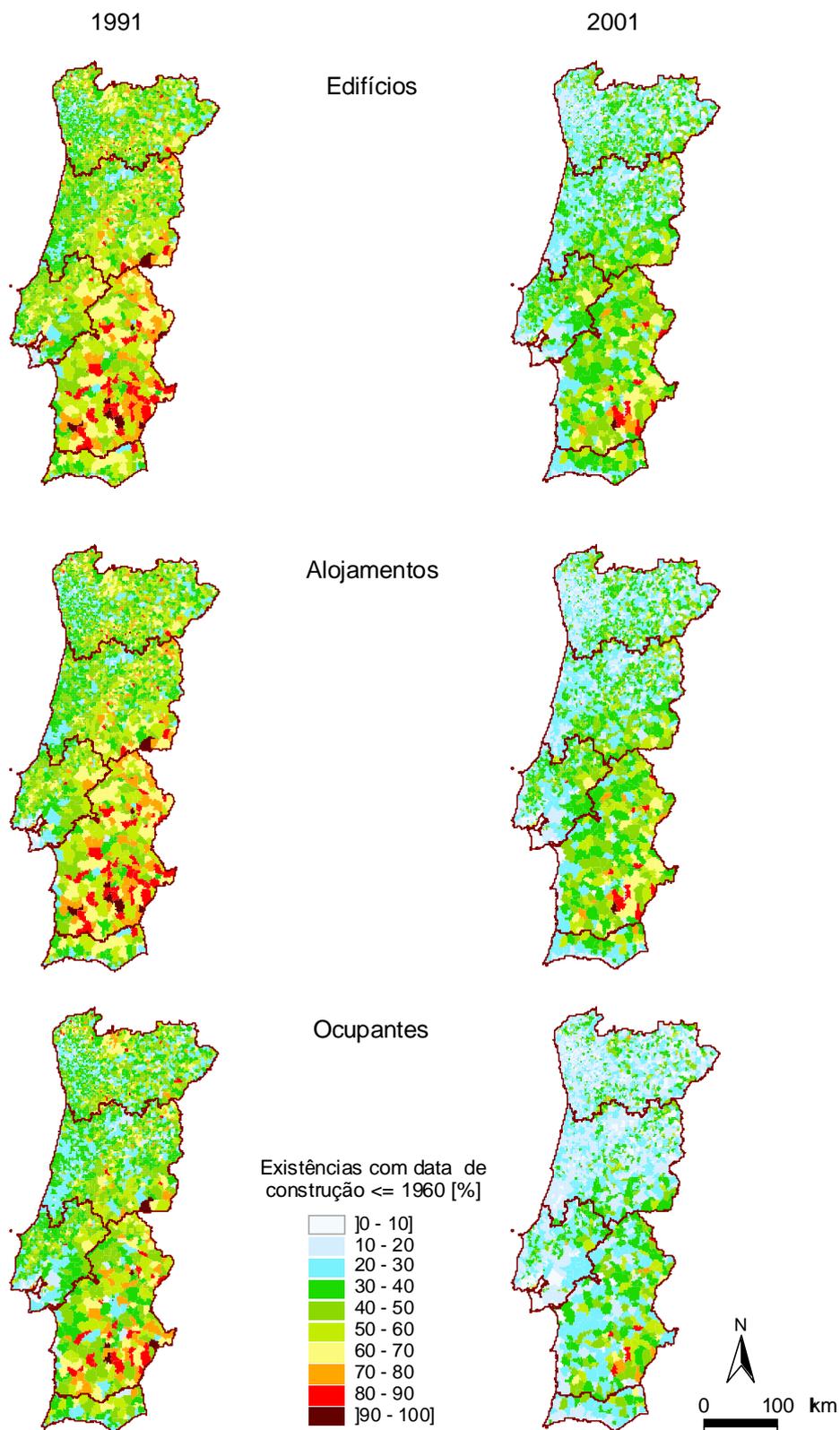


Figura 4.29 – Percentagens de **edifícios** construídos em data **anterior** à do primeiro regulamento sísmico-resistente, alojamentos familiares clássicos e colectivos e ocupantes residentes nesses edifícios (Censos 91 e Censos 2001).

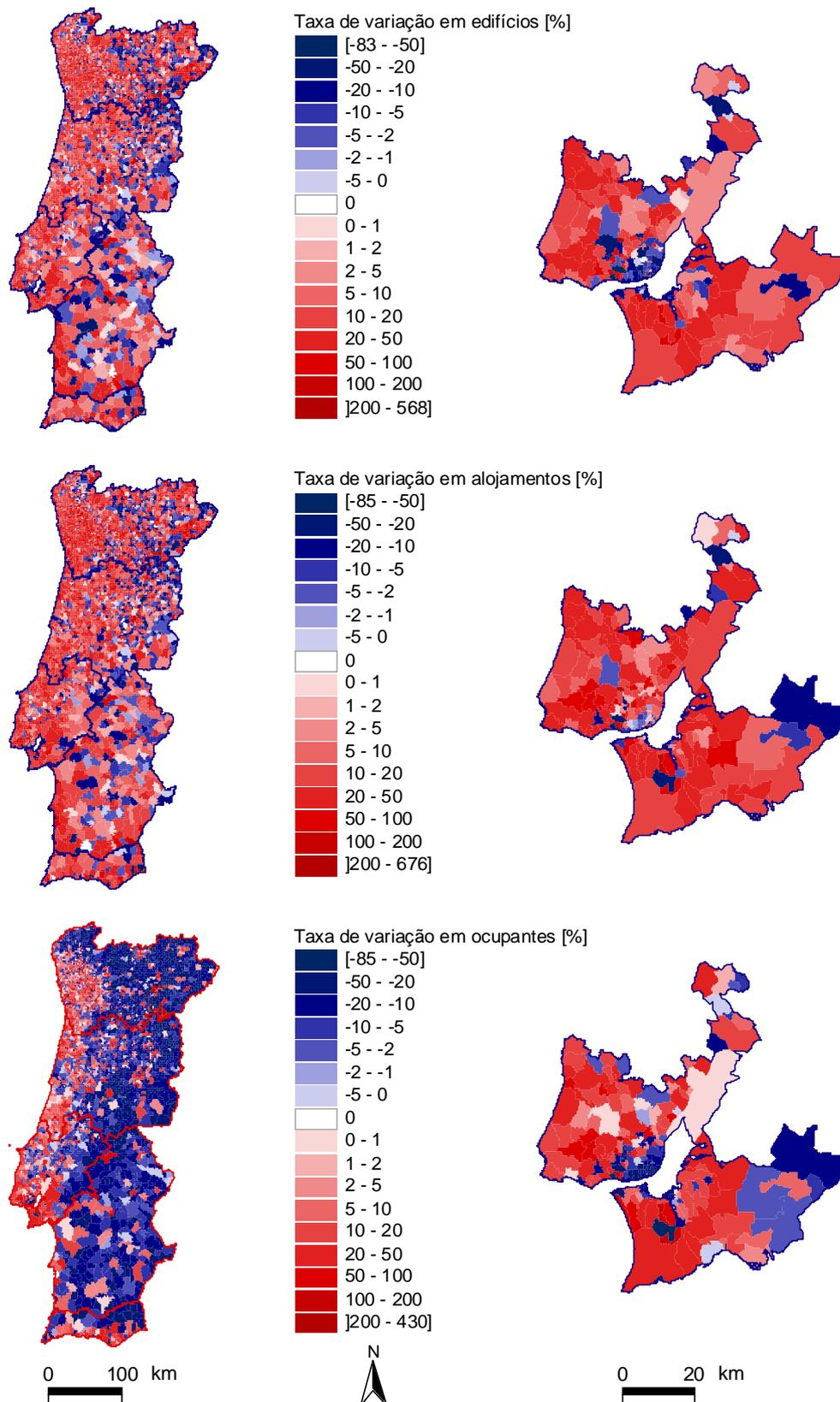


Figura 4.30 – Taxas de variação do número de edifícios, alojamentos familiares clássicos e colectivos e ocupantes entre os Censos 2001 e os Censos 91, Portugal Continental e AML.

## 4.5. Análise das estatísticas apresentadas

### 4.5.1. Análise das estatísticas dos elementos em risco

Da análise das figuras e quadros da secção 4.3 é possível tecer as seguintes considerações sobre o **parque habitacional de Portugal Continental e seus ocupantes**, à data dos **Censos 2001**:

1. Os valores globais dos elementos expostos analisados situam-se em cerca de 3,0 milhões de **edifícios** de habitação, contendo 4,8 milhões de **alojamentos** (familiares clássicos e colectivos) e albergando 9,8 milhões de **habitantes** (quadro 4.3).
2. Nas figuras 4.1 a 4.4 é possível verificar que as **existências com mais de 40 anos em 2001** (anteriores à época de 1961 a 1970) representam 30% dos edifícios, 24% dos alojamentos familiares clássicos, 30% dos alojamentos colectivos e albergam 19% da população. Verifica-se ainda que a percentagem de edifícios construídos em cada uma das três últimas décadas (70, 80 e 90) é aproximadamente constante, variando entre 18 e 20% do parque habitacional de 2001.
3. A **variação**, por época de construção, do **número de edifícios entre os Censos 2001 e os Censos 91** (figura 4.5) evidencia decréscimos no número de edifícios maioritariamente nas épocas mais antigas, anteriores a 1961, verificando-se também um decréscimo, menos acentuado, na época de 1986 a 1991. Estes decréscimos poderão corresponder a eventuais demolições de edifícios ou a grandes obras de remodelação dos mesmos, pois a classificação de um edifício numa determinada época também contempla “o período de reconstrução, para os edifícios que sofreram uma transformação completa”. Os valores positivos registados para épocas de 1971 a 1980 e de 1981 a 1985 poderão corresponder a erros cometidos, em algum dos Censos, na classificação da época de construção dos edifícios, pois não é possível, entre 1991 e 2001, a construção ou remodelação de edifícios datada da época de 1971 a 1985.
4. O número médio de **alojamentos por edifício** (figura 4.6) cresceu, em geral, ao longo das diversas épocas de construção. Globalmente, o valor médio da razão alojamento/edifício situa-se próximo de 1,6 notando-se que nas épocas de construção posteriores a 1960 essa razão é superior à média. Esta evolução indica a tendência para a construção de edifícios de maiores dimensões. Globalmente, o valor médio da razão **ocupantes/alojamento** situa-se próximo de 2,0 (figura 4.7) observando-se que essa razão apresentou uma tendência crescente até 1970, um patamar com valores em torno de 2,2 entre 1971 e 1991 e uma diminuição com algum significado na última época de construção, de 1996 a 2001. Esta diminuição reflecte a diminuição da dimensão média da família clássica em Portugal entre 1991 (3,1) e 2001 (2,8) [INE, 2002b].

5. A análise do quadro 4.5 permite constatar que, em 2001, as existências de **edifícios** construídos em data **anterior** à da entrada em vigor do primeiro **regulamento** representavam 30% do parque habitacional. Observa-se também que as percentagens de **alojamentos familiares** e de **indivíduos residentes** nestes edifícios são inferiores a esses 30%, atingindo os valores de 24% e de 20%, respectivamente. O quadro 4.5 revela também que os quantitativos de todas as existências em edifícios com data anterior a 1960 decresceram entre **1991** e **2001**. No quadro 4.6 observa-se que a percentagem de existências em edifícios de Betão armado construídos durante a vigência dos dois regulamentos é aproximadamente a mesma, apesar do RSCCS cobrir um período de cerca de 25 anos, enquanto que o RSA apenas cobre um período de cerca de 15 anos.
6. Relativamente à distribuição dos **edifícios** pelo **tipo de estrutura** da construção verifica-se, na figura 4.8, que as Paredes de alvenaria argamassada, com placa é o tipo de estrutura com maior peso, representando 41% do parque habitacional do Continente Português, sendo seguida pelas estruturas em Betão armado e com Paredes de alvenaria argamassada, sem placa, representando cerca de 30% e 17% do parque habitacional, respectivamente. Os restantes edifícios, ou seja, os com Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta e os Outros representam cerca de 12% do parque habitacional. Verifica-se também que o tipo de estrutura Outros é pouco representado em edifícios com mais de 3 pavimentos, constituindo apenas 110 edifícios. Aliás, nos Censos 2001 foram contados 13 332 edifícios do tipo de estrutura Outros, o que contrasta com o número de edifícios, cerca de seis vezes superior, apurados nesta classe nos Censos 91 (84 906).
7. As figuras 4.9 e 4.10 permitem observar que os **tipos de estruturas** Paredes de alvenaria argamassada, com placa e Betão armado vão tendo progressivamente maior peso nas existências de edifícios das diferentes épocas, não existindo na época de construção anterior a 1919. No que toca aos **edifícios** com estrutura em Paredes de alvenaria argamassada, sem placa e com Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta verifica-se o inverso, embora estejam sempre representados em todas as épocas de construção.
8. Os **edifícios** com **1 pavimento** representam cerca de 42% do parque habitacional e com **2 pavimentos** 44% (figura 4.11 e quadro 4.7); apenas 14% dos edifícios têm **mais de 2 pavimentos**. A percentagem de edifícios com **1 e 2 pavimentos** (figura 4.13) é superior a 80% em todas as **épocas de construção** com excepção das duas últimas épocas (de 1991 a 1995 e de 1996 a 2001) em que se situa ligeiramente abaixo de 80%. Ao longo do tempo observa-se um decréscimo da percentagem de edifícios com 1 pavimento, passando de 53% nas épocas mais antigas para 29% na época de 1996 a 2001. Como foi

atrás referido, a nível de nacional, em 2001, o **número médio de pavimentos por edifício** era de 1,85, o que representa um acréscimo de 14% relativamente ao valor médio de 1991 que se situava em 1,62<sup>7</sup> [INE, 2002b]. Em Lisboa, e de acordo com os Censos 2001, o número médio de pavimentos por edifício situa-se em torno de 3,67. No quadro 4.7 sobressai o contraste entre a **percentagem de edifícios com 1 e 2 pavimentos**, que representam 85% do parque habitacional do Continente, e a **percentagem de alojamentos e de ocupantes em edifícios de 1 e de 2 pavimentos** que representam, apenas, cerca de 58% dos respectivos universos.

9. Nas figuras 4.14 e 4.15 observa-se que as Paredes de alvenaria argamassada, com placa é o **tipo de estrutura** maioritária nos **edifícios com 1 e 2 pavimentos** e que o Betão armado assume um papel preponderante na estrutura dos edifícios com 4 ou mais pavimentos, sendo o único tipo de estrutura observada em edifícios com 8 e mais pavimentos.
10. Na figura 4.16 e nos quadros 4.8 e 4.9 que dela derivam verifica-se que, à data dos Censos 2001, as Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta eram o **tipo de estrutura** predominante nos edifícios construídos na **época de construção** anterior a 1919, as Paredes de alvenaria argamassada, sem placa predominavam entre 1919 e 1945 e as Paredes de alvenaria argamassada, com placa prevaleciam depois de 1946. Por outro lado, o Betão armado era o segundo tipo de estrutura mais frequente nos edifícios construídos depois de 1960. A estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, com placa construída entre 1981 e 1990 era a mais representativa no universo dos edifícios do Continente (10%) sendo seguida pelo mesmo tipo de estrutura construída entre 1971 e 1980 (9%).
11. Por fim, comparando as figuras 4.16 a 4.18 constata-se que a **percentagem de alojamentos familiares e de pessoas residentes** em edifícios com o **tipo de estrutura** de Betão armado (48 e 49%, respectivamente) é superior à **percentagem** correspondente de **edifícios** de Betão armado (30%). Tal indica que existe um maior número de alojamentos familiares clássicos por edifício quando o tipo de estrutura dos edifícios é o Betão armado, como seria de esperar. Esta constatação é consentânea com o que se observa nas figuras 4.14 a 4.15 relativamente à distribuição do número de pavimentos em edifícios de Betão armado. De facto, apenas nos edifícios com este tipo de estrutura é que as existências com número de pavimentos superior a 2 têm alguma representatividade. Por outro lado, a percentagem de alojamentos familiares e de

---

<sup>7</sup>De notar que esta comparação do número médio de pavimentos deverá ser encarada com as devidas reservas, pois, como foi atrás referido, a definição do conceito de “pavimento” sofreu alterações entre os Censos 91 e 2001, e a nova definição poderá originar um valor mais elevado para o número médio de pavimentos no mesmo universo de edifícios.

peças residentes em edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, com placa (32 e 35%, respectivamente) é inferior à percentagem de edifícios com este tipo de estrutura (41%). Nestas figuras e no quadro 4.9 é ainda possível observar que o tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, com placa é a mais representativa dos edifícios do Continente, enquanto que os alojamentos e indivíduos residentes têm o Betão armado como tipo de estrutura de edifícios mais representativa.

12. Sobre os novos factores de vulnerabilidade apurados no Questionário de Edifício dos Censos 2001 observa-se na figura 4.19 que a maioria dos edifícios (60%) possui **R/C com compartimentação semelhante à dos andares superiores** e que apenas uma pequena percentagem de edifícios (2%) possui **R/C com colunas isoladas na sua maior parte**. Por outro lado verifica-se que cerca de metade do parque habitacional é constituído por **edifícios isolados** e que a outra metade é constituído por **edifícios não isolados** (figuras 4.20 e 4.21). No universo dos edifícios não isolados aqueles que são **mais altos (mais de dois pavimentos) do que qualquer dos edifícios adjacentes**, são em número muito reduzido (0,4%, figura 4.20). No mesmo universo, os que são **de gaveto ou em extremo de banda** já têm alguma representatividade (42%, figura 4.21). Sobre as **necessidades de reparação na estrutura** (figura 4.22) verifica-se que 60% dos edifícios não necessitam de reparações, enquanto que 3% necessitam de reparações muito grandes. Estes valores são reflectidos no **estado de conservação** geral dos edifícios (figura 4.23), pois 59% do parque habitacional é constituído por edifícios em bom estado de conservação, enquanto que 3% desse parque é constituído por edifícios muito degradados. Aliás, o estado de conservação geral correlaciona-se com a idade dos edifícios, sendo os edifícios mais antigos aqueles que naturalmente se encontram em pior estado de conservação (figura 4.24).

#### 4.5.2. Análise da distribuição geográfica dos elementos em risco

Da análise dos mapas constantes da secção 4.4 é possível efectuar as seguintes observações sobre o **parque habitacional de Portugal Continental e seus ocupantes**, à data dos **Censos 2001**:

1. As freguesias com maior densidade de edifícios de habitação, alojamentos e ocupantes (figura 4.25) situam-se nas principais cidades do país, bem como em toda a faixa costeira a norte do Cabo Espichel e no Algarve, destacando-se as zonas da Grande Lisboa e Grande Porto. A densidade de edifícios apresenta os seus valores máximos nas freguesias com áreas muito reduzidas da Baixa Lisboa (e.g. São Miguel e Socorro na figura 4.26). Também na figura 4.26, ao centro, a cidade de Lisboa sobressai por ser a zona com maior densidade de alojamentos na Área Metropolitana de Lisboa.

2. O Alentejo e algumas regiões adjacentes, como a Beira Interior Sul e o nordeste Algarvio, são as regiões em que se localizam as freguesias com menor densidade de edifícios, alojamentos familiares clássicos e ocupantes. No Alentejo chegam a existir freguesias (*e.g.* São Brissos, Comeal e Maranhão, respectivamente nos concelhos de Beja, Figueira de Castelo Rodrigo e Avis) em que as densidades são inferior a 2 edifícios por km<sup>2</sup> (figura 4.25).

Sobre os mapas das densidades de **alojamentos familiares clássicos e alojamentos colectivos**, para cada classe de **tipo de estrutura**, (figura 4.27) importa referir que:

3. Os alojamentos em edifícios de Betão armado são aqueles que apresentam a densidade média (123,9 alojamentos / km<sup>2</sup>) mais elevada nas freguesias do território continental, sendo seguidos pelos alojamentos em edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, com placa (67,3 alojamentos / km<sup>2</sup>), Paredes de alvenaria argamassada (56,7 alojamentos / km<sup>2</sup>), sem placa, Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta (12,8 alojamentos / km<sup>2</sup>) e Outros (0,8 alojamentos / km<sup>2</sup>).
4. A densidade de alojamentos em edifícios com o tipo de estrutura Outros é muito reduzida e esparsa no território continental em conformidade com a ausência de edifícios com este tipo de estrutura já evidenciada anteriormente (figura 4.8).
5. Para os restantes tipos de estruturas, as maiores densidades de alojamentos surgem nos grandes centros urbanos, com uma distribuição geográfica semelhante à da densidade de alojamentos familiares da figura 4.25, embora sobressaiam algumas freguesias com densidades muito baixas ou mesmo nulas.

Nos mapas das percentagens de **alojamentos familiares clássicos e alojamentos colectivos** por **número de pavimentos** (figura 4.28) dos edifícios observa-se que:

6. As freguesias com as percentagens mais elevadas de alojamentos em edifícios com 1 pavimento localizam-se maioritariamente no Alentejo, e na zona leste da região de Lisboa e Vale do Tejo. No Algarve e no litoral das regiões de Lisboa e Vale do Tejo e Centro essas percentagens são ainda elevadas.
7. As freguesias com as percentagens mais elevadas de alojamentos em edifícios com 2 pavimentos localizam-se maioritariamente nas regiões Centro e Norte, exceptuando-se o litoral da região Centro e a parte sul do litoral da região Norte.
8. As freguesias com as percentagens mais elevadas de alojamentos em edifícios com 3 pavimentos estão confinadas a uma pequena região que abrange parte das NUTS III Pinhal Interior Norte e Sul, Serra da Estrela, Cova da Beira e Beira Interior Norte.

9. O mapa das percentagens de alojamentos em edifícios com 1 pavimento exhibe uma configuração «complementar» à da união dos mapas das percentagens de alojamentos em edifícios com 2 e 3 pavimentos.
10. As percentagens de alojamentos em edifícios com mais de 3 pavimentos são muito reduzidas na globalidade da região em estudo. Surgem, no entanto, alguns casos isolados, tais como a freguesia de Alfovelos, no concelho da Amadora e a freguesia de Monte Abraão, no concelho de Sintra onde a grande maioria dos alojamentos se situam em edifícios da classe de 8 a 15 pavimentos. No caso de alojamentos em edifícios com mais de 15 pavimentos destacam-se as freguesias de Santo António dos Cavaleiros no concelho de Loures, com cerca de 21% dos alojamentos nesta classe de número de pavimentos, sendo imediatamente seguida pelas freguesias do Alto do Pina, com 14% e de São Francisco de Xavier com 11%, ambas no concelho de Lisboa. Nas restantes freguesias de Portugal Continental a percentagem de alojamentos em edifícios com mais de 15 pavimentos é muito reduzida apresentando um valor médio em todo o território de 0,1%.

Relativamente aos mapas das percentagens de **existências em edifícios com data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento sismo-resistente** (figura 4.29), nas datas dos Censos 2001 e 91, constata-se que:

11. As percentagens de edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento sismo-resistente, alojamentos e indivíduos residentes nesses edifícios, por freguesia do território do Continente, revelam uma diminuição nítida entre os Censos 91 e 2001.
12. À data dos Censos 2001, a percentagem média de indivíduos residentes em edifícios construídos em data anterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento sismo-resistente situava-se entre 20 e 30% em todas as NUTS II, com excepção do Alentejo em que essa percentagem média se situava em torno dos 35%. As freguesias que exibiam maiores valores para estas percentagens de elementos em risco situavam-se no concelho de Lisboa. Por exemplo, nas freguesias de Santo Estêvão e Santiago estas percentagens para todos os elementos em risco são superiores a 95%. Em particular em Santiago a percentagem de ocupantes em edifícios construídos em data anterior à do primeiro regulamento é de 99,7%.
13. A observação da figura 4.29 confirma o já constatado no quadro 4.6. De facto, nesta figura também se observa que as percentagens de ocupantes residentes em edifícios construídos em data anterior à do primeiro regulamento sismo-resistente são, em geral, inferiores às percentagens de alojamentos familiares existentes nesses edifícios.

Finalmente, sobre os mapas das **taxas de variação das existências** (figura 4.30) entre os **Censos 91 e 2001** verifica-se que:

14. Os quantitativos globais de todos os elementos em risco registaram uma evolução positiva entre os Censos 91 e 2001 (quadro 4.4), sendo o acréscimo global dos alojamentos (21%) superior ao dos edifícios (11%) que, por sua vez, é superior ao dos indivíduos residentes (5%). Na figura 4.30 sobressai o contraste entre o comportamento maioritariamente regressivo dos ocupantes, nas freguesias do interior do território continental, e os saldos maioritariamente positivos das variações de edifícios e alojamentos entre 1991 e 2001, em todo o território analisado. Assim se ilustra o fenómeno da litoralização, associado ao aumento da habitação secundária no interior, e à migração de famílias para os grandes centros urbanos do litoral. Ainda relativamente aos ocupantes, esta figura também evidencia saldos migratórios positivos muito vincados no litoral a Norte do Cabo Espichel. As freguesias em que o número de edifícios e de alojamentos revelam um comportamento regressivo entre 1991 e 2001 localizam-se primordialmente na zona leste do território continental e no Alentejo.
15. Entre os Censos 91 e 2001 a maioria das freguesias da AML revela um crescimento apreciável dos quantitativos de todos os elementos em risco, sendo as taxas de variação global dos edifícios, alojamentos e ocupantes de 10%, 20% e 6%, respectivamente. O concelho de Lisboa apresenta uma imagem contrastante nesta região, devida à evolução negativa do número de edifícios e ocupantes por freguesia, que apresentam uma taxa de variação global de -14%. Porém, Lisboa continua a ser o concelho que no território do Continente exibe os valores mais elevados das densidades dos elementos em risco.
16. As taxas máximas de variação positiva de edifícios e alojamentos atingem os valores de 568% e 676%, nas freguesias de Cabanas de Tavira e Altura, respectivamente, ambas localizadas no concelho de Castro Marim. O valor máximo da taxa de variação global dos indivíduos residentes é de 429%, na freguesia de Casal de Cambra, concelho de Sintra. As maiores taxas de variação negativa de edifícios, alojamentos e indivíduos residentes atingem os valores de -82%, -84% e -85%, respectivamente, na freguesia de Seixas (concelho de Vila Nova de Foz Côa).

## **4.6. Conclusões**

Seleccionaram-se dos Censos 2001 as unidades estatísticas e as variáveis pertinentes para quantificar e caracterizar geograficamente os elementos em risco em função dos respectivos factores de vulnerabilidade e identificar as tipologias construtivas mais representativas e frequentes de Portugal Continental. Tendo presente os objectivos mencionados, sintetiza-se a análise efectuada salientando-se as seguintes conclusões:

1. O parque habitacional recenseado em Portugal Continental é composto por **edifícios** construídos maioritariamente (70%) após a introdução da primeira **regulamentação Portuguesa sismo-resistente** [RSCCS, 1958], com 1 e 2 **pavimentos** (85%), sobressaindo a **estrutura do tipo** Paredes de alvenaria argamassada, com placa (41%),

seguida da estrutura de Betão armado (30%). Em Portugal Continental construíram-se 28% dos edifícios em data posterior à da entrada em vigor do actual regulamento [RSA, 1983]. Obviamente, a data de introdução dos regulamentos é meramente indicadora não querendo dizer que todos os edifícios posteriores a esta data possam ser considerados sismo-resistentes, principalmente os que possuem um tipo de estrutura diferente do Betão armado. Ao longo do tempo, os tipos de estruturas de Paredes de alvenaria argamassada, com placa e de Betão armado foram tendo progressivamente maior peso nas existências de edifícios do País, verificando-se o inverso no que toca aos edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, sem placa e com Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta. Porém, é verosímil que alguns tipos de estruturas sofram alterações nos seus processos construtivos e elementos resistentes, quer entre regiões de Portugal quer ao longo do tempo, ou seja, os tipos de estruturas não são totalmente homogêneos, nem temporal, nem geograficamente.

2. Quando os elementos em risco são os **alojamentos** e os **indivíduos** residentes então as existências em edifícios construídos após a introdução da primeira **regulamentação Portuguesa sismo-resistente** crescem para 76 e 80%, respectivamente. As percentagens de alojamentos e indivíduos em edifícios de 1 e de 2 **pavimentos**, decrescem para cerca de 58%. A maioria dos alojamentos e indivíduos existem ou residem em edifícios de Betão armado (48% e 49%, respectivamente) ou em edifícios com **estrutura do tipo** Paredes de alvenaria argamassada, com placa (32% e 35%, respectivamente). As percentagens de alojamentos e indivíduos residentes em edifícios construídos em data posterior à da introdução do regulamento actualmente em vigor [RSA, 1983], atingem valores de 33% e 34%, respectivamente, sendo superiores à correspondente percentagem de edifícios (28%).
3. Os números de **edifícios**, **alojamentos** e **indivíduos** residentes em Portugal Continental cresceram entre os **Censos 91 e 2001** (10,5%, 20,7% e 5,23%, respectivamente). No entanto, no mesmo período de 10 anos, é notória a migração de indivíduos do interior para o litoral do Continente Português, não ocorrendo um decréscimo correspondente em termos dos números de edifícios e alojamentos. A **variação**, por época de construção, do número de **edifícios** entre os **Censos 91 e 2001** evidencia decréscimos do número de edifícios mais acentuados para as épocas de construção mais antigas, o que indicia a tendência de renovação do parque habitacional.
4. De forma concordante com as evidências do parágrafo anterior, registou-se, entre os dois últimos Censos, um crescimento notório das percentagens de **edifícios construídos em data posterior à do primeiro regulamento**, e também dos **alojamentos** e **indivíduos** residentes nesses edifícios. Globalmente, neste território, verificou-se uma taxa de variação positiva de 38%, 47% e 29%, para edifícios construídos em data posterior à do primeiro regulamento, alojamentos e indivíduos residentes nesses edifícios, respectivamente.

5. As freguesias com maior **densidade** de **edifícios** de habitação, **alojamentos** e **ocupantes** situam-se nas principais cidades do país, bem como em toda a faixa costeira a norte do Cabo Espichel e no Algarve, destacando-se as zonas da Grande Lisboa e Grande Porto. A densidade de alojamentos em edifícios dos vários **tipos de estruturas** apresenta uma distribuição geográfica semelhante à dos elementos em risco, embora com quantitativos inferiores.
6. As freguesias com as percentagens mais elevadas de alojamentos em edifícios com **1 pavimento** localizam-se maioritariamente no Alentejo, e na parte leste da região de Lisboa e Vale do Tejo, enquanto que com **2 pavimentos** se localizam nas regiões Centro e Norte, exceptuando-se o litoral da região Centro e a parte sul do litoral da região Norte.
7. Sobre os novos factores de vulnerabilidade apurados no Questionário de Edifício dos Censos 2001 ressalta que os edifícios que possuem R/C com colunas isoladas na sua maior parte ou que são mais altos (mais de dois pavimentos) do que qualquer dos edifícios adjacentes não têm expressão no parque habitacional do Continente Português. Por outro lado, cerca de 40% dos edifícios do parque habitacional necessitam de obras de reparação, 3% dos quais (88 316) se encontram muito degradados. O estado de conservação dos edifícios apresenta-se homogéneo ao nível de NUTS II [INE, 2002b].
8. Tendo em vista os objectivos do estudo, conclui-se que as análises efectuadas conferem alguma confiança aos dados coligidos, salientando-se a razoabilidade dos resultados face ao panorama geral da construção em Portugal. Verifica-se também que, nos Censos 2001, as dificuldades de classificação dos elementos estruturais dos edifícios foram de alguma forma atenuadas com a introdução das **novas modalidades** da variável **tipo de estrutura**. Estas modalidades são agora mais consentâneas com a prática construtiva do País, sendo este facto atestado pela diminuição do número de edifícios classificados no tipo de estrutura Outros, pelo aumento do número de edifícios com tipo de estrutura de Betão armado e de Paredes de alvenaria argamassada, com placa em épocas de construção mais recentes e pela correspondente diminuição do número de edifícios com tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada sem placa e de adobe taipa ou alvenaria de pedra solta, também nas épocas de construção mais recentes.

Para terminar é importante realçar alguns aspectos fundamentais:

As percentagens elevadas de elementos em risco em edifícios construídos em data posterior à da entrada em vigor do primeiro regulamento não implicam necessariamente um quadro positivo para a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional Português, pois não existem garantias sobre a aplicação sistemática das regulamentações sismo-resistentes, quer ao nível do projecto estrutural quer na execução das obras, principalmente em edifícios com tipo de estrutura diferente do Betão armado.

O optimismo que poderia resultar do crescimento, neste recenseamento, do número de edifícios construídos posteriormente a 1960 é também posto em causa quando se consideram os seguintes aspectos: (i) a estrutura de 40% dos edifícios do parque habitacional Português necessita de obras de reparação, classificadas entre pequenas e muito grandes (porém, esta observação aplica-se principalmente aos edifícios mais antigos que exibem uma tendência natural para serem substituídos); (ii) a estrutura original dos edifícios pode muitas vezes ter padecido de alterações que ponham em causa o respectivo desempenho sísmico; (iii) tendo em conta o progresso dos conhecimentos de Engenharia Sísmica entre 1960 e 1985, os edifícios que foram dimensionados de acordo com as especificações do RSCCS [1958] são mais vulneráveis do que os dimensionados de acordo com o RSA [1983].



## 5. VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS ELEMENTOS EM RISCO

### 5.1. Introdução

Em termos gerais, os principais factores que condicionam a vulnerabilidade sísmica das construções são, em primeiro lugar, os seus elementos resistentes, mas também a configuração dos sistemas estruturais (dimensões e forma em planta, número de pisos e configuração em altura, distribuição da massa), as disposições de dimensionamento do projecto, a qualidade da construção, a época de construção e ainda os materiais, métodos e tecnologias construtivas da região onde se localiza a construção [Coelho, 2003]. A estes factores de vulnerabilidade dever-se-á acrescentar o estado global de conservação dos edifícios e da sua estrutura que, em particular, no caso das construções mais antigas, se sabe que condiciona a sua resposta à acção dos sismos.

O presente capítulo tem por objectivos caracterizar o parque habitacional existente em Portugal Continental, classificá-lo em tipologias construtivas e agrupar essas tipologias em classes de vulnerabilidade mais abrangentes e caracterizar a vulnerabilidade sísmica destas classes de acordo com os modelos de danos disponíveis.

A classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional exibida no presente capítulo tem que satisfazer, pelo menos, três compromissos: (i) o de se adequar à realidade construtiva de Portugal Continental (ii) o de se adaptar ao inventário disponível dos elementos em risco que, tal como foi reportado no capítulo 4, se baseou em informação seleccionada dos Censos 2001 e (iii) o de coincidir com os critérios dos métodos de avaliação de danos adoptados na análise do risco sísmico.

Para melhor enquadrar o panorama construtivo de Portugal Continental nas classificações tipológicas subjacentes às metodologias de avaliação de risco desenvolveu-se a secção 5.2, em que se caracteriza a evolução das práticas construtivas ao longo do tempo, se identificam os principais tipos de construção que subsistem e praticam no Continente, se descreve, de forma sumária, os respectivos sistemas estruturais e se mencionam as suas principais vulnerabilidades face à acção dos sismos, entendidas nessa secção como as deficiências de desempenho sísmico do sistema.

No quadro 5.1 sintetiza-se a organização do presente capítulo no que toca à classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional de Portugal Continental. Neste quadro reúnem-se as classificações tipológicas adoptadas, estabelece-se a correspondência com os modelos de danos que as utilizam e com as secções em que o trabalho é efectuado.

Assim, na secção 5.3 apresenta-se a classificação do parque habitacional de Portugal Continental em tipologias construtivas e em classes de vulnerabilidade. Estas classes são adequadas aos métodos de análise de vulnerabilidade sísmica, ou modelos de danos adoptados no presente trabalho.

Quadro 5.1 - Síntese da organização das secções do capítulo 5 relativas à classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica.

Tipologias	Secção 5.3 classificação vuln.	Modelos de danos	Secção 5.4 caracteriza- ção vuln. e frag.
Censos 2001	5.3.1	--	--
FEMA & NIBS	5.3.2	FEMA & NIBS [1999]	5.4.1
EMS-98	5.3.3	Giovinazzi & Lagomarsino [2003]	5.4.2
MSK	5.3.4	Di Pasquale & Orsini [1997]	5.4.3
MSK	5.3.4	Zuccaro & Papa [2002]	5.4.4
Tiedemann	5.3.2	Tiedemann [1992]	5.4.5

No que concerne à classificação de vulnerabilidade, um dos pontos que distingue as metodologias FEMA & NIBS, Tiedemann e Giovinazzi & Lagomarsino das metodologias de Di Pasquale & Orsini e Zuccaro & Papa é que as primeiras apresentam modelos de dano válidos para tipologias construtivas, enquanto que as segundas apresentam modelos de danos válidos apenas para classes de vulnerabilidade. Assim, as metodologias FEMA & NIBS e Giovinazzi & Lagomarsino possibilitam uma classificação mais fina da vulnerabilidade do parque habitacional. Nas duas últimas metodologias referidas as classes de vulnerabilidade são utilizadas para facilitar a análise e representação dos dados.

Na secção 5.4 caracteriza-se a vulnerabilidade e a fragilidade sísmica das tipologias e das classes de vulnerabilidade identificadas na secção 5.3 seguindo os critérios utilizados na avaliação do risco sísmico, ou seja, descrevendo as respectivas curvas de capacidade, vulnerabilidade e fragilidade, ou as matrizes de probabilidade de dano. Para acompanhar este capítulo organizou-se o anexo C onde se reúnem os parâmetros necessários à operacionalização dos modelos de danos.

Na secção 5.5 faz-se uma análise crítica e comparativa das metodologias disponíveis para caracterizar a vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco.

Na penúltima secção deste capítulo, a secção 5.6, justificam-se as opções tomadas para caracterizar a vulnerabilidade sísmica dos habitantes de Portugal Continental e efectua-se, analogamente, uma análise crítica sumária das metodologias disponíveis para avaliação de perdas humanas.

## 5.2. Breve caracterização do parque habitacional de Portugal Continental

### 5.2.1. Enquadramento

Nesta etapa apresenta-se um panorama global e sintético do parque habitacional existente em Portugal Continental, tipificando as soluções construtivas mais correntes e enquadrando-as nas tipologias identificadas nos Censos 2001 (capítulo 4 e secção 5.3.1). Realçam-se os sistemas estruturais das tipologias identificadas, que se espera mostrarem desempenhos sísmicos semelhantes, e referem-se as suas principais deficiências face à acção sísmica.

Dada a extensão desta caracterização, ela apenas será abordada de forma superficial, endereçando-se para a bibliografia especializada os detalhes sobre os temas referidos.

A tipificação do parque e das técnicas construtivas pode ser efectuada seguindo diferentes abordagens das quais se destacam as classificações, por vezes correlacionadas, segundo critérios de localização geográfica, de materiais empregues na construção, de características dos processos construtivos e de evolução da construção.

Na descrição da evolução da construção é usual delimitar períodos históricos construtivos e identificar as tipologias construtivas específicas de cada época. Naturalmente, e tal como Cardoso [2002] salienta, os principais marcos históricos não constituem fronteiras rígidas e, na maior parte dos casos, a transição entre tipologias não se processa de forma repentina, favorecendo o aparecimento de soluções intermédias.

Tendo presente que a evolução temporal dos procedimentos construtivos se processa, maioritariamente, sem grandes discontinuidades, identificam-se, no entanto, alguns momentos marcantes, embora de índole distinta, que assinalam o início de alterações rápidas e significativas nos hábitos construtivos dos edifícios em Portugal: o sismo de 1755, a massificação do betão armado no final da década de 40 do século XX [Appleton, 1991] e a entrada em vigor dos regulamentos de construção sismo-resistentes modernos [RSCCS, 1958 e RSA, 1983].

O advento do betão armado no final do século XIX<sup>1</sup> [Appleton, 1991; Ferreira, 1989; Ferreira, 1991] marcou o início do declínio da construção em alvenaria. Efectivamente, no início do século XX, o emprego da alvenaria como sistema estrutural encontrava-se

---

<sup>1</sup> De acordo com Ferreira [1989 e 1991] as origens do betão armado em Portugal estão historicamente associadas ao início da produção em 1894 de cimento Portland na fábrica da Companhia do Cimento Tejo em Alhandra e ao processo de registo de patente da invenção de François Hennebique de «um vigamento ligeiro e de grande resistência, de formigação (betão) de cimento, com barras de ferro e estribos travessas metidas na massa». Este processo iniciou-se em 1894, em Lisboa, com a «Exposição do Invento», tendo o pedido de concessão do título de patente sido formalizado em 1895 e concedido no ano seguinte.

consagrado, sendo praticamente o sistema construtivo exclusivo dos edifícios de Portugal Continental. Gradualmente, em cerca de um século, o número de edifícios com estrutura em alvenaria diminuiu para pouco mais de metade do número global de edifícios existente neste território. Estes quantitativos decorrem da análise da figura 5.1 que é efectuada nos próximos parágrafos.

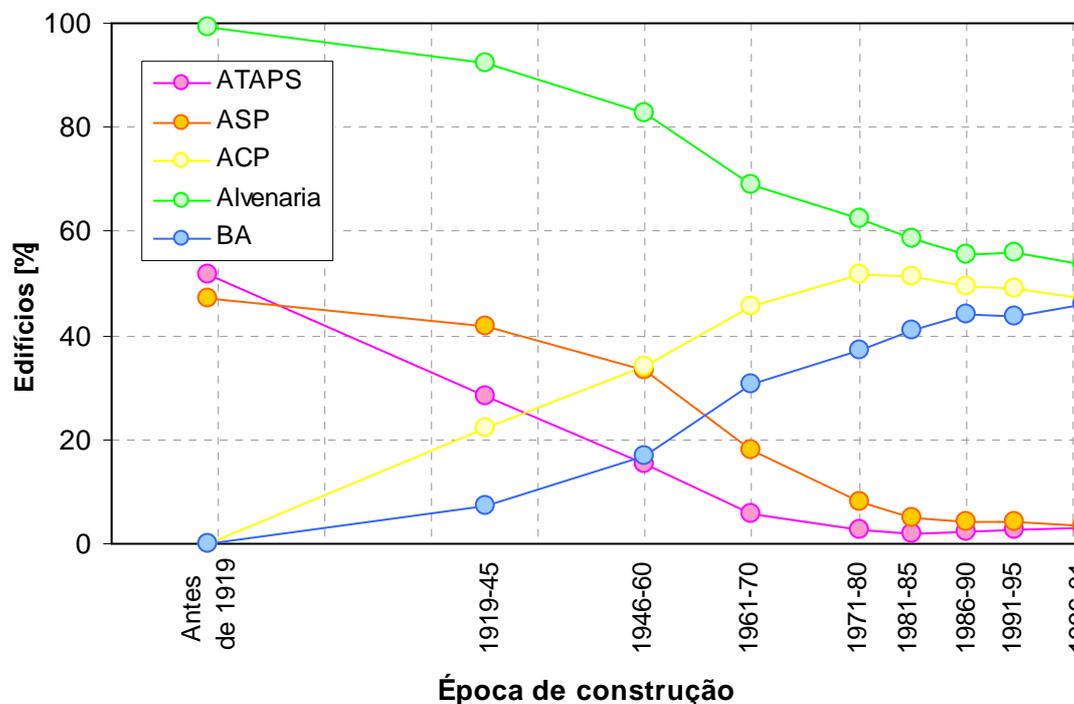


Figura 5.1 – Comparação das percentagens de edifícios com tipo de estrutura de alvenaria e de betão armado existentes no parque habitacional de Portugal Continental, à data dos Censos 2001, e construídos em épocas distintas.

A figura 5.1 representa uma reformulação da figura 4.10, com algumas alterações. Relembre-se que, tal como foi evidenciado no capítulo 4, as séries desenhadas nesta figura correspondem a um retrato das existências de edifícios do parque habitacional de Portugal Continental, à data dos Censos 2001, em função da época em que foram construídos e evidenciando o peso relativo dos vários tipos de estrutura. Na figura 5.1 acrescentou-se uma série suplementar (a verde) que contabiliza o total dos edifícios de alvenaria, ou seja, o resultado da adição dos edifícios construídos, numa mesma época, com tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, com placa, ou Paredes de alvenaria argamassada, sem placa ou Paredes de adobe taipa ou alvenaria de pedra solta (ACP + ASP + ATAPS).

Note-se que a evolução do parque habitacional não pode ser inferida desta figura, uma vez que os números respeitantes às demolições e reconstruções de edifícios não estão incluídos. No entanto, relativamente aos edifícios construídos nas últimas décadas, que provavelmente sofreram um número menor de demolições e reconstruções, é possível efectuar uma análise pouco enviesada da sua evolução.

Constata-se, assim, que a construção de edifícios com estrutura de alvenaria decresceu ligeiramente nas últimas décadas, enquanto que o oposto se observou nos edifícios com estrutura de betão armado. Porém, um dos aspectos mais marcantes revelado pela figura 5.1 é que se a alvenaria como sistema estrutural (série verde) predomina no parque habitacional construído nas últimas décadas (pouco mais de 50%), essa predominância é conseguida graças aos quantitativos elevados de edifícios de alvenaria com elementos de betão (ACP, série amarela). Efectivamente, os edifícios com estrutura do tipo ASP e ATAPS apresentam, em cada época, percentagens de construção baixas e aproximadamente constantes, entre 3 e 4% e entre 2 e 3%, respectivamente.

Por outro lado, nos quantitativos do parque habitacional apurados em 2001 também sobressai o contraste entre a inexistência de edifícios de Betão Armado construídos no início do século XX e o seu crescimento para 46% dos edifícios construídos no período de 1995 a 2001.

Deste modo, a principal conclusão a retirar das percentagens ilustradas na figura 5.1 é que o betão armado introduziu alterações profundas nos processos construtivos, não só pela massificação do seu emprego como solução estrutural, como também pelas suas implicações nos sistemas construtivos de alvenaria.

Identificam-se, deste modo, três grandes grupos de sistemas construtivos presentes no parque habitacional de Portugal:

- (i) os edifícios de alvenaria anteriores à consolidação do uso do betão armado, denominados por Appleton [1991] de edifícios antigos, aos quais se adicionam os edifícios de alvenaria de épocas mais recentes, mas que continuaram a ser construídos recorrendo aos materiais e às tecnologias tradicionalmente usadas ao longo do tempo;
- (ii) os edifícios em que a alvenaria exerce funções estruturais mas que contam com elementos de betão armado para a sua consolidação;
- (iii) os edifícios com estrutura de betão armado.

Na figura 5.2 enquadram-se os diversos sistemas construtivos existentes no parque habitacional de Portugal Continental nos três grandes grupos atrás referidos identificados por (i) a (iii).

Os edifícios pertencentes ao primeiro grupo são classificados nos Censos 2001 como tendo tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, sem placa, ou de Paredes de adobe taipa ou alvenaria de pedra solta (ASP + ATAPS).

Os edifícios pertencentes ao segundo grupo são classificados nos Censos 2001 como tendo tipo de estrutura Paredes de alvenaria argamassada, com placa (ACP).

Finalmente, os edifícios pertencentes ao terceiro grupo correspondem aos edifícios com tipo de estrutura de Betão Armado (BA) dos Censos 2001.

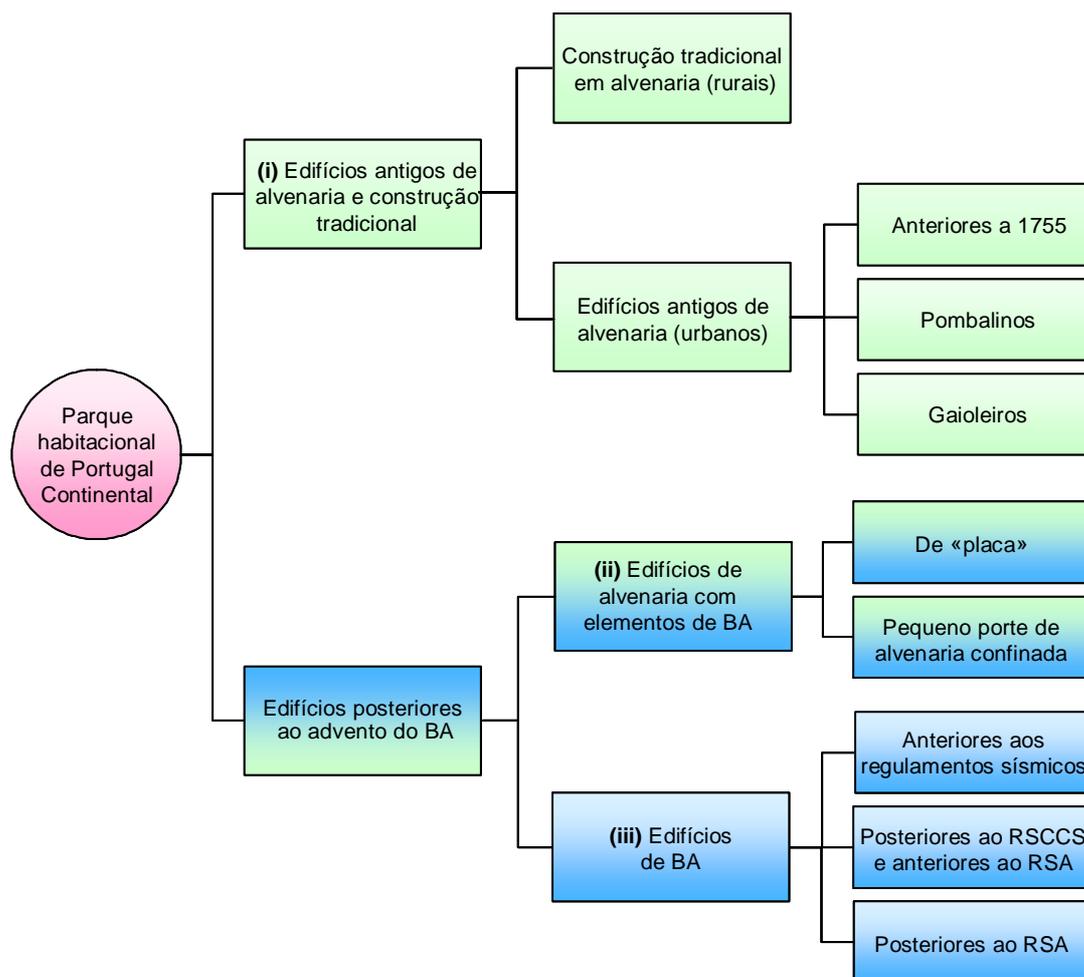


Figura 5.2 – Sistemas construtivos existentes no parque habitacional de Portugal Continental.

### 5.2.2. Edifícios antigos de alvenaria e construção tradicional

Segundo Carvalho & Oliveira [1999] uma alvenaria corresponde à associação de várias unidades elementares, de um ou mais materiais, ligadas ou não por um elemento aglutinador, designado de ligante. Roque & Lourenço [2003] referem que desta associação resulta um compósito heterogéneo, capaz de constituir elementos estruturais vocacionados para funcionar à compressão, mas tendo pequena capacidade para suportar esforços de flexão, de corte ou de tracção. Desta forma, nas construções de alvenaria, este material aparece apenas nos elementos verticais de suporte, utilizando-se outros materiais, como a madeira, nos pavimentos e coberturas [Paiva *et al.*, 1985].

Nos edifícios antigos as paredes exteriores constituem os elementos resistentes fundamentais capazes de suportar cargas verticais, nomeadamente de natureza gravítica, e também forças horizontais resultantes do vento, de sismos e de impulsos horizontais da própria estrutura [Appleton, 1991 e Costa, 2000]. Os pavimentos e cobertura têm o papel de

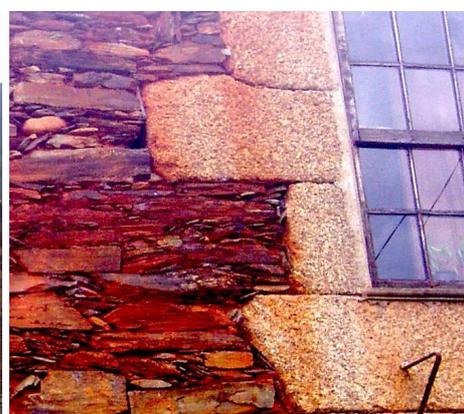
assegurar a interligação entre elementos estruturais verticais, conferindo rigidez à estrutura e contribuindo para que esta resista a esforços horizontais [Farinha, 1955 e Mateus, 2002]. Nos edifícios antigos as paredes de compartimentação também concorrem para o travamento geral da estrutura, assegurando a ligação entre paredes, pavimentos e coberturas [Appleton, 1991 e Pinho, 2000a].

As paredes de alvenaria dos edifícios antigos exibem uma composição diversificada dependente das unidades elementares e materiais de ligação utilizados na sua composição [Appleton, 1991]. Nas épocas mais antigas as variações geográficas das práticas construtivas estão correlacionadas com os próprios materiais empregues na construção, pois devido a limitações impostas pelas dificuldades de transporte e por questões de economia e rapidez da construção utilizavam-se os recursos disponíveis na região onde os edifícios eram construídos [Ramos, 2002].

De acordo com Pinho [2000a] e Appleton [1991], na região Norte e Beiras a construção tradicional em alvenaria recorre com frequência ao granito e ao xisto, construindo-se edifícios de pedra talhada e de pedra irregular assentes a seco ou com argamassas (ver figuras 5.3, 5.4 e 5.6). Na região de Lisboa, na região Oeste e em certas zonas do Alentejo e da Beira Litoral predomina a alvenaria de pedra calcária e de tijolo (ver figuras 5.5 e 5.7). Sobre a construção em alvenaria de terra sob a forma de taipa ou adobe, praticada nas regiões do Ribatejo, Alentejo e Algarve, falar-se-á adiante com um pouco mais de detalhe.



*Figura 5.3 – Exemplo de edifício com paredes em xisto no concelho de Manteigas; classificado nos Censos 2001 como ATAPS, anterior a 1919, de 1 pavimento.*



*Figura 5.4 – Exemplo e pormenor de edifício de habitação no concelho de Manteigas com paredes em granito e xisto argamassadas com barro vermelho; classificado nos Censos 2001 como ASP, anterior a 1919, de 2 pavimentos.*

A variação geográfica das técnicas construtivas também se correlaciona com uma classificação urbana ou rural da construção, que por sua vez se confunde com uma classificação da construção em popular ou erudita. De facto, é nos centros urbanos que surgem os materiais de maior qualidade aliados a processos construtivos com um nível mais elevado de tecnicidade, embora também se verifique construção de natureza pobre e de má qualidade. Por outro lado, nas regiões rurais, de menores possibilidades económicas, utilizam-se, em geral, materiais mais pobres sendo correntes os casos de auto-construção.

É o caso da construção em taipa e adobe, maioritariamente com um piso térreo e com paredes sem qualquer travamento [Farinha, 1955]. É prática consagrada pela experiência que estes edifícios sejam construídos sobre fundações de alvenaria de pedra de forma a evitar o contacto com a água e a humidade do solo [Ferreira, 1989]. A protecção exterior das paredes é normalmente feita com um reboco de cal e areia [Marécos & Castanheta, 1970]. A taipa resulta da compressão de terra húmida e argilosa entre taipais de madeira que são retirados após a secagem das paredes, que resultam homogéneas e monolíticas [Farinha, 1955 e Pinho, 2000a]. Por sua vez, o adobe, cuja principal matéria prima é a argila, com misturas arenosas ou calcárias, resulta da cozedura ao sol, ou em fornos, de tijolos de barro amassado com água [Pinho, 2000b].

Na sequência do sismo de 1969, Marécos & Castanheta [1970] visitaram o Alentejo e o Algarve que foram as regiões mais afectadas pelo evento. Estes autores reportam que, nessa data, uma grande percentagem da construção rural era de adobe e taipa, sendo um material também utilizado em casas de um ou dois pisos de vários centros urbanos, armazéns e construções diversas. Marécos & Castanheta [1970] sublinham que este foi o tipo de construção mais severamente atingido pelo sismo de 1969. Testemunho idêntico sobre construções de adobe e taipa foi feito por Choffat [citado por Farinha, 1955] relativamente aos danos causados pelo sismo de 1909.

A influência da localização geográfica nos materiais empregues na construção de edifícios antigos, bem como as técnicas tradicionais usadas na construção pobre e rural, mantiveram-se praticamente imutáveis ao longo do tempo e ainda subsistem [Appleton, 2001], embora com expressão reduzida no parque habitacional de Portugal Continental.

Já na evolução histórica da maioria dos edifícios antigos construídos em centros urbanos é possível identificar determinadas épocas marcadas pela incidência de tecnologias construtivas diferenciadas, sendo usual generalizar as principais práticas construtivas de Lisboa e Porto para os restantes aglomerados urbanos do País [Pinho, 2000a].

Assim, no universo dos edifícios antigos do parque habitacional de Lisboa é tradicional identificar três categorias de processos construtivos bem circunscritos no tempo e espaço [Aguiar *et al.*, 1992; Appleton, 1991; Moreira & Cabrita, 1985; Oliveira, 1983; Oliveira *et al.*, 1985; Silva, 2001; Silva & Soares, 1996 e 1997], (i) os edifícios de alvenaria de pedra anteriores a 1755, (ii) os edifícios de alvenaria da época Pombalina e (iii) os edifícios de alvenaria do tipo Gaioleiro.

### Edifícios pré-Pombalinos

Os edifícios existentes em Lisboa que sobreviveram ao terramoto de 1755 são de dois tipos principais [Oliveira *et al.*, 1985 e LNEC, 1993]: (i) os edifícios nobres e apalaçados, de três e quatro pisos, com paredes de alvenaria, muitas vezes aparelhada, pelo menos nos cunhais e com alguns elementos de travamento caracterizados por uma grande volumetria e área de implantação, destacando-se assim da construção corrente que possuía dimensões exíguas; (ii) a construção em alvenaria pobre, sem elementos de travamento e com pavimentos de madeira, pé direito baixo, grande densidade de paredes e poucas aberturas para o exterior. Incluem-se nesta categoria um pequeno número de edifícios que ainda subsiste nos bairros mais antigos de Lisboa, como as casas de frente estreita com escada de tiro, as de cobertura de duas águas formando fachadas em bico e as de estrutura mista com paredes exteriores de alvenaria de pedra e com tabique nos andares superiores, criando uma fachada lisa ou com um ou mais ressaltos sobre a rua (ver figura 5.5).



Figura 5.5 – Exemplo de edifícios pré-Pombalinos na cidade de Lisboa; esquerda: prédio de duas águas de fachada em bico; direita: prédio com ressalto bilateral; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919.

No norte do Continente, e à semelhança do resto do País, os edifícios urbanos antigos empregam os materiais construtivos correntemente utilizados na região em que se inserem, predominando neste caso o granito e o xisto, formando alvenarias de pedra seca ou argamassada. Por exemplo, na zona de Bragança os materiais usados na construção das paredes exteriores dos edifícios são fundamentalmente a pedra e o barro, sendo o granito, mas principalmente o xisto, as pedras mais abundantes na região [Luso *et al.*, 2003].

No Porto os edifícios mais antigos que ainda subsistem caracterizam-se por serem estreitos e altos, com estrutura resistente em alvenaria de pedra irregular na qual se apoiam elementos horizontais de madeira que suportam os pavimentos, também em madeira (ver figura 5.6) [Costa, 2001]. No centro histórico do Porto, em edifícios antigos que se supõem anteriores à época Pombalina, surgem exemplos de soluções construtivas variáveis ao longo da altura dos

edifícios, nomeadamente paredes resistentes em que o primeiro troço é de alvenaria de pedra e a parte superior é constituída por um conjunto de vigas, prumos e diagonais de travamento em madeira, cujos vazios são preenchidos por taipa (ver figura 5.6 centro e direita).



Fotografias em Costa, 2001

*Figura 5.6 – Exemplo de edifícios da zona histórica do Porto; centro e direita: edifício com fachada principal realizada em alvenaria de pedra e taipa e pormenor de parede de travamento com elementos de madeira e taipa [Costa, 2001]; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919, em mau estado de conservação.*

### **Edifícios Pombalinos**

A reconstrução Pombalina da cidade de Lisboa, depois do terramoto de 1755, é tema incluído em inúmeras publicações pelo carácter inovador de algumas técnicas arquitectónicas e construtivas, em particular a concepção anti-sísmica da gaiola, e pela normalização e aplicação sistemática do projecto de edifícios, da qual é expoente a Baixa Pombalina (ver figura 5.7) [e.g. Appleton, 1991 e 1994; Cardoso, 2002; Farinha, 1955 e 1997; França, 1977 e 2000; Mascarenhas, 1994 e 1997; Mateus, 2002; Pinho, 2000a; Oliveira *et al.*, 1985; Ramos, 2002; Ramos & Lourenço, 2000 e Silveira *et al.*, 2003].

Em Dezembro de 1755, Manuel da Maia, engenheiro-mor do reino, apresenta cinco «modos» possíveis para a reconstrução e renovação urbana da «cidade baixa de Lisboa» [Mascarenhas, 2005]. Entre os engenheiros e arquitectos envolvidos no plano aprovado para as novas ruas e edifícios destacam-se Eugénio dos Santos e Carlos Mardel, a quem se devem, nomeadamente, os projectos do Terreiro do Paço e do Rossio, respectivamente [França, 1989].

Os projectos das fachadas dos edifícios a serem construídos tinham um traçado padronizado, podendo ser classificados essencialmente em três tipos, com variações ligeiras nos elementos arquitectónicos que diferenciavam os edifícios consoante a importância da rua em que se localizariam [França, 1989 e Mascarenhas, 2005]. Assim, em geral, o «prédio pombalino» era formado por quatro pisos acima do solo, sendo o rés-do-chão dedicado ao comércio e a ofícios diversos. Nos restantes pisos, destinados à habitação, o primeiro andar tinha janelas de sacada, o segundo e terceiro janelas de peito e o último andar era constituído por águas furtadas. Os edifícios pombalinos assentavam sobre um andar térreo com arcos em pedra ou abóbada de tijolo, fundados em estacaria de madeira [Oliveira *et al.*, 1985]. A gaiola iniciava-se na parte superior das fundações ou a partir do primeiro piso [Farinha, 1955].



Fotografia em Monumentos, 21, 2004

*Figura 5.7 – Exemplo de edifícios Pombalinos; em cima à esquerda: edifício localizado em Alcoçaba em mau estado de conservação; restantes edifícios localizados em Lisboa; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919, com número de pavimentos igual a 3 ou da classe 5 a 7. Todos eles possuem o R/C com espaço interior amplo na sua maior parte devido à existência de lojas.*

Muito brevemente, a gaiola Pombalina, designada à época de «armação», consiste num sistema tridimensional de pórticos de madeira<sup>2</sup>, envoltos pela alvenaria das paredes ou encostados à sua face interior, que assegura o travamento geral da estrutura [Cardoso, 2002; Farinha, 1955 e Ramos & Lourenço, 2000]. Na figura 5.8 apresenta-se uma fotografia de uma maquete de uma gaiola Pombalina existente no quartel da Companhia de Intervenção Especial do Batalhão de Sapadores de Bombeiros [Farinha, 1997]. De acordo com Farinha [1955] as gaiolas de madeira eram construídas até à cobertura antes do envolvimento pelas alvenarias, resultando a



*Figura 5.8 – Maquete de uma gaiola Pombalina [Farinha, 1997].*

<sup>2</sup> Em Lisboa a madeira usada na gaiola é principalmente de pinho e casquinha, mas também carvalho e castanho.

sua denominação da aparência da obra nesta fase da construção. Os frontais faziam parte integrante das gaiolas Pombalinas, formando paredes interiores resistentes, também constituídas por uma grade de madeira embebida na espessura da alvenaria; esta era composta por tijolo ou pedra miúda e com a superfície exterior rebocada [Pinho, 2000a e Silveira *et al.*, 2003]. Os frontais dispunham-se nas duas direcções de simetria do edifício e o seu esqueleto de madeira incluía cruces de Santo André, cuja triangulação conferia estabilidade à estrutura [Silveira *et al.*, 2003]. Elementos de união asseguravam a ligação entre a madeira da gaiola e a alvenaria, contribuía para as interligações entre os vários elementos da estrutura e, segundo Cardoso *et al.* [2001], conferiam ductilidade ao conjunto. Esta ligação entre paredes e pavimentos, assegurada pela gaiola, é outro dos factores que aumenta a capacidade resistente destes edifícios aos sismos.

Muitos edifícios Pombalinos foram sujeitos a modificações após a sua construção, salientando-se a ampliação dos edifícios em altura, as alterações da compartimentação interior com supressão de paredes, a abertura de fachadas dos andares comerciais, a construção de caves, etc. [Appleton, 1994]. Algumas destas intervenções comprometeram certamente a estabilidade e solidarização da estrutura, podendo colocar em causa a sua capacidade de resistir a um sismo.

No norte do Continente Português não se verifica uma descontinuidade marcada entre os edifícios construídos antes e depois do Terramoto. Com efeito, apesar dos processos construtivos praticados em Lisboa serem usualmente exportados para os restantes centros urbanos de Portugal, a tipologia Pombalina não tem expressão no norte do Continente, pois esta região foi menos afectada pelo sismo de 1755.

### ***Edifícios Gaioleiros***

Como é sabido, a reconstrução da cidade de Lisboa demorou quase um século, prolongando-se até meados do século XIX. Ao longo deste período, e devido à frequência reduzida de sismos destrutivos em Portugal Continental, a percepção do risco e a preocupação com a segurança e qualidade da construção diminuiu progressivamente. As exigências da construção Pombalina deixaram gradualmente de ser cumpridas suscitando a adulteração e a simplificação da gaiola de madeira. Entra-se assim num período de transição identificado, no final do século XIX, como época construtiva distinta, a época Gaioleira [Oliveira *et al.* 1985].

Nesta época, a falta de qualidade do projecto e construção em Lisboa era de tal monta que levou, em 1909, Pereira de Sousa [citado por Farinha, 1955] a referir-se ao facto com indignação: «É necessário, acabar em prol da Pátria e da Humanidade com essa quase liberdade de construção em Lisboa». Autores mais recentes [Appleton, 1991] apelidam os edifícios Gaioleiros de «desastre construtivo» (ver figura 5.9).



Figura 5.9 – Exemplos de edifícios Gaioleiros; em cima: fachadas e tardoz de Gaioleiros localizados em Lisboa; em baixo: interior de Gaioleiro em Lisboa e fachadas em Lagos e na Figueira da Foz; classificados nos Censos 2001 como ASP.

A época construtiva dos edifícios Gaioleiros é caracterizada por um acréscimo do número de pisos relativamente aos Pombalinos (um ou dois), um aumento na altura dos pés-direitos, um aligeiramento das secções das paredes resistentes e uma remoção gradual dos elementos de madeira [Cardoso, 2002; Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1997]. Os edifícios são constituídos por paredes de alvenaria de pedra de fraca qualidade, tijolo maciço ou de dois furos e por pavimentos realizados em madeira, verificando-se um decréscimo na secção horizontal das paredes resistentes ao longo da altura do prédio.

Os Gaioleiros sofrem de graves insuficiências de contraventamento e de falta de solidarização dos elementos estruturais [Pinho, 2000a; Silva & Soares, 1996 e 1997]. Neste tipo de edifícios as paredes divisórias cumprem um papel muito importante no contraventamento da estrutura face à acção dos sismos.

Este tipo de edifícios apresentam, por vezes, elementos decorativos muito pesados e a sua grande profundidade exige a presença de saguões.

Em meados do século XIX são introduzidos novos materiais industriais, permitindo construir as marquises de ferro nas traseiras dos edifícios Gaioleiros, e utilizar elementos de suporte metálicos nos pisos térreos [Fernandes, 1985 e Oliveira *et al.*, 1985]. A vulnerabilidade dos elementos metálicos à corrosão contribuiu para que muitos destes edifícios se encontrem actualmente em mau estado de conservação.

Os edifícios Gaioleiros estão representados em muitas zonas de Lisboa, desde a Almirante de Reis a Campo de Ourique, passando pelas Avenidas Novas [Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1996], surgindo também com frequência noutros centros urbanos do País. De facto, ao contrário dos Pombalinos os edifícios Gaioleiros estão representados em todo o território continental, diferenciando-se de região para região primordialmente pelo tipo de alvenaria empregue na sua construção.

As características gerais dos edifícios construídos na época Gaioleira no norte do território continental são as seguintes: pisos térreos com paredes em cantaria de granito, restantes pisos com elementos de cantaria nos cunhais e a circundar as aberturas das portas e janelas, cornijas em cantaria (ver figura 5.10 esquerda). Nesta região os edifícios desta época construtiva caracterizam-se por terem um menor número de pavimentos que os localizados em Lisboa e por apresentarem frentes marcadamente estreitas. A realização destes edifícios exige mão-de-obra com alguma especialização resultando em construção de qualidade média, [Amaral & Aguilar, 2005].

Por outro lado, as casas burguesas portuenses do século XIX apresentam algumas características construtivas que fazem lembrar as dos edifícios Gaioleiros, nomeadamente a alvenaria de pedra nas paredes resistentes com espessura variável em altura. À semelhança do que foi atrás referido, as paredes de compartimentação destes edifícios, realizadas normalmente em tabique, desempenham um papel fundamental no travamento geral da estrutura para forças horizontais.

No centro histórico do Porto estes edifícios estão integrados numa designada macro-estrutura, constituída por uma correnteza de casas contíguas, que partilham paredes de carga (meeiras), sendo travadas pelas fachadas e por elementos horizontais de madeira, orientados na direcção do menor vão (ver figura 5.10 centro e direita) [Amaral & Aguilar, 2005].



Fotografias do centro e direita em Amaral & Aguilar, 2005

*Figura 5.10 – Exemplo de edifícios antigos na região Norte do território continental; esquerda: edifícios localizados em Guimarães; centro: correnteza de edifícios no centro histórico do Porto; direita: estrutura de prédios geminados [Amaral & Aguilar, 2005]; classificados nos Censos 2001 como ASP.*

### 5.2.3. Edifícios de alvenaria com elementos de betão armado

#### *Edifícios «de placa»*

Em 1930, o Regulamento Geral de Construção Urbana para a cidade de Lisboa (Postura camarária aprovada a 28 de Agosto de 1930), aconselha o emprego de elementos de betão armado para garantir o travamento das alvenarias quando não é empregue a armação de madeira (gaiola). O artigo 59º deste regulamento referia que «em todos os prédios de mais de 2 pisos, incluindo caves, cujos pavimentos não sejam em betão armado, devem ser construídas cintas com este material em todos os andares, entre o nível das vergas das janelas e o piso do pavimento imediatamente superior».

O Regulamento mencionado deverá retratar os processos construtivos praticados na época, assinalando o término de um ciclo de cerca de 180 anos em que se aplicaram as soluções Pombalinas, se presenciou a sua decadência gradual até aos edifícios Gaioleiros e se iniciou o emprego progressivo de elementos de betão armado [Appleton, 1991 e Farinha, 1955].

Esta data coincide assim com o início de um período de transição entre os edifícios de alvenaria e os de betão armado, individualizando-se uma quarta tipologia de edifícios nos centros urbanos [Silva & Soares, 1996]: *edifícios «de placa»*, também designados de *edifícios mistos de alvenaria e betão armado* [Oliveira et al., 1985].

Os edifícios «de placa», característicos do período construtivo do Estado Novo, nas décadas de 30 e 40 do século XX, (ver figura 5.11), são constituídos por paredes exteriores de alvenaria de pedra, de qualidade razoável, paredes interiores de alvenaria de tijolo e recorrem a lajes maciças de betão armado.



*Figura 5.11 – Exemplo de edifícios de «placa»; da esquerda para a direita: edifícios localizados em Lisboa, Alcobaca e Nazaré, respectivamente; classificados nos Censos 2001 como ACP; da esquerda para a direita: edifícios das classes 5 a 7 pavimentos, 4 pavimentos e 3 pavimentos, respectivamente; os edifícios no centro e à direita possuem R/C com espaço interior amplo na sua maior parte.*

As lajes dos edifícios «*de placa*» comportam-se como diafragmas rígidos, assegurando um bom travamento horizontal, sendo a principal deficiência apontada a este tipo de edifícios a insuficiência de elementos verticais resistentes ao corte e à flexão [Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1996].

Na cidade de Lisboa, este tipo de edifícios predomina nos bairros de Alvalade, Arco do Cego, Alameda D. Afonso Henriques, Areiro, Encarnação, etc. [Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1996].

### ***Edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada***

Em meados do século XX, a evolução dos edifícios de médio e grande porte conduziu à extensão do uso do betão armado à totalidade da estrutura, tal como se descreverá na secção 5.2.4.

Por outro lado, os edifícios de pequeno porte são fundamentalmente construídos em alvenaria, tendo-se divulgado a utilização de materiais industriais, como o tijolo cerâmico industrial, a alvenaria de blocos de betão, que substituíram, mesmo em zonas rurais, os materiais naturais e pouco transformados originários da região [Appleton, 1991].

Actualmente, não foram revogados os artigos do RSCCS [1958] que se referem a este tipo de estruturas, designadamente os seus artigos 10º e 21º que dispensam o dimensionamento para as acções sísmicas de alguns edifícios de pequeno porte, preconizando, em alternativa, regras de construção simples aplicáveis a alguns casos. O reconhecimento de que tais artigos estavam tecnicamente desactualizados conduziu o LNEC a apresentar, em 1990, regras práticas para a verificação da segurança em relação à acção dos sismos de edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada [Carvalho & Oliveira, 1999].

Os edifícios de pequeno porte de alvenaria, com elementos de confinamento em betão armado (ver figura 5.12), correspondem a um tipo de construção que, na actualidade, é praticado com frequência de norte a sul de Portugal Continental.



*Figura 5.12 – Exemplo de edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada no concelho de Anadia; classificados nos Censos 2001 como ACP com 2 pavimentos; esquerda: edifício da época 1945-60 ou 1961-70; direita: edifício posterior a 2001.*

Segundo Carvalho & Oliveira [1999] os tipos mais comuns de pavimentos utilizados neste tipo de construção são as lajes de betão armado maciças ou aligeiradas e as lajes incorporando elementos pré-fabricados (vigotas ou pranchas pré-esforçadas e blocos cerâmicos ou de betão. As coberturas são normalmente em telhado com asnas de madeira e telhas assentes sobre ripas e, em construção mais recente, utilizam-se vigotas pré-fabricadas de betão.

O sistema estrutural das construções de alvenaria de pequeno porte confere-lhe normalmente grande rigidez, sendo composto essencialmente por paredes resistentes ortogonais em alvenaria, com alguns elementos de confinamento em betão armado horizontais e verticais, que em conjunto com os pavimentos e a cobertura deverão transmitir às fundações as cargas verticais e as forças de inércia horizontais induzidas por um sismo [Carvalho & Oliveira, 1999 e Coelho, 2003].

A condição essencial para que este tipo de edifícios não exiba grande vulnerabilidade à acção dos sismos são as boas ligações entre os seus elementos, para garantir que se mantenham solidários quando actuados pela vibração. Carvalho & Oliveira [1999] recomendam a introdução dos referidos elementos de travamento em betão armado, verticais (montantes) e horizontais (lintéis) e de reforços em torno das aberturas nas paredes, ressaltando, mais uma vez, a necessidade de assegurar uma boa solidarização entre os panos de alvenaria e os elementos de betão armado.

São assinalados outros factores que contribuem para diminuir a capacidade deste tipo de construções resistirem a sismos, nomeadamente a fraca qualidade das alvenarias, deficiências nas fundações, deficiências de construção dos elementos de betão armado, a existência de irregularidades em planta e altura, alterações na estrutura deficientemente projectadas, etc. [Carvalho & Oliveira, 1999 e Coelho, 2003].

#### **5.2.4. Edifícios com estrutura de betão armado**

Os regulamentos sismo-resistentes desempenham um papel fundamental na evolução dos edifícios de betão armado, identificando-se três grandes grupos de edifícios, (i) os anteriores aos regulamentos sismo-resistentes, (ii) os posteriores ao RSCCS [1958] e anteriores ao RSA [1983] e (iii) os edifícios posteriores ao RSA [1983].

##### ***Edifícios de BA anteriores aos regulamentos***

O aparecimento de sistemas estruturais de betão armado aplicados ao parque habitacional de Portugal, remonta às décadas de 30 e 40 do século XX, passando a ter expressão significativa apenas na década de 50.

A afirmação dos sistemas construtivos de betão armado, além de promoverem o abandono progressivo das técnicas tradicionais ligadas aos materiais da região, conduziu à

substituição destas técnicas por soluções construtivas marcadas por grande uniformidade de norte a sul do Continente.

Assim, a década de 50 do século XX, é caracterizada por edifícios em pórtico de betão armado, preenchidos com grande percentagem de alvenaria de tijolo furado, nas paredes exteriores, e divisórias interiores, e com pavimentos constituídos por lajes maciças de betão armado [Oliveira *et al.*, 1985]. Estes edifícios, não sendo dimensionados para resistir a sismos, serão em geral mais vulneráveis que os seus sucessores, mas, devido à configuração monolítica da sua estrutura, serão menos vulneráveis que os «de placa».

### ***Edifícios de BA posteriores ao RSCCS e anteriores ao RSA***

Nas épocas mais recentes, mais concretamente desde a entrada em vigor do primeiro regulamento sismo-resistente [RSCCS, 1958], a localização geográfica dos edifícios obriga a diferentes disposições de dimensionamento, sendo imposta uma resistência crescente, grosso modo do norte para o sul do território Continental, mais concretamente segundo as zonas sísmicas regulamentares. Assim se tenta assegurar uma situação de igual risco para todos os habitantes do território continental em conformidade com o aumento da perigosidade sísmica também do norte para o sul desse território (ver capítulo 3).

O aumento da altura dos edifícios e o cumprimento das exigências de segurança regulamentares em relação aos sismos conduziu à utilização de elementos verticais de grande rigidez, generalizados pelas caixas de escada e de elevadores [Oliveira *et al.*, 1985].

Deste modo, para além das estruturas em pórtico constituídas por pilares, vigas e lajes, surgem as paredes resistentes ligadas a pisos, formados por vigas e lajes, e as estruturas mistas que associam pórticos e paredes resistentes [Coelho, 2003].

De uma forma simples, um dos factores que distingue os edifícios de betão armado construídos durante o período de vigência do RSCCS [1958] (figura 5.13 à esquerda) dos construídos depois da entrada em vigor do RSA [1983] (figura 5.13 ao centro e à direita), é que os primeiros são dimensionados por forma a resistirem a esforços horizontais menores do que os prescritos no RSA. Efectivamente, reconhece-se, actualmente, que os níveis da acção sísmica recomendados no RSCCS são baixos, face à sismicidade potencial de algumas zonas de Portugal Continental.

### ***Edifícios de BA posteriores ao RSA***

Consequentemente, no regulamento actual, os valores dos coeficientes sísmicos de projecto são superiores aos do RSCCS, obrigando a uma maior resistência dos edifícios.

Além disso, o RSA introduz a possibilidade de dimensionamento «em ductilidade» introduzindo um maior grau de exigência ao nível da pormenorização das armaduras longitudinais e principalmente da cintagem nas zonas críticas [Gomes & Brito, 1996].



Figura 5.13 – Exemplo de edifícios de BA; esquerda: prédio da época 1961-70 localizado em Alcobaça; centro: estrutura em pórtico posterior a 2001, localizada em Lisboa; direita: estrutura mista pórtico parede, com lajes fungiformes, posterior a 2001, situada em Lisboa.

O comprimento dos varões das armaduras longitudinais também sofreu um acréscimo no novo regulamento para assegurar uma ancoragem adequada, particularmente nos nós viga-pilar, melhorando assim a ductilidade global das estruturas.

As regras de dimensionamento mais recentes [RSA, 1983 e CEN, 2004] determinam ainda que nas estruturas em pórtico a resistência dos pilares seja superior à das vigas que com eles se cruzam, por forma a assegurar que quando da ocorrência de um sismo os pilares não rompam antes das vigas, comprometendo assim a estabilidade global da estrutura [Coelho, 2003].

Finalmente, na década de 90 do século XX generalizou-se o uso de novos sistemas estruturais baseados em soluções adoptadas no norte da Europa, nomeadamente o emprego de lajes fungiformes na construção dos edifícios de betão armado (figura 5.13 à direita). O estudo do comportamento sísmico deste tipo de estruturas não está ainda muito desenvolvido, sendo alvo de projectos de investigação iniciados recentemente [Coelho *et al.*, 2004a e Coelho *et al.*, 2004b] e não estando ainda incluído de forma completa e explícita na actual regulamentação.

### 5.3. Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional

#### 5.3.1. Tipologias Censos 2001

No capítulo 4 foram apresentadas e analisadas as estatísticas e a distribuição geográfica do parque habitacional de Portugal Continental, à data dos Censos 2001, para fundamentar a sua caracterização em termos de vulnerabilidade à acção sísmica.

O quadro 5.2 condensa toda a informação apurada nos Censos 2001, mostrando os quantitativos de edifícios obtidos dos cruzamentos dos factores de vulnerabilidade analisados. Foram contempladas 9 modalidades de época de construção, por 7 classes de número de pavimentos e por 5 tipos de estrutura, em suma, estava teoricamente previsto serem apurados nos Censos 2001 os quantitativos de 315 tipologias, que se chamaram *tipologias Censos 2001*.

Porém, algumas destas tipologias não possuem existências no parque habitacional de Portugal Continental, sendo assinaladas pelo fundo cinzento das respectivas células, tendo como consequência a redução do número de tipologias representadas nos Censos 2001 de 315 para 221.

A utilização dos factores de vulnerabilidade identificados nos Censos 2001 para traduzir as técnicas construtivas com maior representatividade no parque habitacional do País apresentou algumas dificuldades pois, naturalmente, os recenseamentos da habitação não estão directamente vocacionados para serem utilizados em estudos de caracterização da vulnerabilidade sísmica.

Por exemplo, as modalidades mais antigas da variável *Época de construção* («Antes de 1919» e «De 1919 a 1945») não se adequam aos principais períodos históricos construtivos nacionais identificados na secção 5.2.

Também as modalidades da variável *Tipo de estrutura* dos Censos 2001, se bem que bastante mais próximas dos processos construtivos utilizados no País do que as modalidades da variável *Elementos resistentes* dos Censos anteriores (eg. os Censos 91), fornecem informação necessariamente generalista, não traduzindo integralmente as soluções estruturais utilizadas no nosso território ao longo do tempo.

Acresce que os recenseadores deverão ter tido algumas dúvidas sobre a classificação do tipo de estrutura dos edifícios. Talvez por isso o quadro 5.2 exiba alguns valores surpreendentes, designadamente a existência de 333 edifícios de Paredes de alvenaria argamassada, sem placa, posteriores a 1960 e com mais de 4 pavimentos. É provável que apuramentos deste tipo correspondam a uma classificação errada do tipo de estrutura dos edifícios, do número de pavimentos dos mesmos, ou ainda da sua época de construção, constituindo contudo números irrelevantes face aos quantitativos apurados.

Nas secções seguintes far-se-á a classificação desta vulnerabilidade sísmica conforme os critérios subjacentes aos modelos de danos aplicados neste estudo.

Quadro 5.2 - Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001).

Época	Nº pavimentos	Betão	ACP	ASP	ATAPS	Outros
Antes de 1919	1	0	0	51 216	74 859	918
	2	0	0	49 290	45 294	834
	3	0	0	8 257	4 627	99
	4	0	54	3 588	0	33
	5 a 7	0	8	1 434	0	17
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
<b>Total = 240 528</b>	<b>0</b>	<b>62</b>	<b>113 785</b>	<b>124 780</b>	<b>1 901</b>	
1919 a 1945	1	12 659	34 763	73 782	61 185	841
	2	7 732	28 882	51 566	27 852	664
	3	1 842	5 274	7 709	2 623	84
	4	776	1 448	2 263	0	23
	5 a 7	636	1 656	894	0	6
	8 a 15	232	0	0	0	2
	+ de 15	0	0	0	0	0
<b>Total = 325 394</b>	<b>23 877</b>	<b>72 023</b>	<b>136 214</b>	<b>91 660</b>	<b>1 620</b>	
1946 a 1960	1	24 277	56 209	65 409	35 055	781
	2	19 219	46 337	41 998	15 999	385
	3	5 687	7 907	4 517	1 443	67
	4	3 864	2 661	1 158	0	11
	5 a 7	2 699	1 780	322	0	5
	8 a 15	792	0	0	0	1
	+ de 15	0	0	0	0	0
<b>Total = 338 583</b>	<b>56 538</b>	<b>114 894</b>	<b>113 404</b>	<b>52 497</b>	<b>1 250</b>	
1961 a 1970	1	44 074	81 122	38 225	12 961	818
	2	42 974	75 985	26 266	7 703	327
	3	11 795	11 245	2 518	709	68
	4	8 483	2 916	499	0	11
	5 a 7	6 474	1 756	108	0	3
	8 a 15	2 242	0	0	0	0
	+ de 15	87	0	0	0	1
<b>Total = 379 370</b>	<b>116 129</b>	<b>173 024</b>	<b>67 616</b>	<b>21 373</b>	<b>1 228</b>	
1971 a 1980	1	63 927	106 048	23 909	7 846	3 135
	2	86 592	141 423	15 992	5 574	442
	3	22 408	22 572	1 721	629	53
	4	10 495	3 693	329	0	13
	5 a 7	9 454	1 781	90	0	5
	8 a 15	3 814	0	0	0	1
	+ de 15	179	0	0	0	2
<b>Total = 532 127</b>	<b>196 869</b>	<b>275 517</b>	<b>42 041</b>	<b>14 049</b>	<b>3 651</b>	
1981 a 1985	1	38 850	59 432	10 018	3 992	1 047
	2	66 419	93 422	5 920	2 692	210
	3	18 919	17 739	678	343	49
	4	5 957	2 168	131	0	10
	5 a 7	6 340	1 241	29	0	3
	8 a 15	2 282	0	0	0	4
	+ de 15	110	0	0	0	0
<b>Total = 338 005</b>	<b>138 877</b>	<b>174 002</b>	<b>16 776</b>	<b>7 027</b>	<b>1 323</b>	
1986 a 1990	1	31 371	45 298	6 633	3 564	562
	2	55 185	71 590	4 002	2 213	176
	3	17 939	14 954	509	323	15
	4	6 386	2 071	104	0	1
	5 a 7	6 988	1 196	23	0	1
	8 a 15	2 574	0	0	0	1
	+ de 15	91	0	0	0	0
<b>Total = 273 770</b>	<b>120 534</b>	<b>135 109</b>	<b>11 271</b>	<b>6 100</b>	<b>756</b>	
1991 a 1995	1	28 049	43 378	5 998	4 192	635
	2	50 913	67 227	4 059	2 661	177
	3	18 367	14 921	557	375	22
	4	6 458	2 004	125	0	4
	5 a 7	7 963	1 423	36	0	3
	8 a 15	3 053	0	0	0	0
	+ de 15	90	0	0	0	0
<b>Total = 262 690</b>	<b>114 893</b>	<b>128 953</b>	<b>10 775</b>	<b>7 228</b>	<b>841</b>	
1996 a 2001	1	31 206	46 115	6 085	5 231	474
	2	61 761	76 154	4 151	3 610	230
	3	24 548	17 778	634	561	48
	4	9 107	2 716	171	0	4
	5 a 7	11 050	1 542	47	0	5
	8 a 15	3 815	0	0	0	1
	+ de 15	148	0	0	0	0
<b>Total = 307 192</b>	<b>141 635</b>	<b>144 305</b>	<b>11 088</b>	<b>9 402</b>	<b>762</b>	
<b>Total = 2 997 659</b>	<b>Tipo de estrutura</b>	<b>909 352</b>	<b>1 217 889</b>	<b>522 970</b>	<b>334 116</b>	<b>13 332</b>
<b>1 pavimento</b>	<b>2 pavimentos</b>	<b>3 pavimentos</b>	<b>4 pavimentos</b>	<b>5 a 7 pavimentos</b>	<b>8 a 15 pavimentos</b>	<b>+ de 15 pavimentos</b>
<b>1 246 149</b>	<b>1 312 102</b>	<b>273 133</b>	<b>79 735</b>	<b>67 018</b>	<b>18 814</b>	<b>708</b>

### 5.3.2. Tipologias FEMA & NIBS

Em trabalho anteriores efectuou-se uma primeira classificação das tipologias do parque habitacional de Portugal Continental apurado nos Censos 91 [Carvalho *et al.*, 2001c; Carvalho *et al.*, 2002a e Carvalho *et al.*, 2002b], com vista a caracterizar a sua vulnerabilidade à acção sísmica, seguindo os critérios da metodologia FEMA & NIBS.

Procede-se agora à adaptação dessa classificação efectuada sobre os apuramentos dos Censos 91 ao inventário disponibilizado pelos Censos 2001.

Desta forma, à semelhança da classificação realizada para os Censos 91 foram estabelecidas sete grandes classes de vulnerabilidade com base em dois factores de vulnerabilidade: *época de construção* e *tipo de estrutura*. Estas sete grandes classes são representadas pelas cores que ilustram o quadro 5.3.

Como a altura dos edifícios influencia a resposta sísmica dos mesmos, cada uma das sete classes foi ainda subdividida noutras sete, recorrendo-se ao terceiro factor de vulnerabilidade, o *número de pavimentos*, originando 49 tipologias diferentes apresentadas no quadro 5.3, designadas de *tipologias FEMA & NIBS*. Onze destas tipologias não têm representatividade no parque habitacional de Portugal Continental apurado nos Censos 2001, pelo que as 49 tipologias originais se reduzem a 38.

Grosso modo, as tipologias FEMA & NIBS enquadram-se em quatro classes de vulnerabilidade de estruturas de alvenaria, «ATAPS + Outros», «Alvenaria ≤ 1960», «Alvenaria 1961-85» e «Alvenaria 1986-01» e em três classes de vulnerabilidade de estruturas de betão, repartidas por grandes épocas de construção idênticas às da alvenaria, «BA ≤ 1960», «BA 1961-85» e «BA 1986-01». A estas classes, e seguindo a sequência apresentada no parágrafo anterior, correspondem as tipologias de alvenaria numeradas no quadro 5.3 de 1 a 5, 8 a 12, 15 a 18 e 22 a 25 e as de betão numeradas de 29 a 34, 36 a 42 e 43 a 49. As células cinzentas do quadro 5.3 assinalam as tipologias que não existem no parque, não se encontrando por isso identificadas, embora a numeração se tenha mantido sequencial, de 1 a 49.

Na figura 5.14 exhibe-se a distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas principais classes de vulnerabilidade das tipologias FEMA & NIBS.

No quadro 5.4 reúnem-se os mesmos quantitativos de edifícios que constam da figura 5.14, mas discriminados, adicionalmente, pelo número de pavimentos.

Importa sublinhar que a classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional mostrada no quadro 5.3 obrigou à formulação de uma série de hipóteses e à eleição de determinadas opções, decorrentes das dificuldades ou condicionamentos mencionados na secção 5.3.1 e do conhecimento da evolução histórica dos materiais e tecnologias de construção resumida na secção 5.2.

Quadro 5.3 – Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias FEMA & NIBS.

Época	Nº de pav.	Tip.	Betão	Tip.	ACP	Tip.	ASP	Tip.	ATAPS	Tip.	Outros
Antes de 1919	1					1		1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2					2		2		2	
	3					3	ATAPS + Outros	3		3	
	4			11	Alvenaria ≤ 1960	4		4		4	
	5 a 7			12		5		5		5	
8 a 15 + de 15											
1919 a 1945	1	29	BA ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	30		9		9		2		2	
	3	31		10		10		3		3	
	4	32		11		11				4	
	5 a 7	33		12		12				5	
8 a 15 + de 15	34							48	BA 1986-01		
1946 a 1961	1	29	BA ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	30		9		9		2		2	
	3	31		10		10		3		3	
	4	32		11		11				4	
	5 a 7	33		12		12				5	
8 a 15 + de 15	34							48	BA 1986-01		
1961 a 1970	1	36	BA 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	37		16		16		2		2	
	3	38		17		17		3		3	
	4	39		18		18				46	
	5 a 7	40		40		40		BA 1961-85		47	
8 a 15 + de 15	41						49	BA 1986-01			
1971 a 1980	1	36	BA 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	37		16		16		2		2	
	3	38		17		17		3		3	
	4	39		18		18				46	
	5 a 7	40		40		40		BA 1961-85		47	
8 a 15 + de 15	41						48				
1981 a 1985	1	36	BA 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	37		16		16		2		2	
	3	38		17		17		3		3	
	4	39		18		18				46	
	5 a 7	40		40		40		BA 1961-85		47	
8 a 15 + de 15	41						48				
1986 a 1990	1	43	BA 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	44		23		23		2		2	
	3	45		24		24		3		3	
	4	46		25		25				46	
	5 a 7	47		47		47		BA 1986-01		47	
8 a 15 + de 15	48						48				
1991 a 1995	1	43	BA 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	44		23		23		2		2	
	3	45		24		24		3		3	
	4	46		25		25				46	
	5 a 7	47		47		47		BA 1986-01		47	
8 a 15 + de 15	48						47				
1996 a 2001	1	43	BA 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros
	2	44		23		23		2		2	
	3	45		24		24		3		3	
	4	46		25		25				46	
	5 a 7	47		47		47		BA 1986-01		47	
8 a 15 + de 15	48						48				
Classes de vulnerabilidade				ATAPS + Outros	Alv. ≤ 1960	Alv. 1961-85	Alv. 1986-01	BA ≤ 1960	BA 1961-85	BA 1986-01	

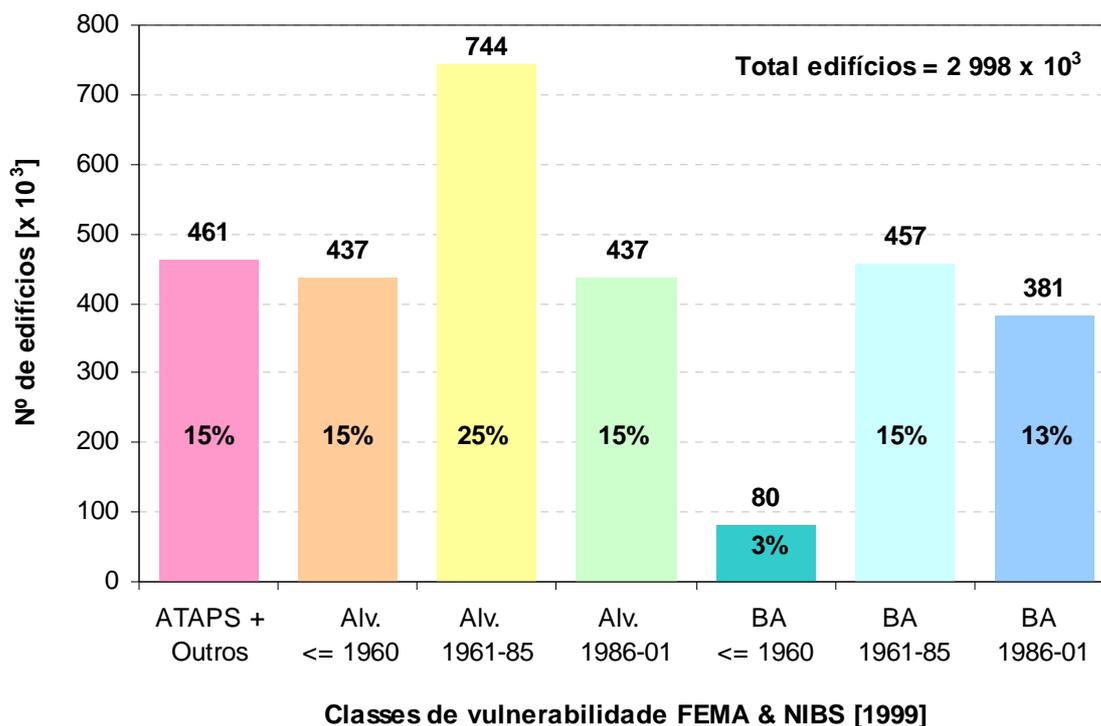


Figura 5.14 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade FEMA & NIBS.

Quadro 5.4 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas tipologias FEMA & NIBS e número de pavimentos.

Nº pav.	Tipologias FEMA & NIBS						
	ATAPS + Outros	Alvenaria ≤ 1960	Alvenaria 1961-85	Alvenaria 1986-01	BA ≤ 1960	BA 1961-85	BA 1986-01
1	269 312	230 163	318 754	153 507	36 936	146 851	90 626
2	166 333	168 783	359 008	227 183	26 951	195 985	167 859
3	20 395	25 407	56 473	49 353	7 529	53 122	60 854
4	3 655	7 584	9 736	7 191	4 640	24 935	21 994
5-7	1 462	4 660	0	0	3 335	27 273	30 288
7-15	0	0	0	0	1 024	8 338	9 452
+15	0	0	0	0	0	376	332
<b>Total</b>	<b>461 157</b>	<b>436 597</b>	<b>743 971</b>	<b>437 234</b>	<b>80 415</b>	<b>456 880</b>	<b>381 405</b>

Desta forma, os edifícios com o tipo de estrutura de Betão foram divididos em três classes de vulnerabilidade: (i) edifícios de betão armado construídos até 1960, representativos do período do advento deste material; (ii) edifícios de betão armado não dúctil construídos entre 1960 e 1985, durante a vigência do primeiro regulamento sismo-resistente português [RSCCS, 1958] e, por fim, (iii) os edifícios de betão armado dúctil, construídos depois de 1985, e obrigados teoricamente a cumprirem as disposições construtivas do regulamento actual [RSA, 1983].

O pressuposto assumido no último parágrafo constitui uma das hipóteses simplificadoras adoptadas nesta classificação, ou seja, a de que existe coerência entre o nível de resistência das estruturas projectadas e construídas durante a vigência de um dado regulamento sismo-resistente português e as disposições preconizadas nesses regulamentos.

Como na metodologia FEMA & NIBS o coeficiente sísmico basal,  $C_s$ , tal como ele é considerado no dimensionamento estrutural dos edifícios, é um dos parâmetros utilizados para classificar a vulnerabilidade dos edifícios, os edifícios de betão armado, construídos durante a vigência do RSCCS [1958] e do RSA [1983], poderão facilmente ser subdivididos em três e quatro tipologias estruturais diferentes, uma vez que estes regulamentos contemplam, respectivamente, três e quatro zonas com coeficientes sísmicos e com coeficientes de sismicidade distintos.

Assim, a contabilização do número de tipologias estruturais efectuada no quadro 5.3 é válida para uma única zona sísmica destes dois regulamentos. Para considerar as variações geográficas subjacentes aos regulamentos é necessário contemplar mais duas classes de vulnerabilidade de tipologias de betão para agrupar os edifícios das três zonas sísmicas do RSCCS e mais outras três classes para os edifícios das quatro zonas sísmicas do RSA, pelo que se somarão 35 novas tipologias às 49 teoricamente existentes, perfazendo um total de 84 tipologias FEMA & NIBS. Entre estas 35 tipologias adicionais não foi investigado se algumas não têm expressão no parque habitacional de Portugal Continental.

Admitiu-se também, que os únicos edifícios que não sofreram alterações substanciais nos seus processos construtivos ao longo do tempo foram os do tipo de estrutura ATAPS, que foram classificados numa única classe de vulnerabilidade FEMA & NIBS para todas as nove modalidades das suas épocas de construção.

Por outro lado, a classificação da vulnerabilidade dos edifícios enquadrado na classe Outros é uma tarefa subjectiva, pelo que se optou por uma posição conservadora associando estes edifícios aos mais vulneráveis do parque habitacional, ou seja, aos edifícios com Paredes de adobe, taipa ou alvenaria de pedra solta, constituindo-se assim a classe de vulnerabilidade FEMA & NIBS «ATAPS + Outros». Supôs-se também que os edifícios com tipo de estrutura Outros e número de pisos mais elevado teriam estrutura metálica. No entanto, o número de edifícios de habitação assim identificados é ínfimo, representando cerca de 0,003% (76 edifícios) do parque habitacional, não justificando por isso a individualização de uma classe de vulnerabilidade FEMA & NIBS, tendo sido agrupados à classe de vulnerabilidade «BA

1986-01», o que nas épocas de construção mais antigas corresponderá a uma abordagem excessivamente optimista. No entanto, são apenas 3 os edifícios com data de construção anterior a 1960 pertencentes a esta classe, pelo que os resultados não serão certamente afectados por esta opção.

Sobre as tipologias de alvenaria pressupôs-se que depois de 1960 os elementos resistentes dos edifícios de 5 ou mais pavimentos seriam de facto de betão armado, pelo que se enquadraram estas tipologias nas classes de vulnerabilidade de betão armado da época correspondente.

Finalmente, na figura 5.17 ilustra-se a distribuição geográfica da vulnerabilidade sísmica dos edifícios do parque habitacional do Continente, apresentando, por freguesia, a percentagem de edifícios em cada classe de vulnerabilidade FEMA & NIBS.

Da análise desta figura conclui-se que a classe de vulnerabilidade «ATAPS + Outros» exhibe uma grande incidência no Baixo Alentejo e sul do Alentejo Litoral (ver anexo A), onde existem freguesias em que a percentagem de edifícios desta classe é superior a 90%. Por exemplo, as freguesias de Albernoa, São Marcos da Ataboeira e Alqueva, localizadas as duas primeiras no distrito de Beja e a última no distrito de Évora, possuem, respectivamente, uma percentagem de 96, 93 e 90% de edifícios desta classe de vulnerabilidade.

Já relativamente à classe de «Alvenaria  $\leq$  1960» verifica-se uma distribuição aproximadamente uniforme por todo o território, com percentagens ente 0 e 20%, embora se observe uma maior concentração no Alto Alentejo (20 a 40%). No que toca à classe de «Alvenaria 1961-85» verifica-se que tem uma menor incidência nas freguesias do Alentejo e Algarve (0 a 30%) do que no resto do Continente (10 a 50%).

Sobre a classe de «Alvenaria 1986-01» observa-se que não ocorre a concentração destes edifícios em nenhuma região particular do Continente, variando a percentagem de incidência entre 0 e 40%.

A percentagem reduzida em todas as freguesias do território Continental dos edifícios da classe de «Betão  $\leq$  1960» (0 a 10%) confirma o já apurado na figura 5.14, em que se constatou que esta classe representa apenas 3% das existências do parque habitacional do Continente.

Quanto às classes de «Betão 1961-85» e de «Betão 1986-01» observa-se que apresentam uma distribuição geográfica semelhante, esparsa nas freguesias do Alentejo e com maior incidência (20 a 40%) nas freguesias da Área Metropolitana de Lisboa e concelhos limítrofes.

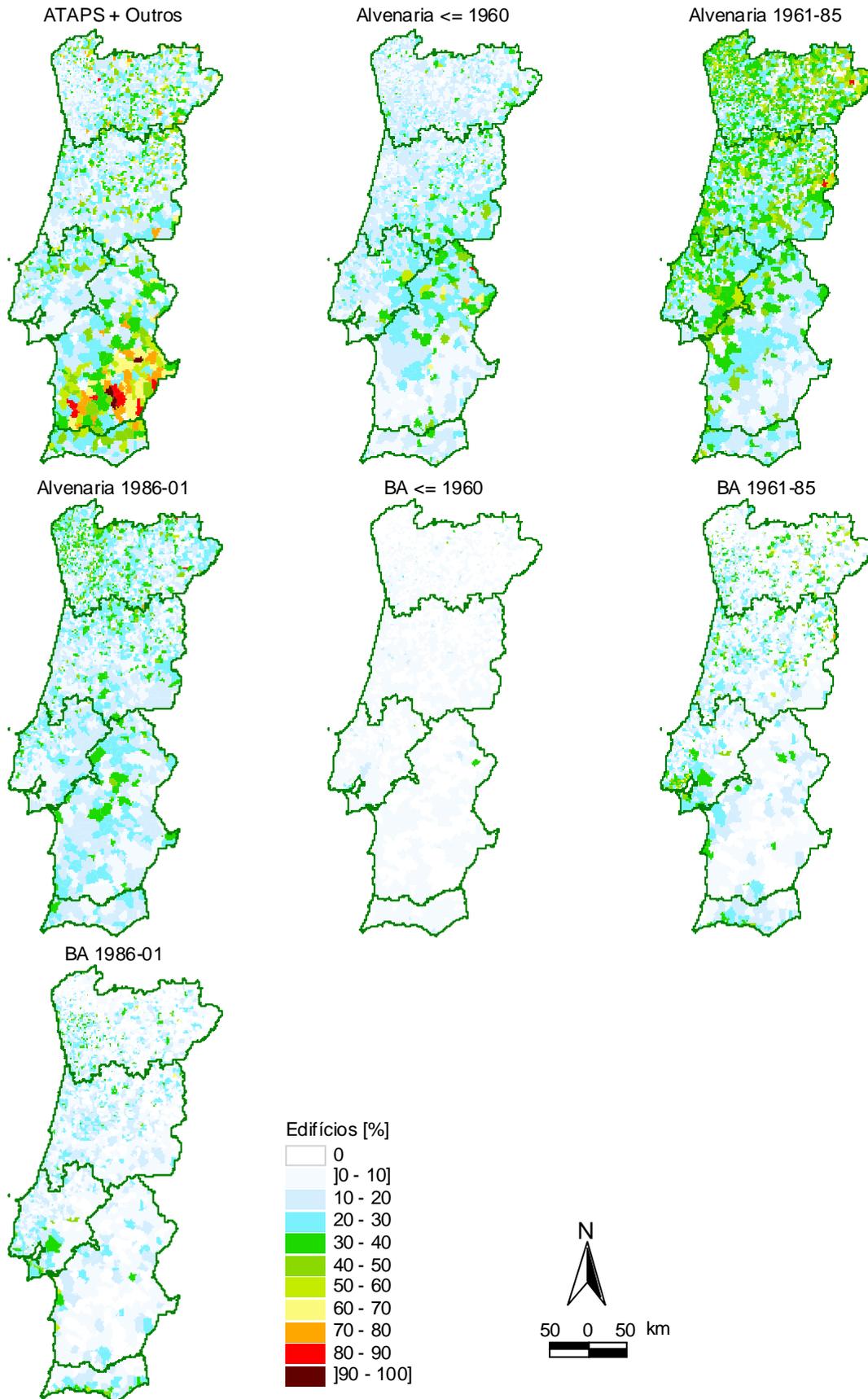


Figura 5.15 – Mapas de vulnerabilidade sísmica do Continente de acordo com a classificação FEMA & NIBS.

### 5.3.3. Tipologias EMS-98

A utilização do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino requer a classificação do parque habitacional de Portugal Continental de acordo com os critérios de vulnerabilidade da escala macrossísmica Europeia, EMS-98 [Grüntal, 1998] abordados na secção 2.4.4.1.

O quadro 5.5 mostra a classificação das tipologias Censos 2001 nos tipos de estruturas de edifícios existentes na escala EM-98, designadas de *tipologias EMS-98*. As cores que ilustram este quadro identificam as cinco classes de vulnerabilidade mais prováveis dos tipos de estrutura da EMS-98. Na figura 5.16 exhibe-se a distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade mais prováveis da escala EM-98.

O *número de pavimentos* é um dos factores de vulnerabilidade considerados na metodologia de avaliação de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. Para adequar a classificação tipológica do quadro 5.5 a este modelo de danos condensaram-se as sete categorias de número de pavimentos dos Censos 2001 numa quantidade mais reduzida, conforme se especifica no quadro 5.6. Tendo em consideração estas novas categorias de número de pavimentos e sabendo que algumas tipologias não têm representatividade no parque habitacional de Portugal Continental o número de *tipologias EMS-98* foi contabilizado em 27. No quadro 5.7 mostram-se os mesmos quantitativos de edifícios que constam da figura 5.16, discriminados, adicionalmente, pelo número de pavimentos.

Outro factor de vulnerabilidade considerado na metodologia de avaliação de danos de Giovinazzi & Lagomarsino é o *estado de conservação* dos edifícios que apresenta nesta metodologia duas modalidades: Bom ou Mau. Assim, o número de tipologias EMS-98 duplicou, teoricamente, para 54. Não foram contabilizadas quantas tipologias classificadas no estado de conservação Bom e quantas classificadas no estado de conservação Mau têm expressão no parque habitacional de Portugal Continental.

Para se efectuar a classificação do parque reunida no quadro 5.5 tentou seguir-se critérios semelhantes aos adoptados na classificação FEMA & NIBS, com as necessárias adaptações às tipologias EMS-98, que a seguir se justificam. Por exemplo, ao contrário da classificação FEMA & NIBS para os edifícios de betão armado, a classificação EMS-98 não discrimina as variações geográficas da vulnerabilidade subjacentes aos regulamentos. Com efeito, a classificação FEMA & NIBS pode contar com uma medida numérica simples, o coeficiente sísmico basal, para caracterizar a variação geográfica do dimensionamento sismo-resistente do edificado. O mesmo não ocorre com a classificação EMS-98 que, no caso de Portugal, exhibe apenas duas modalidades de dimensionamento sismo-resistente (DSR): (i) o nível mínimo ou a ausência de DSR e (ii) o DSR moderado. O terceiro nível possível, o DSR elevado, exige disposições de ductilidade melhorada que não são correntes em Portugal. Assim se justifica não se variar a classificação da vulnerabilidade para se ter em conta as zonas sísmicas dos regulamentos, pois existem apenas duas categorias disponíveis para classificar o nível de dimensionamento sismo-resistente, justificando-se também que a classe de vulnerabilidade «F» não tenha expressão no parque habitacional de Portugal (ver quadro 2.2).

Quadro 5.5 - Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias EMS-98 e com as classes de vulnerabilidade desta escala.

Época	Nº de pav.	Betão	ACP	ASP	ATAPS	Outros	
Antes de 1919	1			Alvenaria de pedra	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	2						
	3						
	4						
	5 a 7						
1919 a 1945	8 a 15 + de 15	Pórtico BA s/ ou min. DSR	Alv. não reforçada com placa	Alv. não reforçada de tijolo	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	1						
	2						
	3						
	4						
1946 a 1960	5 a 7	Pórtico BA s/ ou min. DSR	Alv. não reforçada com placa	Alv. não reforçada de tijolo	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	8 a 15 + de 15						
	1						
	2						
	3						
1961 a 1970	4	Pórtico BA s/ ou min. DSR	Alv. não reforçada com placa	Alv. não reforçada com placa	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	5 a 7						
	8 a 15 + de 15						
	1						
	2						
1971 a 1980	3	Pórtico BA s/ ou min. DSR	Alv. não reforçada com placa	Alv. não reforçada com placa	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	4						
	5 a 7						
	8 a 15 + de 15						
	1						
1981 a 1985	2	Pórtico BA s/ ou min. DSR	Alv. não reforçada com placa	Alv. não reforçada com placa	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	3						
	4						
	5 a 7						
	8 a 15 + de 15						
1986 a 1990	1	Pórtico BA DSR moderado	Alv. confinada	Alv. confinada	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	2						
	3						
	4						
	5 a 7						
1991 a 1995	8 a 15 + de 15	Pórtico BA DSR moderado	Alv. confinada	Alv. confinada	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	1						
	2						
	3						
	4						
1996 a 2001	5 a 7	Pórtico BA DSR moderado	Alv. confinada	Alv. confinada	Alv. de pedra solta + Adobe	Alv. de pedra solta + Adobe	
	8 a 15 + de 15						
	1						
	2						
	3						
Classes de vulnerabilidade			A	B	C	D	E

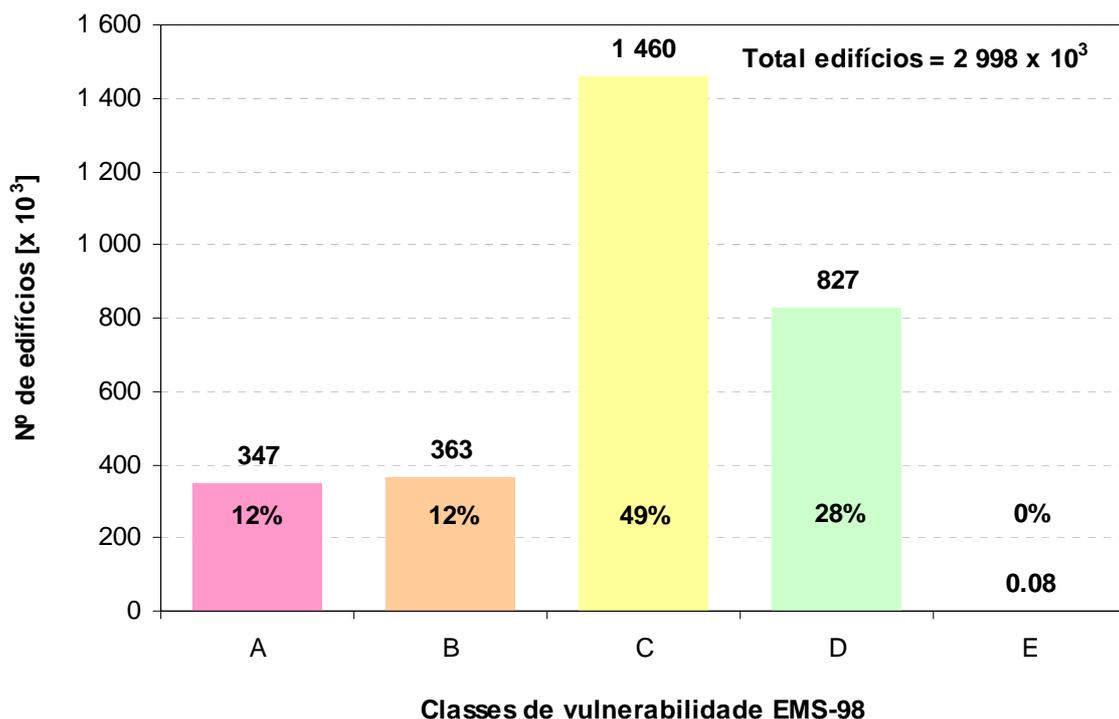


Figura 5.16 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade da escala EM-98.

Quadro 5.6 – Grelha de classificação do número de pavimentos das tipologias EMS-98.

Estrutura	Classes de nº de pavimentos				
	Alvenaria	1 a 2	3 a 4	+ de 4	--
BA	1 a 2	3 a 4	5 a 7	7 a 15	+ de 15

Quadro 5.7 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas tipologias EMS-98 e número de pavimentos.

Nº pav.	Tipologias EMS-98				
	A	B	C	D	E
1 a 2	335 139	333 261	1 250 676	639 175	0
3 a 4	12 205	27492	173 779	139 349	43
5 a 7	28	2 650	34 052	302 68	20
8 a 15	0	0	1 024	17 780	10
+ de 15	0	0	0	705	3
<b>Total</b>	<b>347 372</b>	<b>363 403</b>	<b>1 459 531</b>	<b>827 277</b>	<b>76</b>

Sobre os edifícios com Paredes de alvenaria argamassada sem placa dos Censos 2001 pressupôs-se que depois de 1960, os seus elementos resistentes não seriam de madeira. Assumiu-se assim, que este tipo de estrutura dos Censos 2001 cruzado com o conjunto referido de épocas de construção, possuiria, de facto, paredes de alvenaria com alguns elementos de betão, tendo sido classificado na tipologia estrutural da EMS-98 de Alvenaria não reforçada com placa. Por razões idênticas, depois de 1985, os edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, com e sem placa foram agrupados na tipologia estrutural designada de Alvenaria confinada. Esta tipologia abrange os edifícios de alvenaria de pequeno porte, dispensados de dimensionamento para as acções sísmicas, conforme o disposto nos artigos 10º e 21º do RSCCS [1958].

Os edifícios metálicos têm agora uma classe de vulnerabilidade individualizada embora com uma expressão ínfima no contexto dos apuramentos efectuados nos Censos 2001, ou seja, 76 edifícios.

Na figura 5.17 reúnem-se os mapas de vulnerabilidade sísmica dos edifícios de Portugal Continental traçados, por freguesia, segundo as classes de vulnerabilidade sísmica da EMS-98.

Da análise desta figura conclui-se que a classe de vulnerabilidade «A» apresenta uma distribuição geográfica muito semelhante à classe «ATAPS + Outros» da classificação FEMA & NIBS, ou seja, um grande incidência no Baixo Alentejo e sul do Alentejo Litoral onde existem freguesias em que a percentagem de edifícios desta classe se situa entre os 60 e os 100%.

Também a classe de vulnerabilidade «B» exhibe uma distribuição geográfica idêntica à de «Alvenaria < 1960» da classificação FEMA & NIBS, ou seja, com uma maior concentração de existências nas freguesias do Alto Alentejo, embora se reconheça que, globalmente, a incidência de edifícios na classe «B» é inferior à de «Alvenaria < 1960», o que é confirmado pela percentagem global de 12% no primeiro caso (figura 5.16) e de 15% no segundo (figura 5.14).

Por sua vez, a classe de vulnerabilidade «C» mostra um padrão de alguma forma complementar do apresentado pela classe «A», com baixa concentração de edifícios nas freguesias do Baixo Alentejo e do sul do Alentejo Litoral. Nas restantes freguesias do território a percentagem de edifícios desta classe varia maioritariamente entre 30 e 70%, embora surjam freguesias dispersas com percentagens de edifícios da classe «C» superiores a 80%, designadamente nas NUTS III Grande Lisboa, Península de Setúbal, Beira Interior Norte, Alto-Trás-os-Montes e Minho Lima.

No que toca à classe de vulnerabilidade «D» observa-se que tem uma distribuição aproximadamente uniforme em todo o território, embora se verifique uma maior percentagem de edifícios desta classe (30 a 40%) nas freguesias litorais e nos distritos do Porto e Braga.

Por fim, constata-se que a distribuição geográfica, por freguesia, dos edifícios da classe de vulnerabilidade «E», que inclui os edifícios metálicos, não tem expressão no território Continental, como seria de esperar.

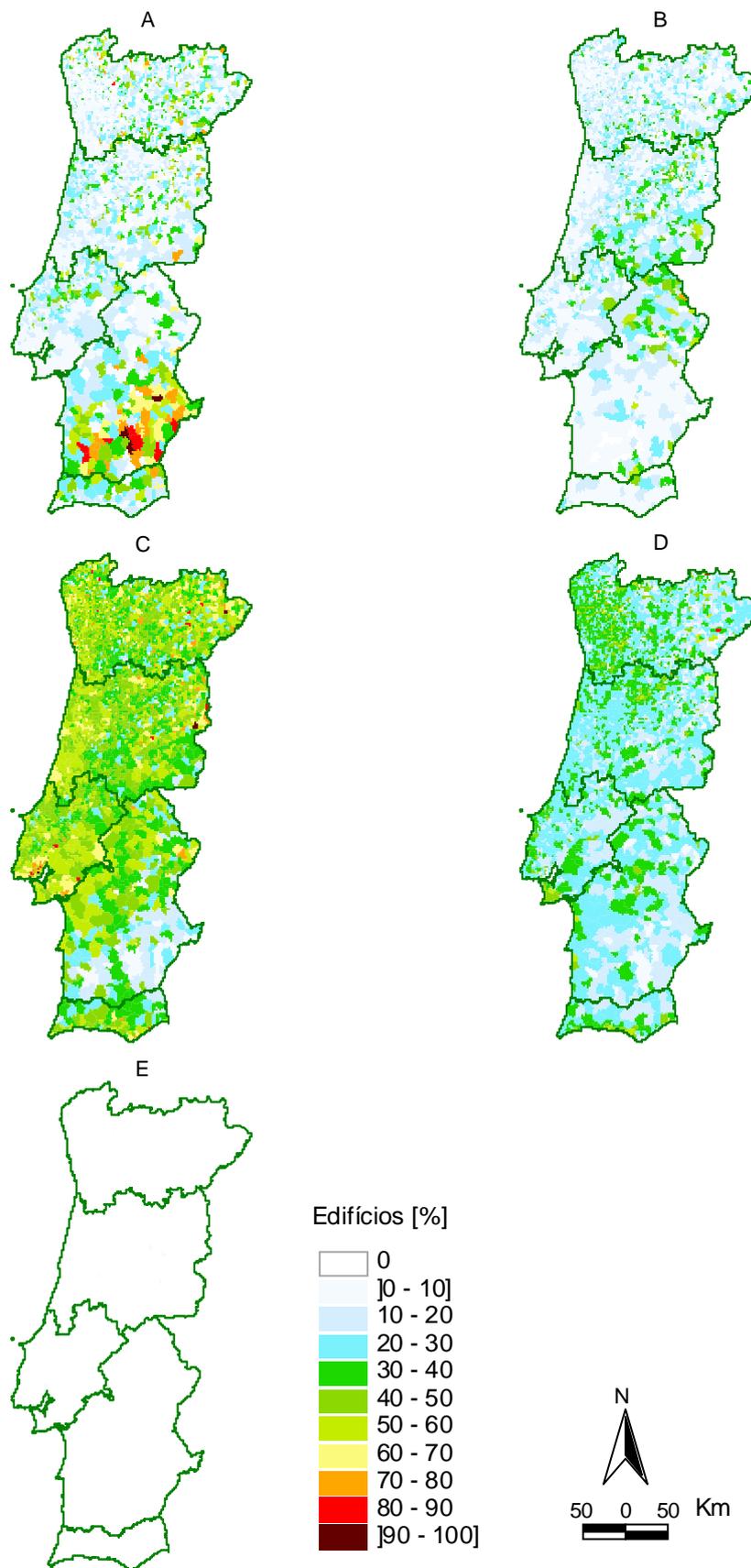


Figura 5.17 – Mapas de vulnerabilidade sísmica do Continente de acordo com a classificação EMS-98.

### 5.3.4. Tipologias MSK

A utilização dos modelos de danos de Di Pasquale & Orsini e de Zuccaro & Papa, requer a classificação do parque habitacional de Portugal Continental em quatro classes de vulnerabilidade adaptadas da escala de intensidades macrossísmica MSK, tal como se descreveu na secção 2.4.4.4.

Mais uma vez se tentou que a classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do Continente, designada de MSK, fosse coerente com as duas classificações anteriores, FEMA & NIBS e EMS-98.

Na classificação agora efectuada surgiu uma dificuldade adicional resultante do facto das escalas de intensidade anteriores à Macrossísmica Europeia de 1992 não contemplarem classes de vulnerabilidade adequadas a edifícios com dimensionamento sismo-resistente. Deste modo, seguindo uma abordagem conservadora, esses edifícios foram incluídos na classe «C2», sabendo-se à partida que se cometerá um erro de sobreavaliação de danos, pois os edifícios projectados para resistir a sismos serão menos vulneráveis do que os da classe «C2».

A classificação da vulnerabilidade sísmica segundo a escala MSK é a mais simplificada entre as aplicadas no presente trabalho, contemplando apenas 4 classes de vulnerabilidade, coincidentes com 4 *tipologias MSK*, uma vez que não é considerada a influência da altura dos edifícios no seu desempenho sísmico.

No entanto, manteve-se o pressuposto, enunciado nas duas classificações anteriores, de que os edifícios de alvenaria com e sem placa, posteriores a 1960 e com número de pavimentos superior ou igual a 5, teriam de facto um sistema estrutural de betão armado, sendo incluídos na classe de vulnerabilidade «C2». A estes devem adicionar-se os edifícios de maior porte que foram classificados com o tipo de estrutura Outros nos Censos 2001.

Assim, o quadro de classificação da vulnerabilidade das tipologias Censos 2001 conforme as classes de vulnerabilidade da escala MSK teria um aspecto semelhante ao quadro 5.5, com as seguintes excepções:

1. Todos os edifícios de Betão armado seriam classificados na classe «C2».
2. Os edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, com e sem placa, posteriores a 1960 e com número de pavimentos superior ou igual a 5, seriam classificados na classe «C2».
3. Os restantes edifícios de alvenaria com placa seriam classificados na classe «C1»
4. Todos os edifícios de alvenaria sem placa posteriores a 1960, excepcionando-se os já mencionados com número de pavimentos superior ou igual a 5, seriam classificados na classe «C1».
5. Os edifícios da classe «E» metálicos seriam classificados na classe «C2».

Na figura 5.18 apresenta-se a distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas quatro classes de vulnerabilidade adaptadas da escala MSK.

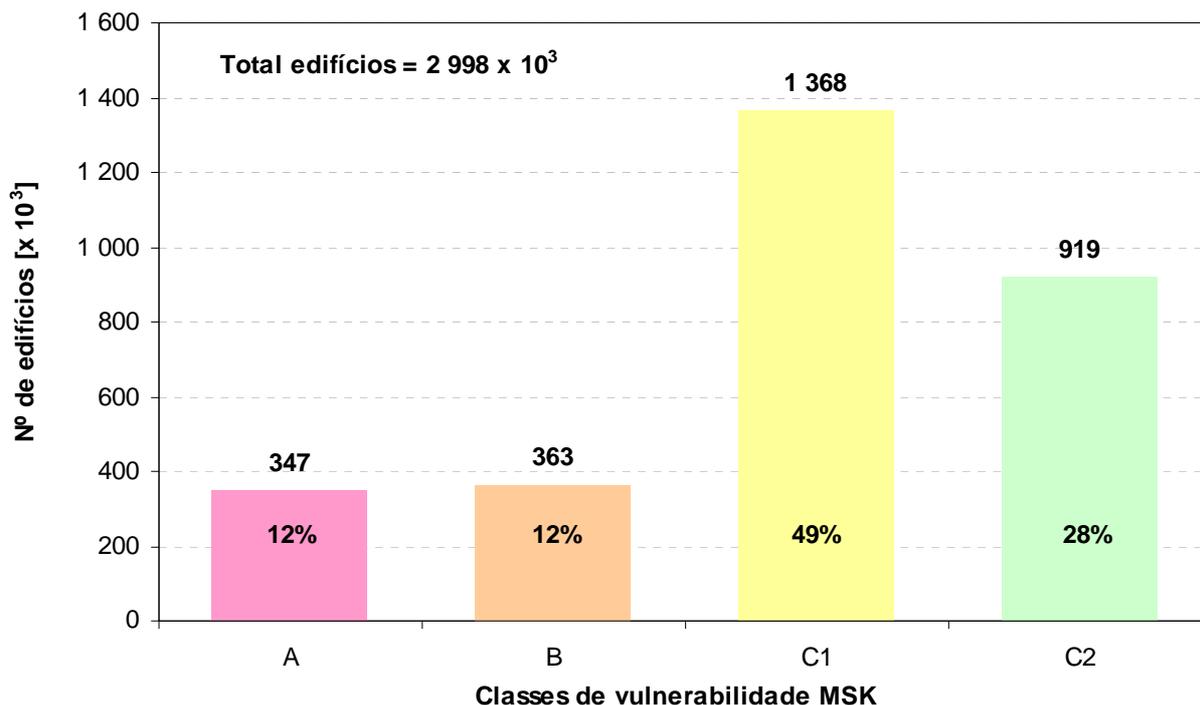


Figura 5.18 – Distribuição dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental pelas classes de vulnerabilidade da escala MSK.

Na figura 5.19 traça-se a distribuição geográfica, ao nível da freguesia, dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental classificados nas classes de vulnerabilidade da escala MSK.

Os mapas das classes «A» e «B» são iguais aos que constam da figura 5.17 para as classes «A» e «B» da classificação EMS-98, pois dizem respeito aos mesmos edifícios. Já as classes de vulnerabilidade «C1» e «C2», apesar de mostrarem quantitativos de edifícios próximos dos das classes «C» e «D» da classificação EMS-98 (compare-se a figura 5.16 com a figura 5.18), não correspondem aos mesmos edifícios. Por exemplo, a classe «C1» da classificação MSK inclui apenas edifícios de Paredes de alvenaria argamassada com e sem placa, enquanto a classe «C» da classificação EMS-98 também inclui edifícios de Betão armado.

A distribuição geográfica dos edifícios da classe de vulnerabilidade «A» da classificação MSK, sendo igual à da classe «A» da classificação EMS-98, é também muito semelhante à da classe «ATAPS + Outros» da classificação FEMA & NIBS.

A classe de vulnerabilidade «C1» é a que exhibe a maior incidência de edifícios entre todos os mapas de vulnerabilidade apresentados, pois 36% das freguesias do Continente possuem mais de 80% dos edifícios pertencentes a esta classe.

No sul do território a classe de vulnerabilidade «C2» tem uma distribuição complementar da exibida pela classe «A», com baixa concentração de edifícios nas freguesias do Baixo Alentejo e do sul do Alentejo Litoral e grande incidência de edifícios na região da Área Metropolitana de Lisboa e em algumas zonas do litoral sul Algarvio.

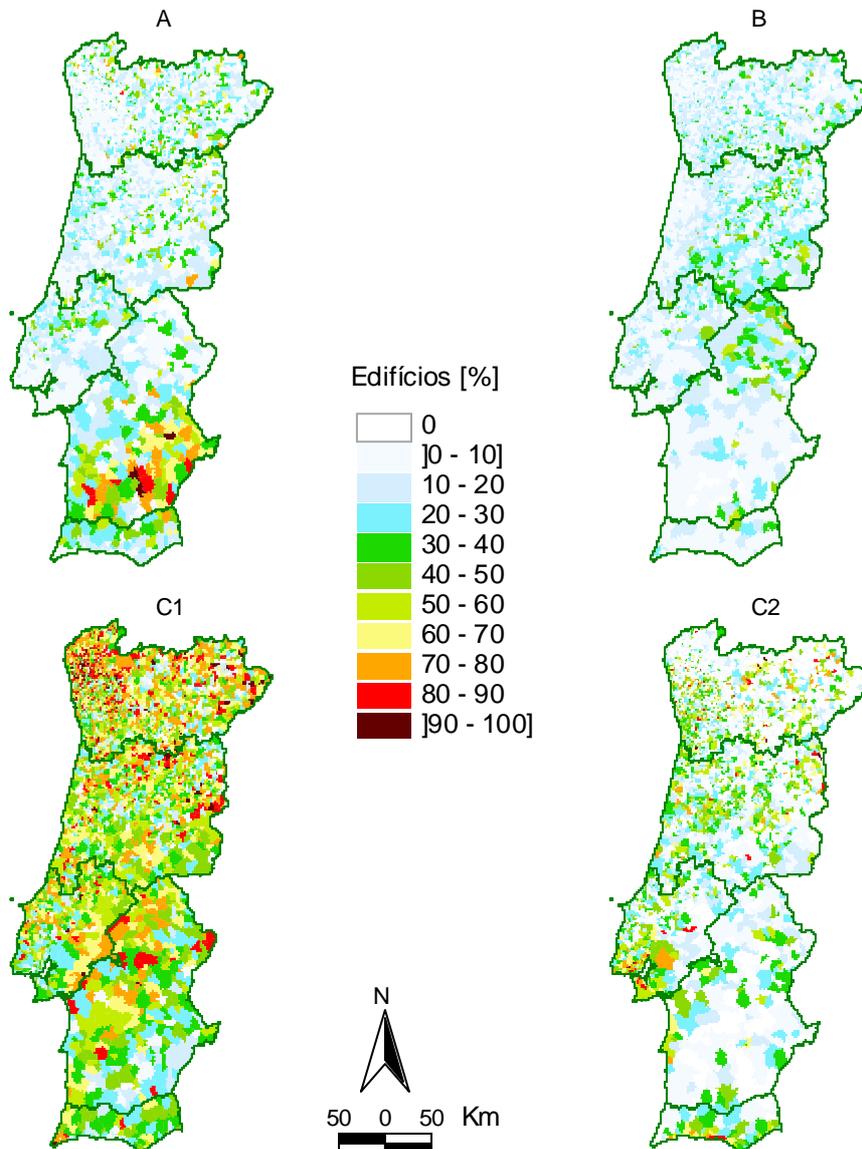


Figura 5.19 – Mapas de vulnerabilidade sísmica do Continente de acordo com a classificação MSK.

## 5.4. Vulnerabilidade e fragilidade sísmicas das tipologias portuguesas

### 5.4.1. Modelo de danos FEMA & NIBS

As curvas de capacidade e de fragilidade utilizadas no modelo de danos FEMA & NIBS basearam-se nas curvas previamente desenvolvidas por Carvalho *et al.* [2001c, 2002a e 2002b] e posteriormente actualizadas no âmbito do projecto LESSLOSS [Campos Costa *et al.*, 2005].

Numa etapa inicial utilizaram-se os valores de defeito dos parâmetros apresentados no documento HAZUS 99 [FEMA & NIBS 1999] para as tipologias construtivas que, nesse documento, têm alguma correspondência com a realidade construtiva nacional. Seleccionaram-se do documento HAZUS 99 os parâmetros correspondentes aos seguintes tipos de estruturas:

C1 – Pórtico de betão armado.

C2 – Paredes resistentes de betão armado.

C3 – Pórtico de betão com paredes de enchimento de alvenaria não reforçada.

URM – Alvenaria não reforçada.

Para cada tipo de estrutura são ainda especificadas diversas tipologias com várias categorias de número de pisos.

Para cada um dos tipos de estrutura o documento HAZUS 99 descreve os danos físicos típicos de cada estado de dano (ver exemplo na secção 2.4.3.4) e para cada tipologia construtiva especifica o parâmetros que permitem construir as curvas de capacidade e fragilidade.

Numa segunda etapa Carvalho *et al.* [2001c, 2002a e 2002b] procederam às modificações apropriadas dos valores de defeito destas tipologias para reflectirem as características e a evolução da construção em Portugal, nomeadamente em termos dos critérios de dimensionamento, e para ter em conta os danos observados no passado e em estudos anteriores de âmbito semelhante [Tiedemann, 1992, Oliveira *et al.*, 1992, Campos Costa *et al.*, 1999]. As curvas de capacidade e fragilidade foram definidas por Carvalho *et al.* [2001c] com base em julgamentos sobre os valores da aceleração e deslocamento espectrais, correspondentes à cedência e à capacidade última, de edifícios típicos do parque habitacional apurado nos Censos 91 para a Área Metropolitana de Lisboa e alguns concelhos limítrofes.

No âmbito do projecto LESSLOSS [Calvi & Pinho, 2004] adequaram-se essas curvas ao parque habitacional apurado nos Censos 2001 para a Área Metropolitana de Lisboa [Campos Costa *et al.*, 2005], tendo sido generalizadas, neste trabalho, para todo o território de Portugal Continental, considerando, entre outros aspectos, as diferenças no dimensionamento das estruturas nas várias zonas sísmicas regulamentares.

No anexo C representam-se, a título informativo, os parâmetros identificados por Campos Costa *et al.* [2005] que permitem construir as curvas de capacidade e fragilidade de acordo com as expressões 2.29 a 2.32. Na figura 5.20 exemplifica-se o traçado dessas curvas para uma das tipologias mais vulneráveis do parque habitacional de Portugal Continental.

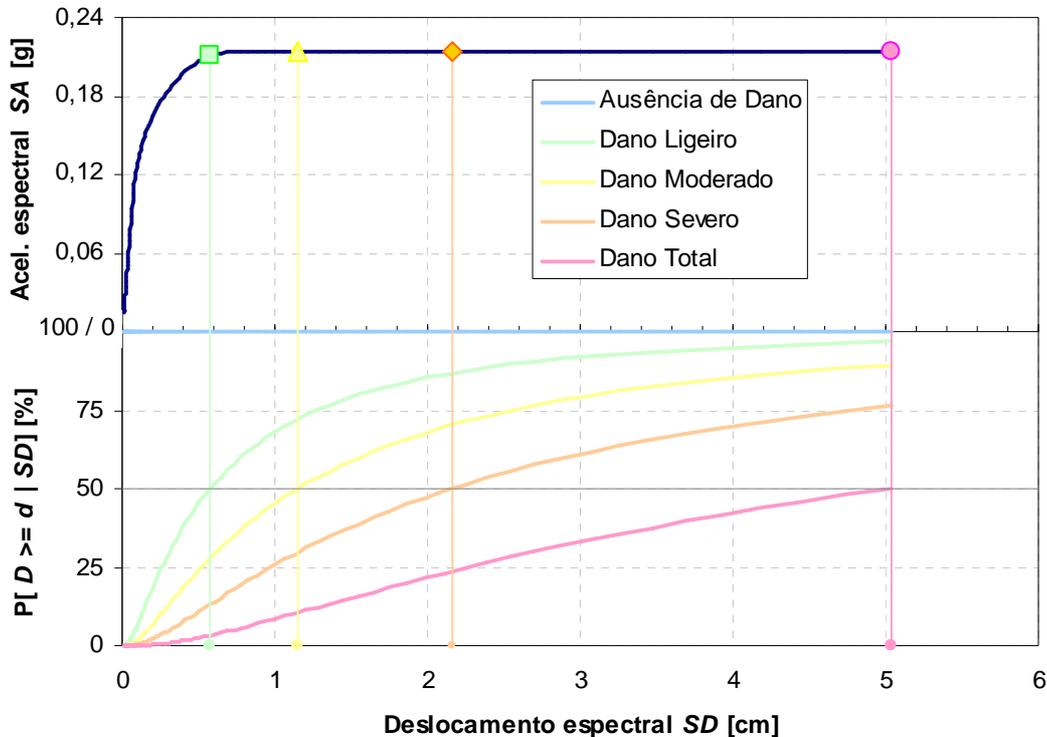


Figura 5.20 – Exemplo de curvas de capacidade, fragilidade e limiares de estados de dano da tipologia «ATAPS + Outros» com 1 pavimento [Campos Costa *et al.*, 2005].

#### 5.4.2. Modelo de danos Giovinazzi & Lagomarsino

Resume-se nesta secção a forma como se tornou operacional a metodologia de avaliação de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. Tal como foi exposto, os autores sugerem que o índice de vulnerabilidade seja avaliado com base na soma da contribuição de três parâmetros (expressão 2.37): o índice de vulnerabilidade tipológico mais provável,  $V_I^*$ , o índice de vulnerabilidade regional,  $\Delta V_R$ , e outros factores de penalização ou despenalização da vulnerabilidade sísmica,  $\Delta V_m$ .

O índice de vulnerabilidade regional permitiria introduzir, empiricamente, no modelo de danos as técnicas construtivas praticadas em diferentes regiões do Continente. Por exemplo permitiria contemplar a variação da construção em regiões marcadamente rurais ou urbanas, bem como a variação geográfica do dimensionamento sísmo-resistente do edificado, à semelhança da classificação efectuada para a metodologia FEMA & NIBS. Remete-se para trabalho futuro a concretização desta possibilidade. Também não foram contemplados os incrementos de vulnerabilidade preconizados por Giovinazzi & Lagomarsino [2004] para

diferentes tipos de terreno pois, como se verá no capítulo 6, o programa de simulação de cenários sísmicos apresenta procedimentos mais sofisticados para incluir a influência de formações superficiais recentes.

Entre os factores de vulnerabilidade apurados nos Censos 2001 foram considerados como factores de penalização ou despenalização do comportamento sísmico dos edifícios o seu número de pavimentos e o seu estado de conservação. Remete-se também para trabalho futuro a possibilidade de incluir no modelo de danos outros factores de vulnerabilidade, apurados nos Censos 2001, tais como a irregularidade dos edifícios em altura e a sua posição relativamente aos edifícios adjacentes.

Os edifícios que na variável *Necessidades de reparação na estrutura* dos Censos 2001 se enquadraram nas modalidades *Nenhumas* ou *Pequenas* foram classificados em *Bom estado de conservação* na metodologia Giovinazzi & Lagomarsino, enquanto que os restantes foram classificados em *Mau estado de conservação*. No quadro C.1 ilustra-se a descrição das modalidades da variável *Necessidade de reparações na estrutura* dos Censos 2001 e a sua classificação em *Bom* ou *Mau estado de conservação*.

Para as estruturas de alvenaria existentes no parque habitacional do Continente reúnem-se no quadro C.2 os valores propostos por Giovinazzi & Lagomarsino para o índice de vulnerabilidade mais provável,  $V_I^*$ , para os limites inferior e superior dos valores possíveis deste índice,  $V_{I\min}$  e  $V_{I\max}$ , para os factores de penalização e despenalização adoptados,  $\Delta V_m$ , e para o índice de vulnerabilidade final,  $\bar{V}_I$  (calculado pelas expressões 2.37 e 2.38). Note-se que, em 2003, Giovinazzi & Lagomarsino propuseram uma classificação qualitativa para o número de pavimentos dividindo os edifícios em pequeno, médio e grande porte. Esta classificação foi interpretada dividindo os edifícios de alvenaria em «1 a 2 pavimentos», «3 a 4 pavimentos» e «+ de 4 pavimentos». Relativamente aos edifícios de betão armado o número de pavimentos foi discriminado em cinco classes, em que os valores dos factores resultaram da interpolação dos factores de penalização e despenalização das três classes de número de pavimentos de Giovinazzi & Lagomarsino. Os índices de vulnerabilidade respectivos encontram-se reunidos no quadro C.3. Posteriormente, em 2004, os mesmos autores actualizaram essa classificação, concretizando o número de pavimentos de edifícios pertencentes a cada classe e efectuando ligeiras actualizações dos factores de penalização e despenalização respectivos. Estas actualizações não foram ainda contempladas no modelos de avaliação de danos, embora se preveja que possam ser concretizadas de forma expedita.

Substituindo o índice de vulnerabilidade final na expressão 2.36, e conhecida a intensidade macrossísmica, obtém-se o grau de danos médio  $\mu_D$  que se correlaciona, por sua vez, com os parâmetros de uma distribuição beta (expressão 2.35) utilizada para modelar as curvas de fragilidade nos diversos níveis de dano.

Na figura 5.21 traçam-se as funções cumulativas de distribuição beta utilizadas para modelar a fragilidade sísmica de tipologias representativas das classes de vulnerabilidade

principais da EMS-98. As curvas de fragilidade de cada uma das 54 tipologias EMS-98 obtêm-se facilmente recorrendo à informação que consta dos quadros C.2 e C.3.

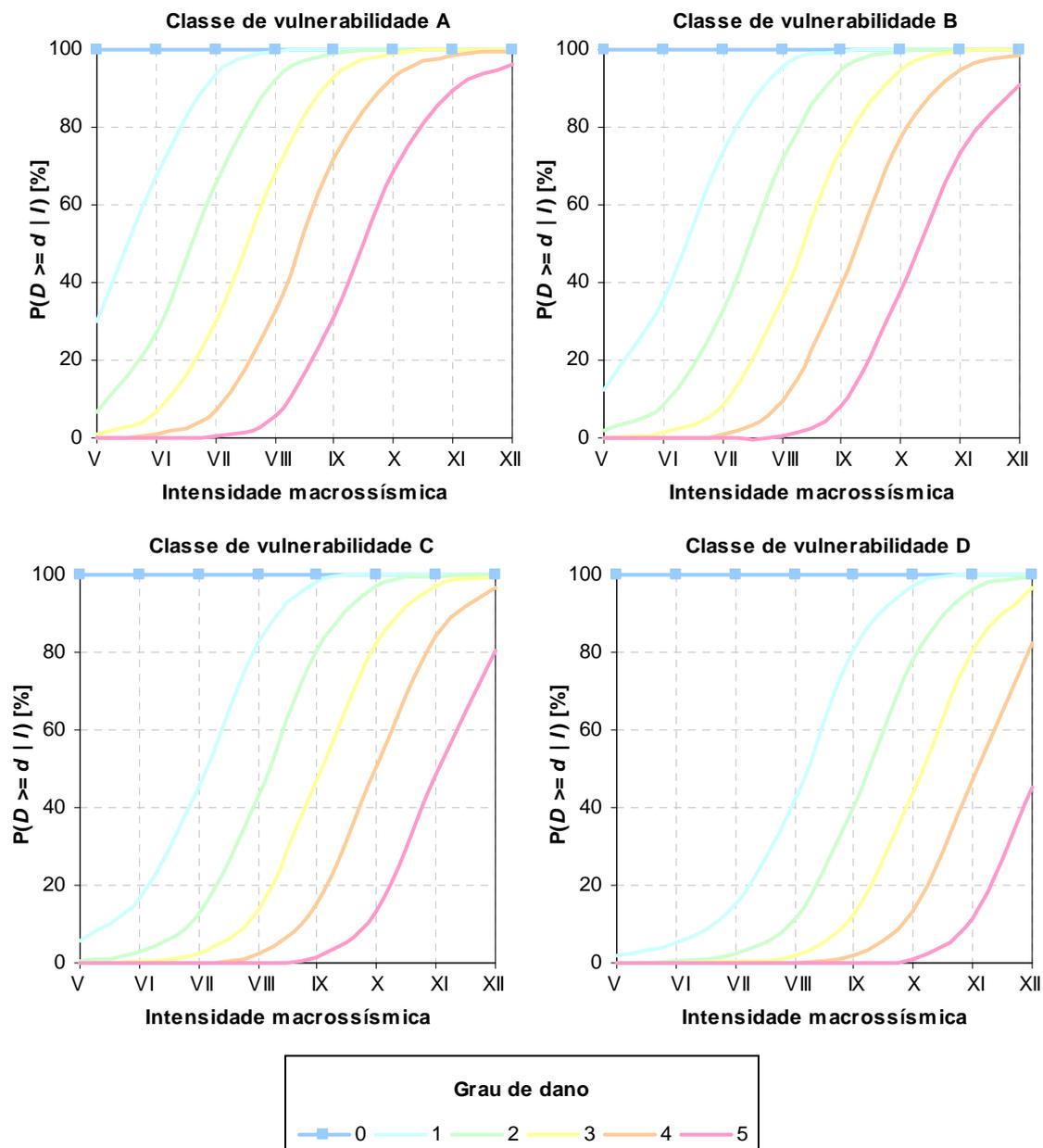


Figura 5.21 – Curvas de fragilidade de tipologias representativas das classes de vulnerabilidade EMS-98 do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino.

### 5.4.3. Modelo de danos Di Pasquale & Orsini

No anexo C (figura C.3) reúnem-se as quatro matrizes de probabilidade de dano desenvolvidas por Di Pasquale & Orsini para as classes de vulnerabilidade adaptadas da escala MSK. Na figura 5.22 exemplifica-se o traçado de uma dessas matrizes, a representativa da classe de vulnerabilidade mais vulnerável da escala MSK.

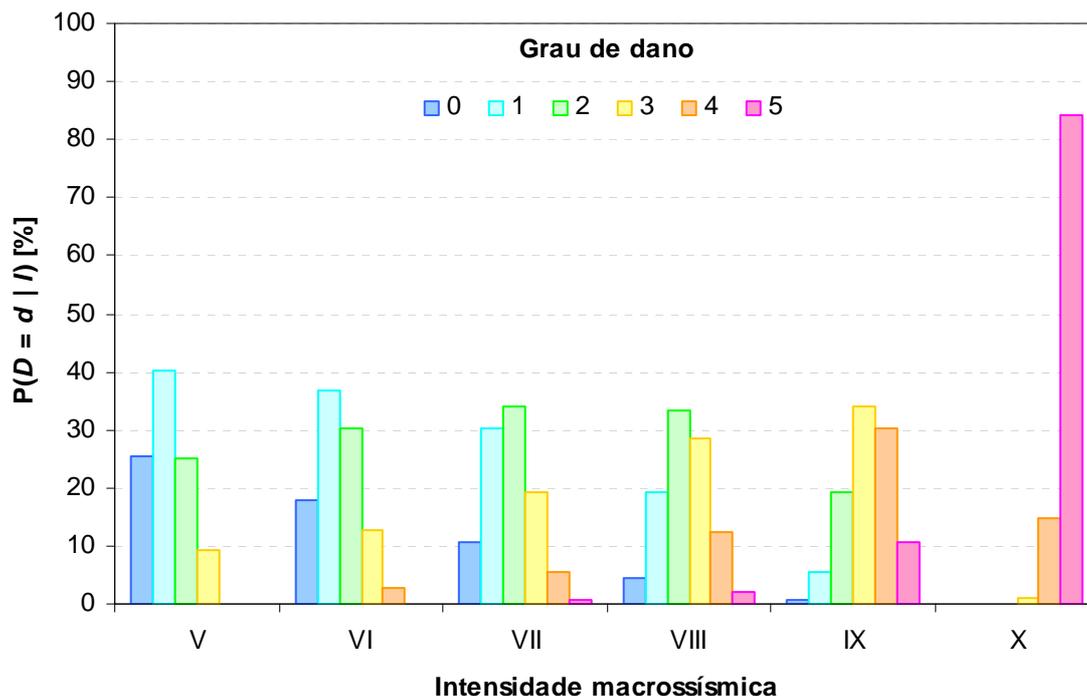


Figura 5.22 – Matriz de probabilidade de dano; exemplo da classe de vulnerabilidade «A» do modelo de danos de Di Pasquale & Orsini.

Para aplicar as matrizes de probabilidade de danos propostas por Di Pasquale & Orsini, e apresentadas em SSN [1998], no programa de simulação de cenários sísmicos foi necessário proceder a dois ajustes. Numa primeira etapa, seguindo as recomendações de Di Pasquale *et al.*, 1999, ajustou-se uma distribuição de probabilidade binomial (expressão 5.1), condicionada pela intensidade macrossísmica e válida para uma classe de vulnerabilidade *V*, às matrizes de probabilidade de dano apresentadas por Di Pasquale & Orsini e reproduzidas no anexo C.

$$P(D = d | I) = \frac{N_D!}{d! \times (N_D - d)!} \times p(I)^d \times [1 - p(I)]^{N_D - d} \quad (5.1)$$

em que,

*D* é uma variável aleatória discreta, grau de dano, que assume  $N_D + 1$  níveis, incluindo o 0 de Ausência de danos. No caso da escala MSK,  $N_D = 5$ , tal como foi referido na secção 2.4.4.2;

$p(I)$  é o parâmetro da distribuição binomial condicional à intensidade *I* e válido para uma dada classe de vulnerabilidade *V*;  $p(I)$  varia entre 0 e 1 e representa o grau de dano médio normalizado por  $N_D$ .

No quadro 5.8 reúnem-se os parâmetros das distribuições binomial ajustadas às matrizes de probabilidade de dano do modelo Di Pasquale & Orsini.

Quadro 5.8 – Parâmetros,  $p(I)$ , da distribuição binomial ajustada às matrizes de probabilidade de dano do modelo Di Pasquale & Orsini.

Intensidade macrossísmica	Classe de Vulnerabilidade			
	A	B	C1	C2
V	0,2407	0,1386	0,0553	0,0299
VI	0,2929	0,1735	0,0730	0,0458
VII	0,3608	0,2243	0,1050	0,0842
VIII	0,4626	0,3150	0,1730	0,1795
IX	0,6387	0,4942	0,3200	0,3984
X	0,9659	0,8501	0,6270	0,8001

Numa segunda etapa ajustou-se uma função polinomial (expressão 5.2) capaz de interpolar os parâmetros da distribuição anterior,  $p(I)$ , para qualquer valor de  $I$ , válido para uma dada classe de vulnerabilidade  $V$ . De facto, apesar de valores intermédios da intensidade não terem sentido num levantamento macrossísmico é usual utilizá-los para efeitos de previsão [Giovinazzi & Lagomarsino].

$$p(I) = p_0 + p_1 \times (I - 5) + p_2 \times (I - 5)^2 + p_3 \times (I - 5)^3 + p_4 \times (I - 5)^4 \quad (5.2)$$

No quadro 5.9 exibem-se os coeficientes da expressão anterior, obtidos por análise de regressão, bem como a raiz quadrada do erro quadrático médio do ajuste,  $\sqrt{MSE}$ . Na figura 5.23 desenham-se os parâmetros  $p(I)$  da distribuição binomial e traçam-se as curvas a eles ajustadas.

Quadro 5.9 – Coeficientes do ajuste polinomial aos parâmetros da distribuição binomial do modelo de danos de Di Pasquale & Orsini.

Coeficientes do ajuste	Classe de vulnerabilidade			
	A	B	C1	C2
$p_0$	0,2410	0,1390	0,0550	0,0300
$p_1$	0,0460	0,0260	0,0068	0,0200
$p_2$	0,0140	0,0130	0,0110	-0,0063
$p_3$	-0,0044	-0,0045	-0,0042	0,0042
$p_4$	0,0011	0,0013	0,0013	0,0005
$\sqrt{MSE}$	0,0250	0,0108	0,0144	0,0074

Finalmente, na figura 5.24 exemplifica-se o traçado das curvas de fragilidade ajustadas e originais respeitantes às quatro classes de vulnerabilidade da metodologia de avaliação de danos de Di Pasquale & Orsini. Naturalmente, polinómios de quarta ordem originam ajustes excelentes a curvas com um andamento tão suave.

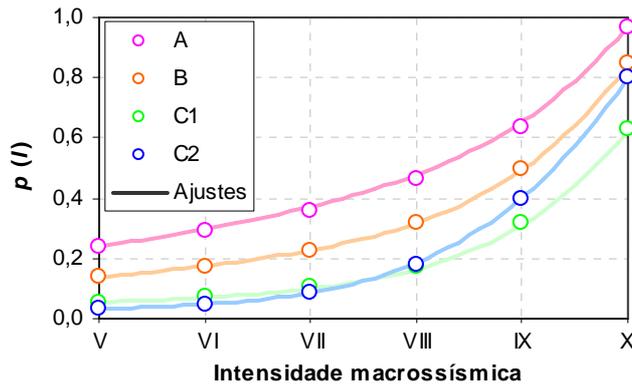


Figura 5.23 – Coeficientes da distribuição binomial do modelo Di Pasquale & Orsini e ajustes respectivos.

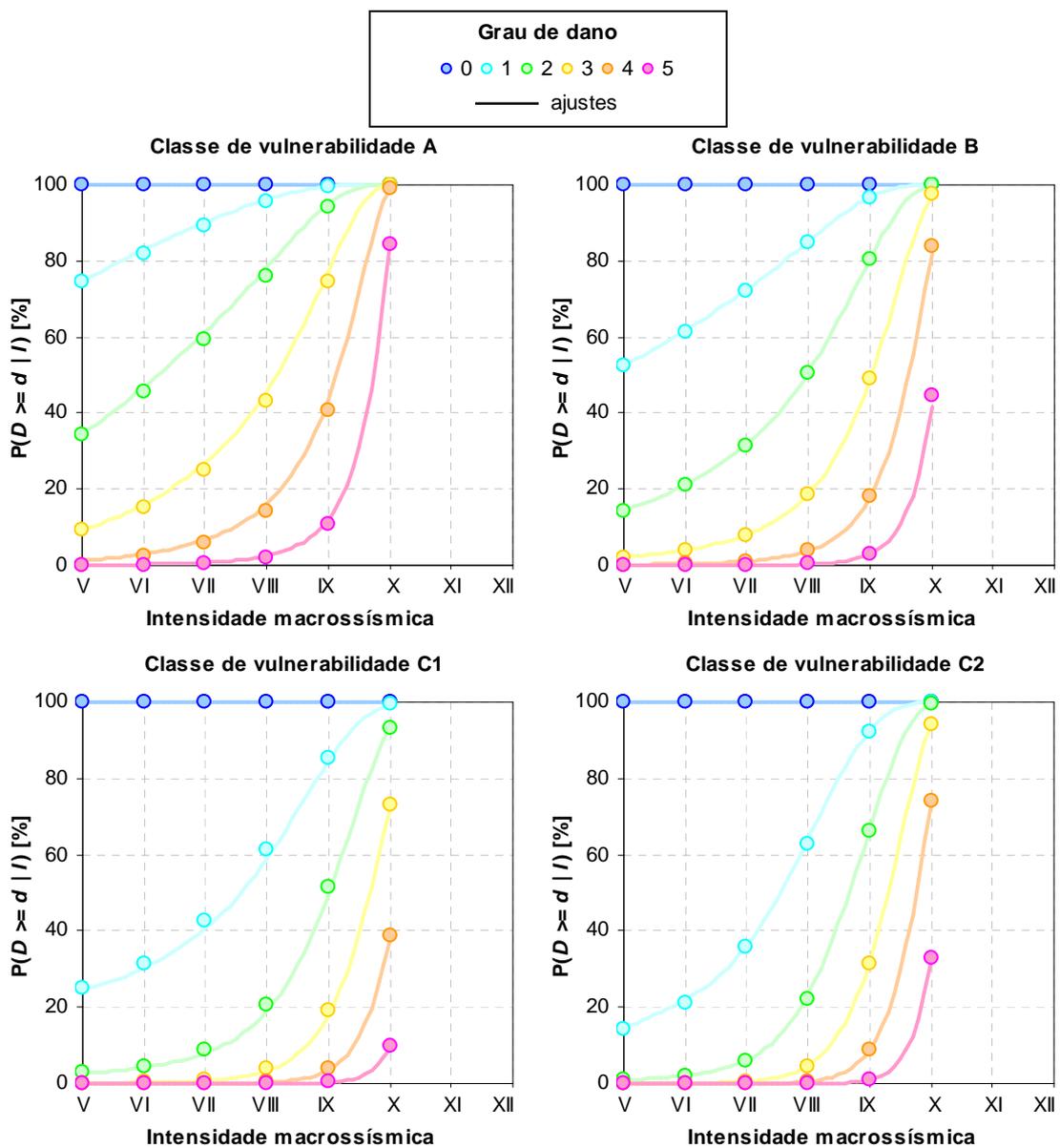


Figura 5.24 – Curvas de fragilidade ajustadas e originais do modelo de danos de Di Pasquale & Orsini.

#### 5.4.4. Modelo de danos Zuccaro & Papa

Zuccaro & Papa especificam à partida os parâmetros da distribuição binomial que descrevem as matrizes de probabilidade de dano que propõem (ver quadro C.4 e figura C.4). Desta forma, o processamento necessário a tornar este modelo operacional reduz-se à segunda etapa descrita na secção anterior. Na figura 5.25 exemplifica-se o traçado da matriz de probabilidade de dano representativa da classe mais vulnerável da escala MSK, obtida a partir da distribuição binomial (expressão 5.1 e parâmetros do quadro C.4).

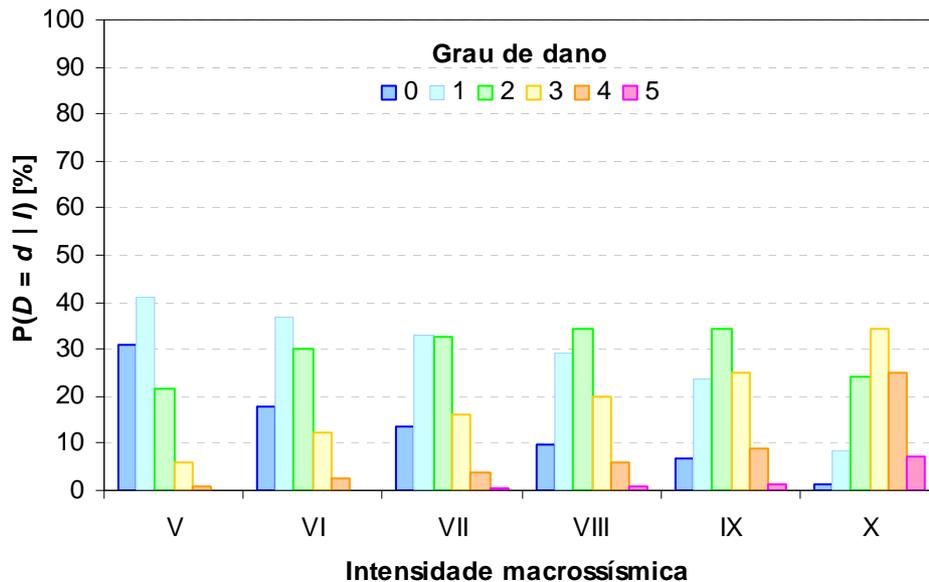


Figura 5.25 – Matriz de probabilidade de dano; exemplo da classe de vulnerabilidade «A» do modelo de danos de Zuccaro & Papa.

No quadro 5.10 exibem-se os coeficientes da expressão 5.2, obtidos por análise de regressão, bem como a raiz quadrada do erro quadrático médio do ajuste,  $\sqrt{MSE}$ . Na figura 5.26 desenham-se os parâmetros  $p(I)$  da distribuição binomial e traçam-se as curvas a eles ajustadas. Finalmente, na figura 5.27 traçam-se as curvas de fragilidade originais e ajustadas respeitantes às quatro classes de vulnerabilidade da metodologia de avaliação de danos de Zuccaro & Papa. Note-se mais uma vez a excelência dos ajustes conseguidos.

Quadro 5.10 - Coeficientes do ajuste polinomial aos parâmetros da distribuição binomial do modelo de danos de Zuccaro & Papa.

Coeficientes do ajuste	Classe de vulnerabilidade			
	A	B	C1	C2
$p_0$	0,2103	0,1501	0,0797	0,0297
$p_1$	0,0890	0,0626	0,0696	0,0276
$p_2$	-0,0069	-0,0303	-0,0378	0,0072
$p_3$	-0,0060	0,0084	0,0109	-0,0042
$p_4$	0,0014	-0,0006	-0,0010	0,0008
$\sqrt{MSE}$	0,0082	0,0018	0,0021	0,0054

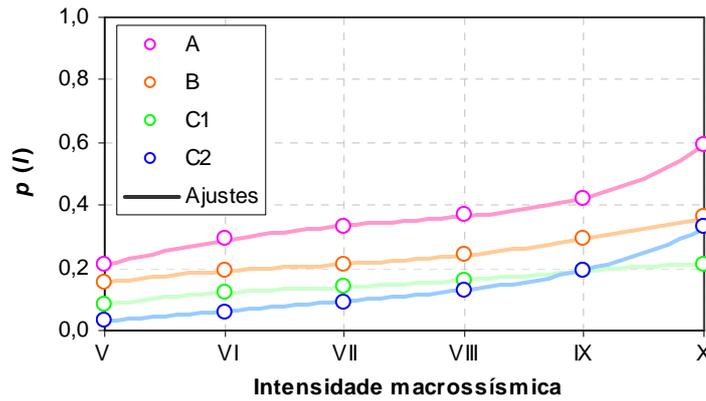


Figura 5.26 – Coeficientes da distribuição binomial do modelo Zuccaro & Papa e ajustes respectivos.

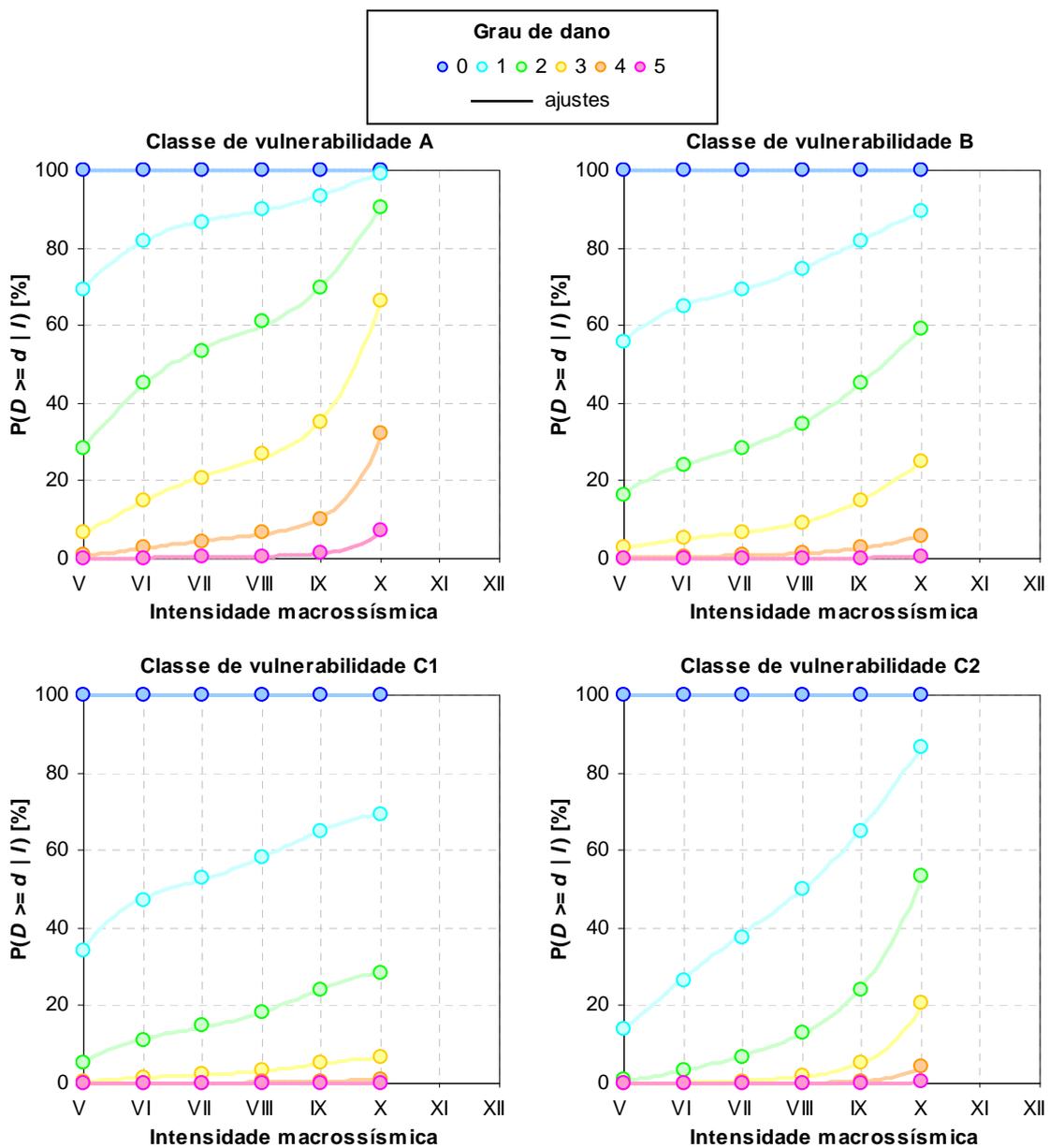


Figura 5.27 – Curvas de fragilidade ajustadas e originais do modelo de danos de Zuccaro & Papa.

### 5.4.5. Modelo de danos Tiedemann

Para se utilizarem as curvas de vulnerabilidade ajustadas por Sousa *et al.* [1997] (expressões 2.40 e 2.41) às estatísticas de danos mundiais apresentadas por Tiedemann, aproveitou-se a classificação e a caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional efectuada nas secções 5.3.2 e 5.4.1, subjacentes à aplicação do modelo de danos FEMA & NIBS. Com efeito, um dos parâmetros utilizados na metodologia FEMA & NIBS para caracterizar a vulnerabilidade sísmica das tipologias construtivas de Portugal Continental é o coeficiente sísmico, que substituído nas expressões 2.40 permite traçar as curvas de vulnerabilidade destas tipologias de acordo com a metodologia Tiedemann. Na figura 5.28 mostram-se as envolventes das curvas de vulnerabilidade da metodologia Tiedemann para o parque habitacional de Portugal Continental.

Como alguns coeficientes sísmicos são comuns a mais do que uma tipologia FEMA & NIBS o número de tipologias designadas de *Tiedemann* reduz-se para 33, já incluindo as diferenças resultantes das zonas sísmicas do RSCCS [1958] e do RSA [1983]. Não foram contabilizadas as tipologias que não têm expressão no parque habitacional do Continente.

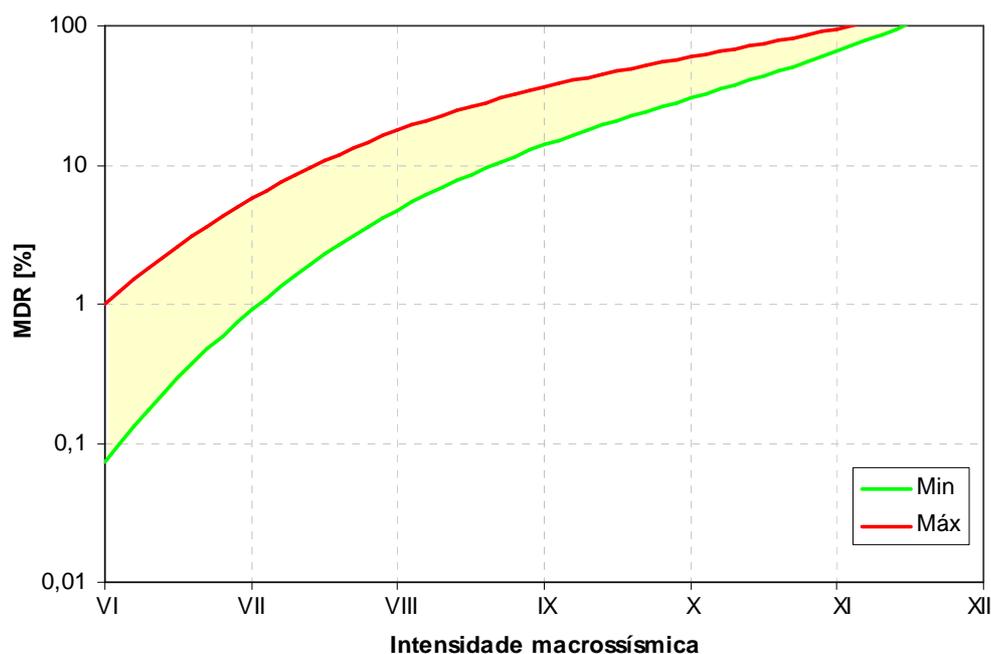


Figura 5.28 – Envolvente das curvas de vulnerabilidade para Portugal Continental de acordo com a metodologia Tiedemann.

Nota-se que da caracterização da vulnerabilidade sísmica das tipologias Tiedemann com recurso ao coeficiente sísmico basal adoptado na metodologia FEMA & NIBS resultam tipologias menos vulneráveis que as decorrentes das estatísticas de danos mundiais compiladas por Tiedemann (figura 2.10). As principais diferenças ocorrem nas estruturas de adobe, alvenaria de pedra solta e de tijolo das estatísticas mundiais, que não têm correspondência com as curvas de vulnerabilidade traçadas na figura 5.28 para o parque habitacional de Portugal Continental.

## 5.5. Análise crítica das metodologias de avaliação de danos no edificado

Nas secções anteriores descreveram-se os passos metodológicos e os dados utilizados para a classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional de Portugal Continental. Para caracterizar a vulnerabilidade sísmica do parque utilizaram-se modelos de dano mecanicistas e estatísticos. A presente secção tem por objectivo realizar a análise comparativa e crítica das metodologias utilizadas, o que será cumprido em três etapas: a primeira abordando a caracterização da acção sísmica subjacente aos modelos de danos, a segunda abordando a classificação e a caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque e, finalmente, a terceira referente aos modelos de danos propriamente ditos.

### *Acção sísmica*

No que concerne à intensidade macrossísmica, que é a grandeza que traduz a severidade da acção sísmica utilizada nos modelos estatísticos de danos, podem apontar-se diversas desvantagens na sua utilização [Sabetta *et al.*, 1999]: valores limitados e discretos, avaliações subjectivas da severidade do movimento sísmico, correlação implícita entre danos e intensidades macrossísmicas, inclusão dos efeitos de sítio nos valores da acção, escalas diferentes de avaliação dos efeitos macrossísmicos (MSK, MSC, EMS) e informação reduzida sobre a correlação entre intensidade e danos em edifícios recentes.

Por outro lado, a quantificação espectral da acção constitui uma vantagem da metodologia FEMA & NIBS, pois permite incorporar na resposta dos edifícios as características do movimento do solo, tais como a sua amplitude, frequência e duração. Por exemplo, a altura do edificado é mais um factor de vulnerabilidade que pode ser idealizado matematicamente, tal como é efectuado na análise dinâmica de estruturas. Em compensação, as relações entre as curvas de fragilidade e as grandezas instrumentais do movimento baseiam-se normalmente em modelos matemáticos do comportamento estrutural dos edifícios, ou em interpretações de ensaios experimentais e julgamentos de especialistas, difíceis de validar com observações no terreno, devido à escassez de registos instrumentais nas regiões do globo de maior risco sísmico [Sabetta *et al.*, 1999].

### *Classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica*

Sobre a classificação da vulnerabilidade sísmica do edificado as metodologias agrupam os elementos em risco em tipologias construtivas ou em classes de vulnerabilidade mais abrangentes, que se espera que, com menor ou maior variação, apresentem um desempenho sísmico aproximadamente homogéneo

O método mecanicista FEMA & NIBS classifica os edifícios em tipologias construtivas mas, ao contrário dos métodos estatísticos, não obriga a uma divisão do parque em classes pré-definidas, o que oferece grande liberdade para a construção de tipologias capazes de enquadrarem as principais práticas construtivas do Continente Português.

As tipologias FEMA & NIBS foram construídas originalmente para o edificado dos EUA e a adequação dos seus parâmetros ao parque habitacional de Portugal Continental, revelou-se uma tarefa complexa [Campos Costa *et al.*, 2005]. Acresce que a validação das opções tomadas foi fundamentalmente efectuada com o recurso às estatísticas de danos resultantes dos sismos que no passado afectaram Portugal Continental, sendo estas consideravelmente limitadas (ver capítulo 6).

As classes de vulnerabilidade pré-definidas da escala MSK, por serem muito abrangentes, são de fácil aplicação, mas conduzem, inevitavelmente, a uma discriminação grosseira da vulnerabilidade do parque. Além disso, só após a introdução da EMS-98 é que as escalas de intensidade macrossísmica passaram a contemplar estruturas dimensionadas para resistirem a sismos.

Ao contrário das classes de vulnerabilidade MSK, a classificação do parque habitacional segundo os tipos de estrutura da EMS-98, cruzados com diversos factores de vulnerabilidade, possibilita a discriminação de um elevado número de tipologias EMS-98, subjacentes à metodologia Giovinazzi & Lagomarsino.

A vantagem das tipologias EMS-98 prende-se com a clareza da denominação de cada classe e com o facto de facilmente enquadrarem a maioria dos factores de vulnerabilidade identificados nos Censos 2001 (ver secção 4.2). Com efeito, para além do tipo de estrutura, época de construção e número de pavimentos, também o estado de conservação dos edifícios, a sua regularidade ou irregularidade em altura e a sua posição relativa aos edifícios adjacentes, são características que influenciam reconhecidamente o tipo de comportamento estrutural dos edifícios e que, entre as cinco metodologias aplicadas, são exclusivamente previstas pela de Giovinazzi & Lagomarsino. Não esquecer, contudo, que os valores dos factores de penalização e despenalização que traduzem as características mencionadas foram atribuídos de forma empírica por Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004], com base na observação dos padrões de dano mais frequentes após os sismos.

A metodologia de danos de Giovinazzi & Lagomarsino tem ainda a vantagem de traduzir num único parâmetro, o índice de vulnerabilidade total,  $\bar{V}_I$ , a vulnerabilidade intrínseca dos elementos expostos ao risco sísmico.

As curvas de vulnerabilidade desenvolvidas por Tiedemann baseiam-se em estatísticas mundiais de danos, correspondendo por isso as tipologias construtivas muito abrangentes e pouco homogéneas. Esta classificação é facilmente aplicável, ainda que de forma pouco discriminante, ao parque habitacional do Continente.

### ***Modelos de danos***

Relativamente aos modelos de danos, pode afirmar-se que a metodologia FEMA & NIBS, baseada no método do espectro de capacidade, é a que apresenta os procedimentos mais sofisticados para estimar os danos estruturais causados por sismos em edifícios. O confronto desta metodologia com as abordagens estatísticas exigiria a conversão da grandeza espectral que exprime a acção sísmica numa grandeza macrossísmica, ou vice-versa. Tal

não foi efectuado para efeitos comparativos. Em contrapartida, o simples exame das figuras 5.21, 5.24 e 5.27 viabiliza a comparação das metodologias estatísticas Giovinazzi & Lagomarsino, Di Pasquale & Orsini e Zuccaro & Papa. A comparação da vulnerabilidade preconizada pelas duas últimas metodologias mencionadas pode ser efectuada, mais directamente, recorrendo às figuras 5.23 e 5.26 que exibem os graus de dano médios normalizados.

Assim, constata-se que as curvas de fragilidade propostas por Zuccaro & Papa reflectem uma menor vulnerabilidade do que as de Giovinazzi & Lagomarsino e de Di Pasquale & Orsini. Especificamente, a partir do grau de intensidade VII começa a existir uma grande disparidade de valores entre as percentagens de danos previstas pelo modelo de Di Pasquale & Orsini e pelo de Zuccaro & Papa, sendo as primeiras consideravelmente mais elevadas

Finalmente, o modelo de danos Tiedemann é o mais simplista entre todos os aplicados, limitando-se ao traçado de curvas de vulnerabilidade que correlacionam perdas médias com a intensidade macrossísmica, parametrizadas pelo coeficiente sísmico no caso das tipologias de betão armado. Os dados subjacentes a estas curvas têm naturalmente uma dispersão muito elevada, pois baseiam-se em estatísticas mundiais de danos (figura 2.10).

Conclui-se que todas as metodologias possuem vantagens ou desvantagens nas diversas fases da sua implementação. Assim, dado o carácter inovador da aplicação de algumas delas a Portugal Continental e a exigência de adequação de alguns dos seus parâmetros, optou por se implementar todas elas no programa de simulação de cenários sísmicos (ver capítulo 6) que serve de base às subseqüentes avaliações de danos e perdas para cenários definidos e também para a avaliação do risco sísmico com modelos probabilísticos.

## **5.6. Vulnerabilidade sísmica dos habitantes de Portugal Continental**

### **5.6.1. Modelo de perdas humanas Coburn & Spence**

A metodologia Coburn & Spence (secção 2.5.3) especifica uma série de factores inovadores que, na prática, se tem confirmado que afectam o potencial de mortalidade no caso de um sismo. Por exemplo, indica uma taxa de aprisionamento no colapso em função da intensidade do movimento do solo, do tipo de estrutura dos edifícios (betão armado ou alvenaria), da eficácia das operações de socorro, etc. Porém, a quantificação destes factores é empírica e os resultados do modelo de perdas humanas revelaram ser bastante sensíveis aos valores que lhes são atribuídos.

No que concerne aos valores das variáveis e factores envolvidos no modelo de Coburn & Spence sabe-se que: (i) é possível apurar o número médio de pessoas por edifício,  $N_{pe}$ , a partir do inventário dos elementos em risco, mais concretamente, o número médio de ocupantes por tipologia de edifícios de vulnerabilidade  $V$ , designado de  $N_{pV}$ , (ii) os valores

dos factores  $M2$ ,  $M3$  e  $M4$  são tabelados na metodologia e (iii) o valor do factor  $M5$ , que descreve a mortalidade pós-colapso, é o único que requer alguma interpretação.

O factor  $M5$  reflecte a eficácia das operações de emergência, dependendo da severidade do sismo, variando consideravelmente de região para região e entre tipologias construtivas. Coburn & Spence apresentam várias modalidades para este factor possibilitando a sua adequação à situação a que é aplicado. No presente contexto, optou por se escolher dois conjuntos de valores para  $M5$  (quadro 5.11), que traduzem diferentes capacidades de resposta da comunidade em caso de um sismo, para permitir efectuar simulações de cenários sísmicos válidas para épocas históricas ou actuais. Decidiu-se ainda que o factor  $M5$  das épocas históricas deveria reflectir a severidade do movimento sísmico.

Quadro 5.11 – Valores adoptados para o factor  $M5$ .

Severidade da acção	$M5$ histórico [%]	Tipo de estrutura	$M5$ actual [%]
$I \leq VIII$	60	Alvenaria	45
$I > VIII$	95	BA	70

Na figura 5.29 desenha-se o produto dos factores que influenciam o *potencial de mortalidade efectivo* para os edifícios pertencentes a uma dada classe de vulnerabilidade  $V$ , aqui designado de  $PM_V$ , para uma situação histórica e outra actual. Esse potencial de mortalidade efectivo, é aqui definido por:

$$PM_V = Ne_{D5V} \cdot Np_V \cdot M2 \quad (5.3)$$

Para tal, rescreve-se a expressão 2.45 de forma mais simplificada e distinguindo as vítimas que morrem das que ficam feridas, entre as causadas pelos danos estruturais em edifícios pertencentes a uma dada classe de vulnerabilidade  $V$ :

$$K_{sV\text{morto}} = PM_V \cdot [M3 \cdot (M4_{\text{morto}} + M5 \cdot (1 - M4_{\text{morto}}))] \quad (5.4)$$

$$K_{sV\text{ferido}} = PM_V \cdot [M3 \cdot (M4_{\text{ferido}} \cdot (1 - M5))] \quad (5.5)$$

Relembre-se que, conforme especificado no quadro 2.7,  $M4_{\text{ferido}}$  assume um valor complementar de  $M4_{\text{morto}}$  e que no caso das estruturas de betão armado o factor  $M3$  depende, de forma qualitativa, das características do movimento sísmico, ou seja, depende da distância ao epicentro do sismo.

Os traços mais salientes revelados pela análise da figura 5.29 prendem-se com o facto de, para o mesmo potencial de mortalidade e para as várias intensidades macrossísmicas analisadas, o factor que influencia o número de vítimas mortais é sempre superior ao que afecta o número de feridos. Note-se que o contraste mais acentuado entre a previsão de mortos e a de feridos se verifica nos edifícios de betão armado para uma situação actual.

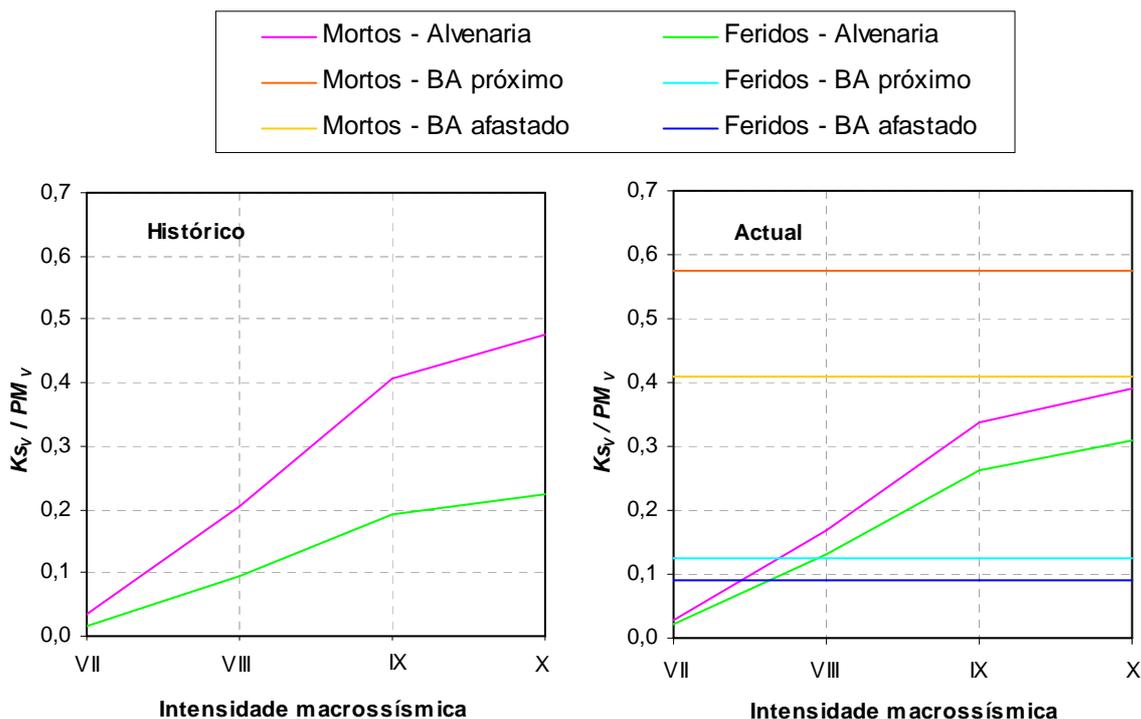


Figura 5.29 – Factores que influenciam o potencial de mortalidade; situações histórica e actual.

Desta forma, uma vez que o modelo Coburn & Spence não estima feridos para estados de dano diferentes do colapso e engloba, simultaneamente, uma taxa de mortalidade por aprisionamento muito elevada, então este modelo conduz a resultados desproporcionados entre o número de mortos e feridos, sendo o número de mortos sistematicamente superior ao de feridos, para qualquer nível de severidade da acção sísmica. Estes resultados devem-se, provavelmente, ao facto do modelo se encontrar vocacionado para a estimativa de perdas humanas nas regiões mais afectadas por sismos de grande severidade, onde é natural que o número de mortos seja superior ao de feridos.

### 5.6.2. Modelo de perdas humanas FEMA & NIBS

A metodologia FEMA & NIBS permite estimar o número de Feridos Ligeiros, necessitados de Cuidados Hospitalares, Feridos Graves e Mortos, para quatro estados de dano e diversas tipologias. Entre as metodologias analisadas a FEMA & NIBS é a única a contemplar outras vulnerabilidades humanas para além das que conduzem às estimativas dos números de mortos e feridos. Assim, esta metodologia permite estimar o número de desalojados e as necessidades de abrigos temporários, para o que é necessário recolher informação específica para a região em análise, ou utilizar os valores de defeito apresentados na metodologia. Contudo, esses valores de defeito são difíceis de calibrar para contextos diferentes da situação original para a qual foi desenvolvida a metodologia. Propõe-se aplicar no futuro estes modelos adicionais.

Como se verá no capítulo 6, no que toca à proporção entre mortos e feridos a metodologia FEMA & NIBS conduz a resultados mais equilibrados do que a metodologia Coburn & Spence.

Nos quadros C.5 e C.6 do anexo C apresentam-se os valores utilizados no programa de simulação de cenários sísmicos relativamente à metodologia FEMA & NIBS, que correspondem, na sua grande maioria, aos valores de defeito do documento HAZUS 99, com algumas alterações justificadas no capítulo 6.

### 5.6.3. Modelo de perdas humanas Tiedemann

Esta secção termina com breves comentários sobre o modelo de perdas humanas Tiedemann. Ao contrário das metodologias FEMA & NIBS e Coburn & Spence, que introduzem diversos factores para modelar a vulnerabilidade humana, a metodologia Tiedemann cinge-se ao estabelecimento de correlações entre vítimas mortais e a intensidade macrossísmica, para várias tipologias do edificado, parametrizadas pelo coeficiente sísmico no caso de corresponderem a um tipo de estrutura de betão armado.

Na figura 5.30 comparam-se os valores das razões entre o número de mortos e feridos, observados em sismos recentes, com os valores correspondentes avançados por Tiedemann. Estes últimos variam entre 1:3 e 1:6, mas, em determinadas situações, podem atingir valores inferiores (secção 2.5.4). Entre os modelos propostos verifica-se que o melhor ajuste é obtido por um modelo linear, em escalas logarítmicas, de ordenada na origem nula e com inclinação de 1:6, ao qual corresponde um coeficiente de correlação simples de 55%.

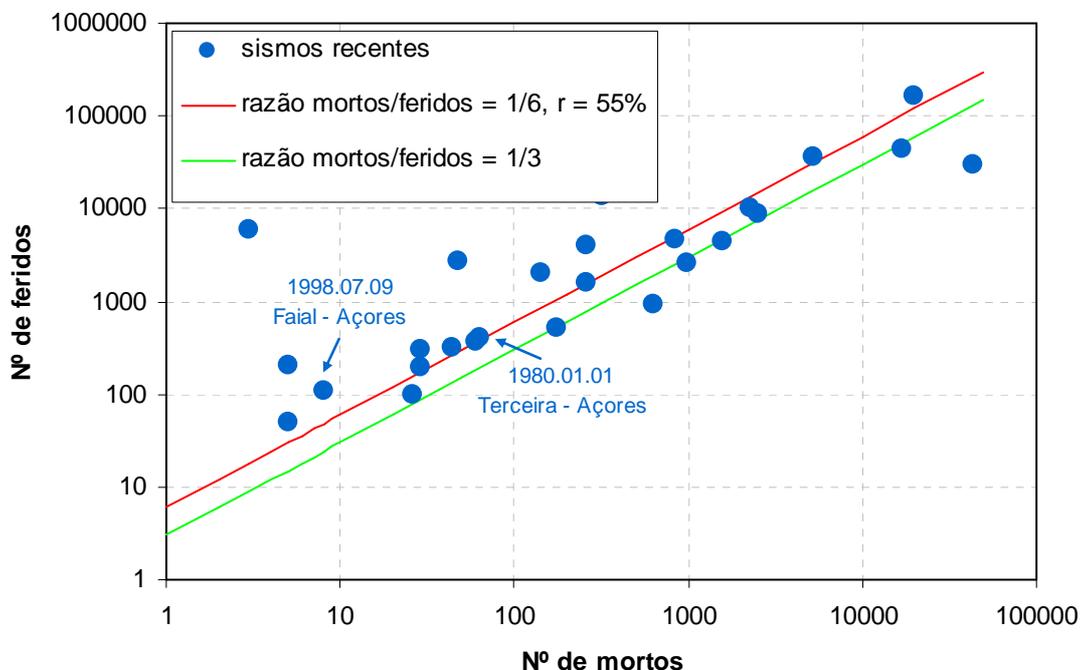


Figura 5.30 – Modelos que relacionam o número de mortos com o de feridos e observações relativas a sismos ocorridos entre 1980 e 2004.

Mais uma vez, devido à sua simplicidade, a metodologia Tiedemann tem a vantagem de ser a de mais fácil aplicação entre as metodologias implementadas no programa de simulação de cenários sísmicos descrito no capítulo 6.

## **5.7. Conclusões**

Cumpriram-se os principais objectivos estipulados para este capítulo que consistiam em (i) caracterizar o parque habitacional de Portugal Continental incidindo sobre os sistemas construtivos mais correntes, mencionando as suas principais deficiências face à acção dos sismos e enquadrando-os nas tipologias dos Censos 2001, (ii) classificar o parque habitacional nas tipologias construtivas ou classes de vulnerabilidade subjacentes aos modelos de danos usados e (iii) caracterizar a vulnerabilidade e fragilidade sísmica dessas tipologias construtivas e classes de vulnerabilidade.

A principal conclusão a retirar sobre as características do parque habitacional de Portugal Continental é que a generalização do emprego do betão armado introduziu alterações significativas nos processos construtivos do País, não só pela sua utilização como sistema estrutural, como também pelas suas implicações nos sistemas construtivos de alvenaria.

Com apreciação geral relativa ao inventário dos elementos em risco pode afirmar-se que, graças às variáveis apuradas, os Censos 2001 têm a capacidade de fornecer, pela primeira vez, um panorama quantitativo global do qual se podem inferir as características da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do País.

No entanto, não estando os Censos 2001 directamente vocacionados para estudos de avaliação da vulnerabilidade sísmica pode afirmar-se que as incertezas no inventário efectuado, a par da subjectividade da classificação da vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco, constituem uma das maiores fontes de erro num estudo de risco sísmico [Whitman, 1988]. Sugere-se que, como trabalho futuro, seja efectuada uma análise de sensibilidade dos resultados do risco sísmico a alterações das fronteiras das classificações da vulnerabilidade sísmica do parque.

Na tentativa de representar, à escala nacional, a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional traçaram-se mapas de vulnerabilidade segundo as várias classificações, constatando-se que as regiões mais vulneráveis do Continente são o Baixo Alentejo e o sul do Alentejo Litoral, sendo um padrão que se repete independentemente do tipo de classificação de vulnerabilidade efectuado.

Sintetizando a análise crítica efectuada sobre os critérios de classificação de vulnerabilidade sísmica pode referir-se que (i) as classes tipológicas da escala MSK são de fácil aplicação, mas conduzem, a uma discriminação grosseira das tipologias do parque, (ii) as tipologias EMS-98 possibilitam uma discriminação mais fina da vulnerabilidade do parque que decorre dos próprios factores de vulnerabilidade identificados nos Censos 2001, passíveis

de serem directamente contemplados na metodologia de avaliação de danos de Giovinazzi & Lagomarsino (iii) as tipologias FEMA & NIBS, não sendo pré-definidas, foram construídas por forma a serem adequadas às características do parque habitacional, o que se revelou uma tarefa complexa.

Sobre os modelos de danos, é reconhecido que a metodologia FEMA & NIBS é a que apresenta os procedimentos mais sofisticados para estimar os danos estruturais causados por sismos em edifícios, mas que ao contrário das metodologias estatísticas, é de difícil calibração principalmente para estruturas de alvenaria, que apresentam processos construtivos que variam no tempo e no espaço, em Portugal Continental.

Avaliando globalmente as vantagens e desvantagens dos dois grandes conjuntos de metodologias pode afirmar-se que na passagem da abordagem mecanicista para a estatística se perde o detalhe da modelação física e matemática do comportamento estrutural [Braga *et al.*, 1982], mas, em contrapartida aumenta a capacidade de tratamento de amostras de grandes dimensões e a capacidade de validar os modelos através da observação de danos em grandes populações de estruturas.

Propõe-se, para trabalho futuro, a implementação de uma abordagem que permita estabelecer a ponte entre as duas categorias de modelos de danos. Mais precisamente pretende calibrar-se os métodos mecanicistas com base na informação providenciada pelos métodos estatísticos, ou seja, com os resultados dos levantamentos de danos após sismos Europeus e com a fragilidade subjacente à escala EMS-98. Operacionalmente, esta calibração passa pelo ajuste dos parâmetros das curvas de capacidade e/ou fragilidade do modelo mecanicista minimizando o erro entre matrizes de probabilidade de dano obtidas por métodos mecanicistas e estatísticos. Refira-se que a abordagem proposta já foi iniciada, tendo-se desenvolvido os necessários programas de cálculo. Porém, estes necessitam ainda de ser testados e explorados.

Para terminar fez-se uma breve apreciação dos modelos de avaliação de perdas humanas, reconhecendo-se, como aliás já tinha sido previsto no capítulo 2, que estes modelos serão sempre afectados por um elevado grau de incerteza. Espera-se que a recolha sistemática de informação em sismos mais recentes venha a contribuir para a diminuição dessa incerteza.



## 6. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS SÍSMICOS

### 6.1. Introdução

Constituem objectivos deste capítulo a apresentação da versão mais recente do programa de simulação de cenários sísmicos do LNEC, a descrição do trabalho conducente à sua aferição em termos de danos no edificado e perdas humanas, e a simulação das perdas resultantes do efeito de uma acção sísmica semelhante à de eventos ocorridos no passado sobre os elementos em risco actuais.

O programa de simulação de cenários sísmicos, integrado num Sistema de Informação Geográfica (SIG), constitui uma ferramenta privilegiada para modelar, numa qualquer parcela do Continente Português, a acção sísmica, os danos no edificado, as perdas humanas e as perdas económicas em consequência de um cenário sísmico de ocorrência especificado. Ao longo deste capítulo o programa de simulação de cenários sísmicos será designado, muitas vezes, de *Simulador de Cenários Sísmicos* ou simplesmente de *Simulador*.

Na secção 6.2 apresenta-se o programa de simulação de cenários sísmicos e efectua-se uma breve retrospectiva do seu desenvolvimento evidenciando os principais contributos do presente trabalho. Descrevem-se os dados e procedimentos utilizados pelo programa, bem como os resultados que produz. Na mesma secção visualiza-se, sinteticamente, a sua forma de operar, mostrando-se um exemplo da simulação de um cenário sísmico para opções seleccionadas.

Os sismos ocorridos no passado foram alvo de pesquisa dirigida aos quantitativos dos respectivos danos e perdas, a fim de comprovar a validade das estimativas produzidas pelo Simulador relativas aos danos no edificado e às perdas humanas (secção 6.3). Dada a exiguidade desses levantamentos em Portugal Continental, foi necessário recorrer a sismos históricos, adequando-se a vulnerabilidade dos elementos em risco à da época em análise.

A secção 6.4 dedica-se a apresentar as simulações de alguns cenários sísmicos para os elementos em risco actuais. Para o efeito, foram escolhidas acções sísmicas semelhantes às dos sismos emblemáticos de 1755 e de 1909, sintetizando-se os respectivos resultados, exemplificando-se a distribuição geográfica de danos e perdas para algumas opções de simulação e comparando-se a mortalidade obtida com a observada em sismos ocorridos na última década ao nível mundial.

Ao longo do capítulo efectua-se ainda uma análise crítica dos valores globais das estimativas, da sua distribuição geográfica e das potencialidades e limitações do Simulador. A análise incidiu sobre os cenários de risco sísmico do passado e actuais.

O capítulo termina na secção 6.5 com uma apreciação do desempenho dos vários modelos implementados e do Simulador em geral, apresentando-se também alguns desafios de desenvolvimento devotados ao aperfeiçoamento do Simulador de Cenários Sísmicos.

## 6.2. Simulador de Cenários Sísmicos

### 6.2.1. Apresentação

O Simulador de Cenários Sísmicos existente no LNEC é constituído por um pacote de rotinas, desenvolvidas na linguagem de programação *FORTRAN 90* e integrado num Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permite estimar a acção sísmica no substracto rochoso e à superfície, os danos no edificado, as perdas humanas e as perdas económicas para um cenário sísmico de ocorrência pré-definido ou fornecido pelo utilizador.

Optou por se desenvolver as rotinas de cálculo científico em *FORTRAN 90* devido à complexidade de algumas delas, à possibilidade de utilização de rotinas do compilador<sup>1</sup> e à rapidez da sua execução<sup>2</sup>. A rotina principal, que invoca cerca de 50 subrotinas, foi compilada como *Dynamic Link Library* (DLL) o que permite a sua invocação dinâmica por qualquer aplicação desenvolvida para plataformas *WINDOWS*, no presente caso o *ArcView GIS 3.2* comercializado pela ESRI. A integração da aplicação externa (DLL) no SIG exigiu o desenvolvimento de rotinas adicionais codificadas em *Avenue*, que constitui a linguagem de programação orientada por objectos incluída no *ArcView 3.2*.

O Simulador possui uma grande versatilidade em termos de metodologias e dados, devido à sua estrutura modular, facilidade de actualização e integração num SIG. O Simulador beneficia de um vasto leque de potencialidades disponibilizadas pelo SIG, nomeadamente a possibilidade de agregar informação georeferenciada a bases de dados de informação alfanumérica e imagens, e a capacidade de utilização de várias ferramentas de visualização e análise espacial.

Os elementos em risco, que constituem dados de entrada para o Simulador, encontram-se armazenados em bases de dados que incluem a informação apurada nos Censos 91 e 2001 sobre o edificado residencial e seus ocupantes. A informação está organizada em função das variáveis relevantes para a caracterização da vulnerabilidade dos elementos em risco e referenciada geograficamente.

A unidade elementar de análise do programa de Simulação é a freguesia, podendo este operar para qualquer região de Portugal Continental. Desta forma, no estado actual de desenvolvimento do sistema o recurso ao processamento paralelo é uma tarefa facilmente alcançável.

A figura 6.1 representa o diagrama de fluxo do Simulador em que se evidencia a sua estrutura organizada em cinco módulos principais, os dados necessários à sua operação, os

---

<sup>1</sup> Rotinas *IMSL* do compilador *COMPAQ VISUAL FORTRAN 6.5*.

<sup>2</sup> Na sua versão actual, num computador dotado de um processador Pentium II a 1 GHz e escolhendo as opções mais complexas de avaliação da acção sísmica e danos no edificado, o Simulador é executado em 40 segundos para as 53 freguesias do concelho de Lisboa e em cerca de 50 minutos para as 4037 freguesias de Portugal Continental.

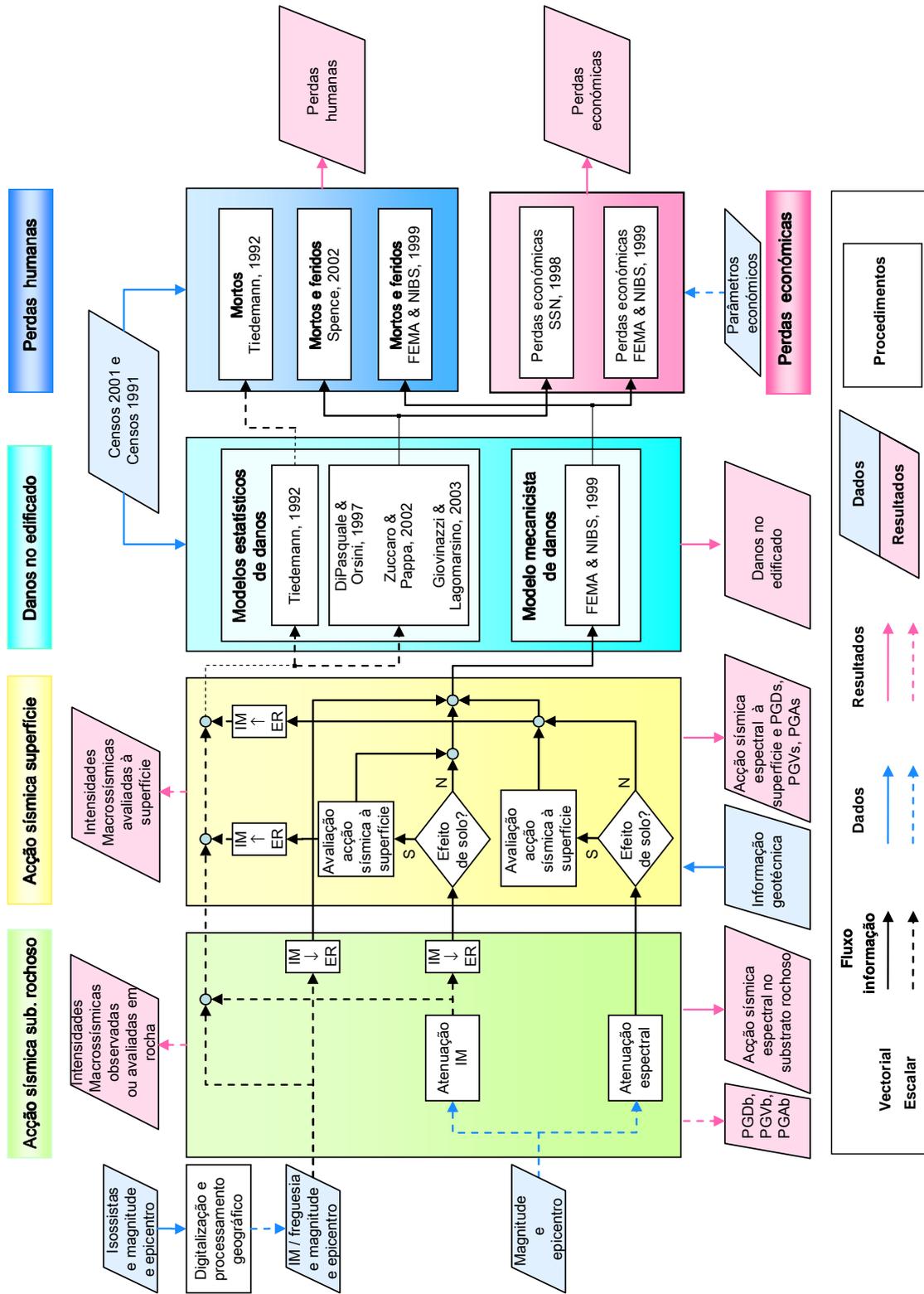


Figura 6.1 – Fluxograma do Simulador de Cenários Sísmico (IM = Intensidade Macrosísmica; ER = Espectro de Resposta).

modelos e os resultados que fornece. Detalhes sobre os dados, procedimentos e resultados podem ser encontrados nas secções 6.2.3 e 6.2.4.

Estes cinco módulos funcionam de forma estanque e sequencial, no sentido em que: (i) os dados e os modelos subjacentes a cada módulo podem ser actualizados independentemente e (ii) os resultados de um determinado módulo alimentam o módulo seguinte, podendo, em algumas situações, ser armazenados obviando serem recalculados.

Assim se compreende que o Simulador tenha beneficiado de competências complementares de diversas áreas de conhecimento, desde a sismologia, à geotecnia, às probabilidades e estatística e à engenharia de estruturas.

### **6.2.2. História do desenvolvimento do Simulador**

O Simulador teve a sua génese num projecto de investigação patrocinado pelo Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil (SNBPC) que tinha como principais objectivos caracterizar a vulnerabilidade e estabelecer os danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos concelhos limítrofes de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras [Anderson *et al.*, 2004; Campos Costa *et al.*, 2004; Carvalho *et al.*, 2002a, Coelho *et al.*, 1999b e Sousa *et al.*, 2004].

A participação do LNEC neste projecto conduziu ao desenvolvimento de um Simulador de Cenários Sísmicos para ser integrado no Sistema de Informação Geográfica do SNBPC. Paralelamente, foi desenvolvido no LNEC um Sistema de Informação Geográfica para testar e operar o referido Simulador. Nessa fase inicial do seu desenvolvimento, o Simulador operava exclusivamente na Área Metropolitana de Lisboa (AML) e concelhos limítrofes, integrando bases de dados com informação sobre o parque habitacional e seus ocupantes apurada nos Censos 91 [Carvalho *et al.*, 2002a]. A primeira versão do Simulador incluía quatro dos cinco módulos actualmente disponíveis, tendo o módulo de avaliação das perdas económicas sido desenvolvido à posteriori. Nos restantes módulos apenas se encontravam disponíveis algumas das opções de cálculo existentes actualmente. Exceptua-se o módulo de avaliação da acção sísmica à superfície que não sofreu actualizações desde a primeira versão do Simulador. A informação de natureza geotécnica necessária à execução deste módulo foi recolhida e processada pelo Departamento de Geotecnia do LNEC [Vozzone *et al.*, 2002], no contexto do referido projecto do SNBPC, circunscrevendo-se actualmente, tal como então, às 277 freguesias da AML e concelhos limítrofes.

Posteriormente, no âmbito do presente trabalho de doutoramento, o Simulador tem vindo a ser actualizado continuamente em termos de (i) dados, (ii) âmbito geográfico, (iii) procedimentos de cálculo, (iv) rotinas internas do SIG e (v) aferição dos resultados. Em resumo, as actualizações efectuadas consistiram em:

- i.
  - a) Incluir bases de dados apuradas nos Censos 2001 com informação sobre a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional e seus ocupantes e recorrendo às freguesias do território de Portugal Continental como unidades elementares de análise.
  - b) Adicionar uma base de dados de intensidades macrossísmicas contendo a acção sísmica relativa a 18 «eventos» diferentes, discriminada também pelas freguesias de Portugal Continental.
- ii. Generalizar a aplicação do Simulador a qualquer região específica de Portugal Continental, tendo-se estabelecido um procedimento expedito para pré-definir uma região para análise. Este procedimento envolveu a actualização das rotinas de *FORTRAN 90* e a utilização das capacidades de produção de mapas do *ArcView GIS*. Actualmente estão pré-definidas 7 regiões de Portugal Continental onde é possível simular automaticamente cenários sísmicos de ocorrência.
- iii.
  - a) Inserir novas metodologias de modelação de danos fundamentadas na inspecção de um grande número de estruturas após um sismo, ou seja, baseadas em estatísticas de danos de natureza fundamentalmente empírica. Caso se opte por uma dessas metodologias, a de Giovinazzi & Lagomarsino, o Simulador permite considerar o estado de conservação dos edifícios do parque habitacional.
  - b) Programar novas metodologias de avaliação de perdas humanas, publicadas na literatura internacional, para contemplar a reconhecida dispersão dos resultados deste tipo de avaliações.
  - c) Incorporar no Simulador um novo módulo de avaliação de perdas económicas integrando metodologias adequadas aos modelos de danos disponíveis.
- iv. Alterar o SIG, ao nível das rotinas e dados, de forma a incluir todas as actualizações atrás referidas e simplificar a sua operação por utilizadores não programadores do Simulador.
- v. Aferir os resultados do Simulador apelando à sua comparação com os efeitos de sismos que no passado afectaram Portugal Continental. Algumas das opções introduzidas no Simulador são orientadas para este processo de aferição, nomeadamente a pré-definição de algumas regiões do território continental para a análise das simulações. Na secção 6.3 confrontam-se os resultados do Simulador com os quantitativos de danos e perdas recolhidos na bibliografia sobre sismos que afectaram o Continente Português. Importa sublinhar que, para se obter os resultados apresentados nessa secção, foram necessárias inúmeras iterações, em particular ao nível dos parâmetros de algumas metodologias, como sejam a opção FEMA & NIBS do módulo de danos no edificado e as opções FEMA & NIBS e Coburn & Spence do módulo de perdas humanas.

### 6.2.3. Dados

O Simulador utiliza duas categorias de dados de entrada, os fornecidos pelo utilizador e os dados internos à aplicação.

O utilizador necessita apenas de fornecer a magnitude e o epicentro do cenário sísmico de ocorrência que pretende modelar. Alternativamente, não desejando simular a acção sísmica deverá fornecer a magnitude, o epicentro do cenário de ocorrência e as intensidades macrossísmicas nas freguesias da região em análise. O utilizador deverá ainda responder a diversas questões sobre os dados e as opções a utilizar nos diferentes módulos do Simulador.

Descriminam-se de seguida os dados internos ao Simulador de Cenários Sísmicos incluídos em cada módulo.

#### ***Módulo da acção sísmica no substracto rochoso***

São dados internos ao Simulador os parâmetros de cenários sísmicos de ocorrência pré-definidos (cenário de 1531, 1755, 1858, 1909 e 1969), tais como a magnitude, o hipocentro e o instante de ocorrência. O Simulador também inclui as zonas de geração sísmica delineadas por Sousa [1996] para Portugal Continental e a profundidade média dos hipocentros em cada zona de geração.

#### ***Módulo da acção sísmica à superfície***

Este módulo inclui duas bases de dados:

1. Uma base de intensidades macrossísmicas relativa a 18 «eventos» diferentes armazenando a respectiva acção sísmica estimada para cada uma das freguesias de Portugal Continental. A construção desta base de dados exigiu um pré-processamento de informação exterior ao Simulador, tendo-se estabelecido um procedimento automático que aproveita as capacidades de análise de imagem e de análise espacial disponibilizadas pelo *ArcView SIG*. Para o efeito, as intensidades macrossísmicas por freguesia foram estimadas a partir das isossistas de sismos do passado, de cartas de perigosidade sísmica e de intensidades avaliadas em localidades em que esses eventos se fizeram sentir [Choffat & Bensaúde, 1913; Moreira, 1984; Paula, 1996; Pereira de Sousa, 1919-1932 e Sousa & Oliveira, 1991]. Foram ainda adicionados «eventos» com intensidade macrossísmica constante em todas as freguesias de Portugal Continental para permitir estudar a vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco de qualquer região deste território.
2. Uma bases de dados que armazena o conjunto de parâmetros de natureza geotécnica necessários à caracterização de perfis geotécnicos. Estes perfis são utilizados para simular as alterações na acção sísmica à superfície induzidas pela presença de formações superficiais recentes do ponto de vista geológico [Carvalho et al., 2002a]. Como foi atrás referido esta informação geotécnica encontra-se disponível no Simulador apenas para as 277 freguesias da AML e concelhos limítrofes.

#### ***Módulo dos danos no edificado***

Este módulo recorre a uma base de dados com os quantitativos habitacionais (edifícios, alojamentos familiares e colectivos) apurados nos Censos 91 e 2001 para todas as freguesias de Portugal Continental, discriminados pelos factores de vulnerabilidade identificados nos

Censos (ver capítulo 4). Os quantitativos habitacionais apurados nos Censos 91 só podem ser utilizados pelo modelo de danos mecanicista, pois a classificação da vulnerabilidade deste parque apenas foi efectuada de acordo com as tipologias deste modelo. O utilizador poderá ainda optar por simular os danos no edificado escolhendo duas alternativas: (i) os quantitativos habitacionais apurados nos Censos 2001 ou (ii) os mesmos quantitativos habitacionais, mas assumindo a hipótese de que todos pertencem a uma tipologia única seleccionada. Esta última opção foi construída para permitir a aferição do Simulador para cenários históricos, possibilitando a escolha da tipologia mais vulnerável do parque de 2001 (ver secção 6.3).

### ***Módulo das perdas humanas***

Este módulo utiliza uma base de dados com os quantitativos populacionais apurados nos Censos 91 e 2001, para todas as freguesias de Portugal Continental, discriminados pelos factores de vulnerabilidade dos edifícios em que residem os indivíduos em risco.

### ***Módulo das perdas económicas***

São dados internos do Simulador os parâmetros necessários ao funcionamento das rotinas de avaliação de perdas económicas, nomeadamente a superfície média dos alojamentos e o seu valor de reposição para efeitos de monetarização das perdas. A superfície média dos pavimentos dos alojamentos em risco foi recolhida com um nível de análise geográfica das NUTS II [INE, 2001a] Para valores de reposição tomaram-se os preços indicativos da construção estabelecidos pela Portaria nº 1062-C/2000 de 31 de Outubro que assume os valores de 461,4, 509,3 e 582,6 Euros/m<sup>2</sup> para o ano de 2001. Estes valores distintos correspondem a três zonas do País que agrupam determinados concelhos, de acordo com o referido no nº 2 do artigo 7º do Decreto-Lei nº13/86 de 23 de Janeiro. Os concelhos com o preço de construção mais elevado correspondem às sedes de distrito e a alguns concelhos das Áreas Metropolitanas de Lisboa e Porto.

## **6.2.4. Procedimentos e resultados**

### ***Módulo da acção sísmica no substrato rochoso***

Este módulo contempla duas opções de modelação:

1. Os modelos de atenuação de intensidade macrossísmica desenvolvidos por Sousa [1996] a partir da informação macrossísmica de sismos históricos severos e de sismos instrumentais que afectaram o Continente Português (secção 3.3.4). Com estes modelos o Simulador estima a intensidade macrossísmica nas sedes de freguesia de Portugal Continental, assumindo condições locais semelhantes a rocha. No caso particular dos cinco cenários de ocorrência pré-definidos não se utilizaram as leis de atenuação desenvolvidas por Sousa [1996] para as zonas de geração em que a autora dividiu o território Continental. Alternativamente, optou por se desenvolver leis de atenuação específicas para cada um dos cinco cenários de ocorrência pré-definidos, de forma a ser

possível reproduzir uma acção macrossísmica tão próxima quanto possível da ocorrida nos sismos em que se baseiam estes cenários.

2. A segunda opção constitui a alternativa necessária para o caso do utilizador pretender modelar o efeito dos solos, ou ter acesso ao modelo de danos mecanicista. Nesta opção a acção sísmica é modelada espectralmente e os resultados do Simulador incluem os espectros de potência de acelerações, os espectros de resposta e os valores de pico do movimento sísmico em deslocamento, velocidade e aceleração, estimados ao nível do substrato rochoso da sede de cada freguesia. São dois os modelos utilizados para avaliar a acção sísmica de forma espectral:

a) O modelo de atenuação espectral, proposto por Bommer *et al.* [1998] e Bommer & Elnashai [1999], baseado em dados instrumentais Europeus de movimentos sísmicos intensos, considerados representativos dos processos de atenuação no nosso território, no caso de cenários sísmicos de ocorrência próximos e de magnitude baixa a moderada.

b) A acção sísmica modelada em intensidades macrossísmicas [Sousa, 1996] convertidas posteriormente em espectros de resposta pela formulação proposta por Trifunac & Lee [1989]. Importa sublinhar que esta deverá ser a opção escolhida para modelar a acção de sismos afastados de magnitude elevada, uma vez que o modelo de Bommer *et al.* [1998] e Bommer & Elnashai [1999] não reproduz correctamente o movimento deste tipo de desastres naturais (ver secção 3.3.4).

Ainda sobre a forma de utilização dos modelos de atenuação no Simulador refira-se que tanto o modelo de atenuação macrossísmico como o espectral contempla três tipos de condições geológicas locais. No entanto, apenas se incluíram no Simulador os parâmetros dos modelos de atenuação relativos a condições locais da categoria rocha. Tal opção é coerente com os objectivos do presente estudo, que incidem sobre as estimativas de perdas para todo o Continente Português, sendo para o efeito razoável utilizar uma única descrição das propriedades geológicas dos locais e, em casos específicos, modelar o efeito dinâmico dos solos. Para efectivar esta última modelação é também necessário conhecer previamente as características do movimento sísmico no substrato rochoso, como se verá de seguida.

### ***Módulo da acção sísmica à superfície***

Se o efeito dos solos for tomado em consideração, a unidade elementar de análise dos resultados deixa de ser a freguesia, passando a ser uma unidade geológico-geotécnica em que se subdividem algumas freguesias.

Neste módulo determina-se, para as unidades geológicas-geotécnicas, os espectros de potência e de resposta de aceleração à superfície. Para o efeito tem-se em consideração os espectros de potência no substrato rochoso e as características das formações superficiais que induzem alterações no movimento sísmico. Na realidade, para aligeirar o esforço computacional envolvido na modelação do comportamento não linear dos solos, e também dos edifícios, o Simulador, desde a sua versão inicial desenvolvida para o SNBPC, representa

internamente o movimento sísmico por um processo estocástico estacionário equivalente. Detalhes sobre a modelação do efeito dos solos, sobre o processo iterativo de conversão de espectros de resposta numa função de densidade espectral de potência e vice-versa podem ser encontrados em Carvalho *et al.* [2002a].

Outros resultados da execução deste módulo são os valores de pico do movimento sísmico, em deslocamento, velocidade e aceleração, à superfície.

Caso se pretenda utilizar modelos de danos estatísticos, os valores de pico do movimento deverão ser convertidos em intensidades macrossísmicas estando implementados computacionalmente diversos modelos de conversão [Gutenberg & Richter, 1942; Newmark & Rosenblueth, 1971 e Trifunac & Brady, 1975]. Estas alternativas são internas ao Simulador não sendo disponibilizadas ao utilizador através de janelas de diálogo.

Quando a acção sísmica é avaliada directamente à superfície, nomeadamente pela utilização das intensidades macrossísmicas observadas num sismo, é omitida a modelação dinâmica do efeito dos solos. Na eventualidade de se pretender modelar os danos pela metodologia FEMA & NIBS é necessário, mais uma vez, converter as intensidades macrossísmicas em espectros de resposta [Trifunac & Lee, 1989] e fornecer a magnitude do cenário de ocorrência e a sua distância em relação ao local em análise.

### ***Módulo dos danos no edificado***

O módulo dos danos no edificado contempla duas vias de modelação, a primeira baseada em modelos estatísticos originários de levantamentos de danos de sismos Europeus e mundiais e a segunda baseada no modelo mecanicista FEMA & NIBS. Estão assim disponíveis cinco opções, identificadas no fluxograma 6.1, para modelar os danos no edificado:

1. A opção Tiedemann (secção 2.4.4.5) que independentemente do modelo de danos escolhido, e devido à sua simplicidade, é sempre executada para estimar os danos no edificado. Esta opção tem como resultados a estimativa da razão de danos médios (*MDR*) por unidade geográfica e por tipologia, o valor esperado da razão de danos médios para a região analisada e os valores máximo e mínimo de *MDR* para a região analisada.
2. Ainda dentro dos modelos estatísticos de danos as opções Di Pasquale & Orsini, Zuccaro & Papa e Giovinazzi & Lagomarsino (secção 2.4.4.4 e 2.4.4.3) têm como resultados a estimativa do número e percentagem de edifícios nos estados de dano definidos na escala macrossísmica EMS-98, por unidade geográfica e tipologia, e os totais para a região analisada. No caso da opção Giovinazzi & Lagomarsino o estado de conservação dos edifícios recenseados em 2001 é automaticamente considerado, sendo ainda possível optar por simulações em que se assume a hipótese de todo o parque habitacional se encontrar num estado de conservação Bom ou Mau, para estudar o efeito deste factor de vulnerabilidade.

3. Na opção de modelação mecanicista FEMA & NIBS os resultados incluem as estimativas do número e percentagem de edifícios nos estados de dano Ausência de Dano, Dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total, por unidade geográfica e tipologia, e os totais são sintetizados para a região analisada.

### ***Módulo das perdas humanas***

São contempladas três opções de modelação:

1. A opção Tiedemann (secção 2.5.4) que é sempre executada para estimar perdas humanas tendo como resultados a taxa e o número de mortos por unidade geográfica e os totais reunidos para a região analisada.
2. A opção Coburn & Spence (secção 2.5.3) que também é sempre executada independentemente do modelo de danos escolhido.
3. A opção FEMA & NIBS (secção 2.5.2) que apenas é executada se na modelação dos danos se optar pela via mecanicista.

O tipo de resultados destas duas últimas opções é semelhante sendo estimados o número e a percentagem de pessoas que não sofre ferimentos, os Feridos Ligeiros, os que exigem Cuidados Hospitalares, os Feridos Graves e os Mortos. Estes resultados são obtidos por unidade geográfica e os totais são compilados para a região analisada.

### ***Módulo das perdas económicas***

São estimadas as perdas económicas directas, em consequência dos danos no edificado habitacional, em termos da área habitável perdida para o cenário sísmico de ocorrência considerado.

Os resultados são fornecidos em termos absolutos e percentuais, em cada freguesia ou unidade geológica-geotécnica, e agregados para toda a região analisada. As perdas globais são convertidas em percentagem do PIB de 2001 para facilitar a percepção dos valores envolvidos.

Os modelos subjacentes a estas estimativas são compatíveis com a escolha do modelo de danos no edificado (ver quadro 2.9 na secção 2.6.2). Nesse sentido, no caso dos modelos de danos estatísticos aplicou-se ao modelo de perdas económicas utilizado pela Protecção Civil Italiana [Lucantoni *et al.*, 2002 e SSN, 1998], enquanto que para o modelo de danos mecanicista se utilizou modelo de perdas económicas FEMA & NIBS, embora com algumas simplificações ao nível dos dados utilizados.

### ***Sistema de Informação Geográfico***

Ao nível do SIG foram desenvolvidas, em *Avenue*, três rotinas que operam sobre os dados, o programa (DLL) e os resultados, e que permitem aliar ao Simulador algumas potencialidades de manuseamento de informação espacial do *ArcView*, nomeadamente as suas capacidades de produção de mapas:

1. A primeira permite ao utilizador introduzir os dados e especificar as opções necessárias à operação do Simulador. Viabiliza-se deste modo uma interacção simples entre o Simulador e o utilizador, em que este transmite ao sistema, através de caixas de diálogo sequenciais, os dados que pretende utilizar e as opções de modelação adoptadas (ver figura 6.2). O SIG encontra-se protegido contra a escolha de alternativas muito demoradas, que deverão ser reconfirmadas, ou contra opções incompatíveis. São exemplo de opções incompatíveis a modelação do efeito dos solos e a escolha da acção sísmica definida por intensidades macrossísmicas observadas à superfície; nesse caso o sistema emite uma mensagem de alerta permitindo ao utilizador interromper a simulação ou escolher outras alternativas.
2. A segunda, evocada automaticamente pela primeira, tem a finalidade de integrar a aplicação externa (DLL) no ambiente do SIG e executá-la.
3. A terceira tem por objectivo automatizar a síntese dos resultados e a produção de mapas. Sobre os resultados da execução da DLL esta rotina constrói automaticamente seis *vistas* no projecto de *ArcView*, uma por cada módulo do Simulador, com excepção do módulo de danos no edificado. Para este módulo são geradas duas *vistas*, uma relativa aos danos absolutos e outra relativa aos danos percentuais. Em cada uma destas *vistas* são construídos vários *temas*; a cada *tema* corresponde a produção automática de um mapa, gerando-se um máximo de 24 mapas por cada execução do Simulador de Cenários Sísmicos, dependendo das opções seleccionadas.

Estas rotinas são disponibilizadas ao utilizador por intermédio de dois *botões* adicionados à interface do *ArcView GIS*:

1. O botão *SCS*  que executa sequencialmente as três rotinas mencionadas.
2. O botão *MAPAS*  que executa a terceira rotina sobre resultados da DLL já existentes no sistema.

### 6.2.5. Exemplo de operação do Simulador

Na figura 6.2a) a g), exemplifica-se um modo possível de operação do Simulador e um quadro síntese dos seus resultados globais (figura 6.2h). A simulação escolhida incidiu sobre a região de Portugal Continental, os elementos em risco apurados nos Censos 2001 e o cenário sísmico de ocorrência representado pelas intensidades macrossísmicas do sismo de 1755.

A figura 6.3 ilustra os resultados do Simulador exibindo o conjunto das *vistas* disponíveis no SIG, sendo visíveis apenas alguns dos *temas* produzidos. As *vistas* identificadas por números correspondem aos dados internos ao Simulador enquanto que as identificadas por letras correspondem aos resultados.

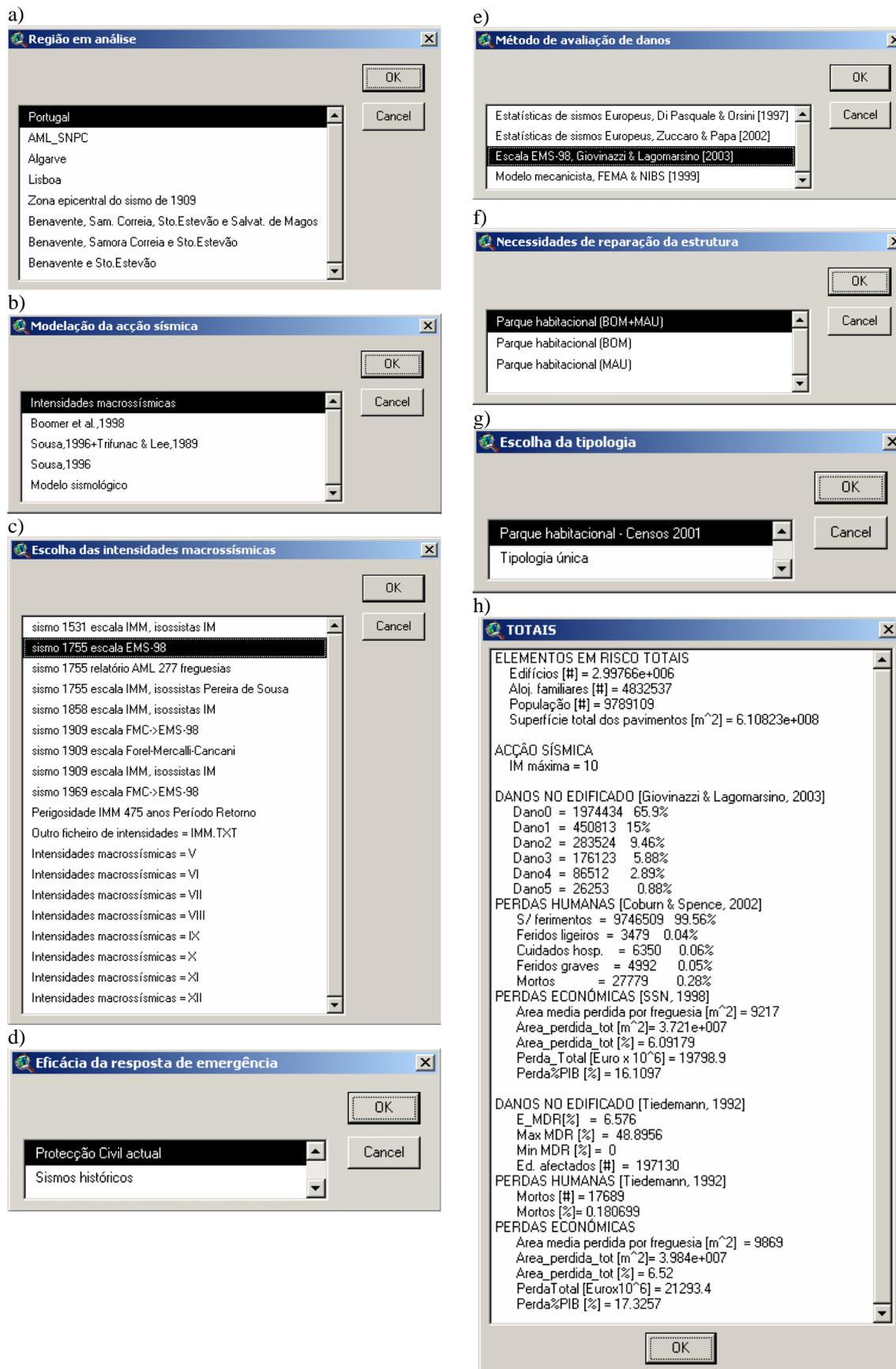


Figura 6.2 – (a - g) Exemplo de operação e (h) resultados globais do Simulador.

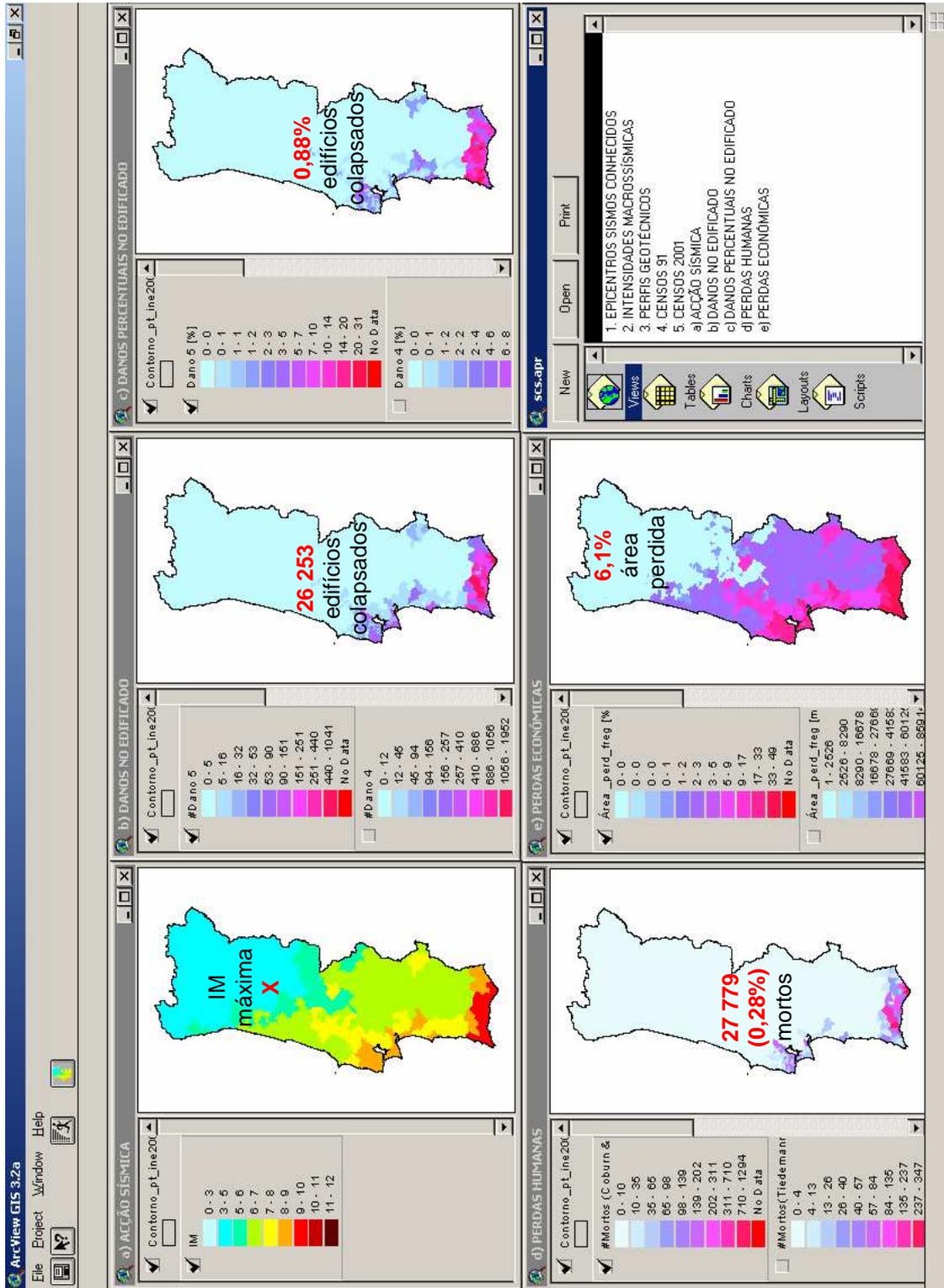


Figura 6.3 – Resultado da operação do Simulador de Cenários Sísmicos integrado num SIG.

Como na simulação escolhida as intensidades macrossísmicas já são observadas à superfície não há necessidade de modelar o efeito dos solos.

A opção pelo modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino e pelos elementos em risco apurados nos Censos 2001, permite considerar o factor de vulnerabilidade ligado ao estado de conservação do edificado e escolher uma entre três hipóteses contempladas no Simulador relativas a esta variável.

Uma vez escolhido este modelo de danos, a consulta do fluxograma da figura 6.1 permite verificar que as perdas humanas serão estimadas pelas metodologias Tiedemann e Coburn & Spence. Nesta estimativa assumiu-se que 100% da população se encontra nas suas habitações no instante do sismo.

### **6.3. Aferição dos resultados do Simulador**

#### **6.3.1. Escolha dos cenários reais**

As descrições dos danos e perdas em consequência de sismos do passado constituem ensinamentos importantes para a minoração dos efeitos de eventos catastróficos e para a aferição de modelos que têm por objectivo reproduzir as situações ocorridas em sismos do passado e prever os danos e as perdas em sismos que eventualmente possam vir a ocorrer no futuro.

Para aferir os resultados do Simulador é necessário, por um lado, que ocorram sismos causadores da danos e perdas e, por outro, que nesses abalos destrutivos se procedam a levantamentos pós-sismo. Preferencialmente, esses levantamentos devem incluir inspecções a estruturas danificadas, investigações sobre o número de mortos e feridos, explicitar a ausência de danos e quantificar a população presente em cada localidade, de forma a ser possível produzir estatísticas de danos em edifícios e estatísticas de perdas humanas.

O terramoto de 1755 foi um marco importante na história sísmica de Portugal e da Europa. Este sismo alterou significativamente a forma de encarar estes fenómenos naturais, tendo também surgido critérios de maior objectividade e rigor nos processos de recolha de informação e no que concerne aos levantamentos de danos pós-sismo.

Efectivamente, como consequência do sismo de 1755, e por ordem do Marquês de Pombal, foi elaborado o primeiro questionário macrossísmico<sup>3</sup> com bases científicas para

---

<sup>3</sup> «Terramoto de 1755. Respostas dos parochos de muitas terras do Reino aos interrogatórios que sobre o mesmo lhes foram feitos.» Arquivo do Ministério do Reino, Maço 638. 566 documentos manuscritos. 1756, Arquivo Nacional da Torre do Tombo.

estudar os efeitos de uma catástrofe sísmica. Este questionário era composto por 13 questões que permitiram caracterizar o evento do ponto de vista macrossísmico, nomeadamente o seu instante de ocorrência, os efeitos do sismo sobre as pessoas e o seu ambiente, sobre as estruturas e sobre a natureza. O inquérito solicitava ainda informação de natureza tão abrangente como o recenseamento da população à época da catástrofe, memórias sobre sismicidade histórica, descrições dos efeitos das réplicas e as providências tomadas pelas autoridades na sequência do abalo.

Entre os sismos do passado importa mencionar, para além do de 1755, os de 26 de Janeiro de 1531 [Henriques *et al.*, 1998] causador de alguns milhares de mortos na região de Lisboa e o de 11 de Novembro de 1858 que originou 8 mortos na região de Setúbal [Moreira, 1984].

Entre os sismos recentes, o de 1909 foi o que no século passado, teve maior impacto destrutivo no Continente Português, sendo seguido pelo de 1969. O número de vítimas mortais é conhecido em ambos os eventos, tendo ocorrido 46 mortes no primeiro [Moreira, 1984] e 13 no segundo [Quintino, 1970]. No entanto, apenas existem estatísticas de danos referentes ao sismo de 1909 e numa região confinada em torno do epicentro.

Dada a exiguidade de sismos severos recentes em Portugal Continental o Simulador foi aferido pela sua resposta face a cenários sísmicos de ocorrência semelhantes aos de 1755, 1909 e 1969.

Para evitar as fontes de erros introduzidas pela modelação da acção sísmica todos os cenários foram simulados utilizando a acção macrossísmica observada nos sismos investigados.

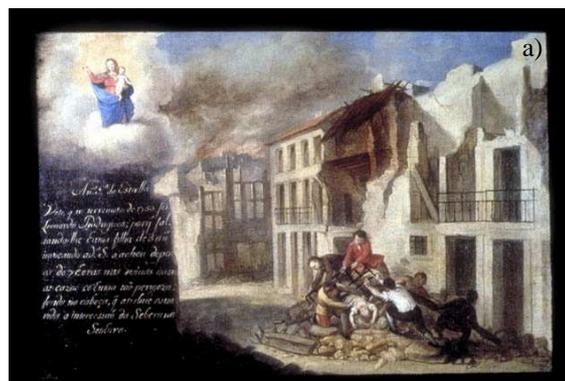
Em qualquer dos cenários, as características do parque habitacional da época dos eventos diferem das actuais, sendo obviamente essa diferença mais acentuada nos sismos de 1755 e 1909.

Para atenuar essas diferenças, o Simulador foi aplicado nestes dois cenários às tipologias mais vulneráveis do parque habitacional de 2001 e os resultados foram analisados em termos percentuais. Viabilizou-se deste modo a calibração dos parâmetros destas tipologias, mas unicamente no caso da metodologia de avaliação de danos FEMA & NIBS. De facto, nos métodos de base estatística que utilizam matrizes de probabilidade de dano os parâmetros envolvidos são fixos, não sendo possível adequá-los às especificidades do parque habitacional Português. Nas metodologias estatísticas apenas se pode efectuar uma classificação adequada da vulnerabilidade do parque e, para os cenários estudados, escolher a metodologia que melhor reproduz os danos.

Nas três secções que se seguem simulam-se cenários sísmicos semelhantes aos de 1755, 1909 e 1969. O início de cada secção é ilustrado por extractos de documentos coevos ou por testemunhos presenciais do evento. Sempre que possível esses textos são secundados por imagens que lhes correspondem.

### 6.3.2. Sismo de 1755

Foy este no dia de Todos os Santos, primeiro de Novembro do dito anno, pelas nove para as dez horas da manhã, [...] e em meyo quarto de hora, que durou seu movimento, lançou por terra a mayor parte dos Edificios da Corte, destruyou muitas terras do Reyno, fez semelhantes estragos nas Espanhas, e muito mayores na Berberia, Põz em grande pavor a todos estes Reynos Occidentaes, porque erão tão grandes os balanços da terra, que cada hum dos viventes, na parte em que se achava, entendia que se subvertia<sup>4</sup>.



Parece-me também que o Terremoto lançou por terra a decima parte das casas de Lisboa, deixou inhabitaveis mais de duas partes das que ficarão de pé, ficando habitáveis somente ainda menos d'uma terça parte das casas [...]<sup>5</sup>



Figura 6.4 – Sismo de 1755 em Lisboa. Imagens NISEE [2004].

- a) Salvamento de uma criança. Edifícios danificados pelo sismo e incêndio. Originais no Museu da Cidade de Lisboa, pintura do séc. XVIII, Lisboa, Portugal.
- b) Lisboa vista de leste durante o sismo de 1755. Efeitos exagerados do incêndio e dos danos. Pessoas em fuga. Gravura em cobre, 1756, Holanda.
- c) Edifícios colapsados e tombados em Lisboa. Pessoas *engolidas* por fendas. Originais no Museu da Cidade de Lisboa, gravura em cobre do séc. XVIII, Lisboa, Portugal.
- d) Sismo de 1755 em Lisboa. Pessoas sob os escombros. Impresso por Jan Kamemicky, 1755, Original no Museu Nacional da República Checa.

<sup>4</sup> Sacramento, Fr. António do, *Exhortação consolatória de Jesus Crhisto.*, Lisboa, 1757, pp. 16-17.

<sup>5</sup> Moreira de Mendonça [1758] citado por Pereira de Sousa [1919-1923].

Os efeitos do terramoto de 1755 encontram-se amplamente documentados em variadíssimos estudos, dos quais são exemplo Baptista, 1998; Barata *et al.*, 1989, Farinha, 1997, Fonseca, 2004, França, 1989, Levret, 1991; Mézcua & Solares, 1983, Moreira, 1984, Oliveira, 1977, Oliveira, 1986, Oliveira, 1988, Oliveira, 2005, Pereira de Sousa, 1919-1932, Ramos, 2002, Runa & Freire, 1989, SNPC, 1983, Solares, 2001, etc. No que toca à avaliação de danos e perdas destacam-se a *História Universal dos Terremotos* [...] de Moreira de Mendonça<sup>6</sup> que inclui um testemunho coevo da catástrofe e o trabalho de Pereira de Sousa [1919-1932] que efectuou investigações detalhadas sobre os efeitos do sismo, baseadas, principalmente nas respostas ao Inquérito Paroquial de 1756<sup>7</sup> e nas Memórias Paroquiais existentes no Arquivo Nacional da Torre do Tombo<sup>8</sup>.

O terramoto de 1755 causou danos importantes em Lisboa, na faixa litoral a sul desta cidade, no Algarve e em Marrocos. Sentiu-se nos Açores, Madeira e por quase toda a Europa, embora sem causar danos [Oliveira, 1988]. Em particular, a descrição dos efeitos do sismo na cidade de Lisboa encontra-se extremamente circunstanciada. No entanto, mesmo nesta cidade é difícil obter consenso sobre as estatísticas de danos, o número de vítimas e os números de habitantes e edifícios nela existente à data da catástrofe.

Relativamente às estatísticas globais de danos no edificado de Lisboa a maioria das fontes, inclusive Pereira de Sousa [1919-1932], remete para os valores apontados por Moreira de Mendonça. Oliveira [1988] fez um estudo detalhado dos danos em edifícios monumentais ao nível da freguesia da cidade de Lisboa, mas afirma que não existe informação suficiente para efectuar um estudo semelhante sobre o parque habitacional. Nos quadros 6.1 e 6.2 sintetizam-se as estatísticas de danos no edificado e de perdas humanas, em Lisboa, recolhidas nas fontes mais citadas.

---

<sup>6</sup> Moreira de Mendonça, J.J.; 1758. *História Universal dos terremotos que tem havido no mundo, de que ha noticia, desde a sua criação até o século presente, com uma narração individual do Terremoto do 1º de Novembro, de 1755, e noticia verdadeira dos seus effeitos em Lisboa, todo Portugal, Algarves, e mais partes da Europa, Africa, e América, aonde se estendeu: E huma dissertação phisica sobre as causas geraes dos terremotos, seus effeitos, differences, e prognosticos; e as particulares do ultimo.* Na Officina de Antonio Vicente da Silva. Lisboa. Portugal.

<sup>7</sup> O *Inquérito Paroquial* foi enviado, em 1756, por ordem do Marquês de Pombal, aos párocos das freguesias do País, tendo sido localizadas as respostas relativas aos distritos de Aveiro, Bragança, Coimbra, Évora, Guarda, Leiria, Portalegre, Santarém, Vila Real e Viseu. Infelizmente não foi possível, até hoje, encontrar as respostas ao questionário relativas aos distritos de Lisboa, Setúbal, Beja e Faro, que foram os mais afectados pelo sismo. Para colmatar essa falha e as lacunas de informação relativas a algumas freguesias destes distritos, Pereira de Sousa recorreu a outras fontes, entre elas as Memórias Paroquiais existentes no Arquivo Nacional da Torre do Tombo<sup>8</sup>. Devido à sua morte prematura Pereira de Sousa não completou os estudos sobre os efeitos do sismo nos distritos de Braga, Porto e Viana do Castelo [Runa & Freire, 1989].

<sup>8</sup> As chamadas *Memórias Paroquiais* são constituídas por 41 volumes de documentos manuscritos existentes no Arquivo Nacional da Torre do Tombo. Estes manuscritos tiveram a sua origem em três inquéritos enviados aos párocos das freguesias do País, por ordem do Rei D. João V, com vista à elaboração do “Dicionário Geográfico” da autoria do Padre Luís Cardoso. Porém, parte do material recolhido perdeu-se no sismo de 1755, pelo que, após o sismo, foi reenviado um novo questionário que incluía uma pergunta adicional, com o número 26, inquirindo: *Se padeceu alguma ruína no terremoto de 1755 e em quê: e se está reparada.* As respostas a este questionário foram obtidas por volta de 1758 e Pereira de Sousa utilizou-as para colmatar o facto do *Inquérito Paroquial* disponível não abranger a globalidade do País, em particular a zona sul mais afectada pelo sismo [Pereira de Sousa, 1919-1932].

Quadro 6.1 – Estatísticas de danos no edificado de Lisboa no sismo de 1755.

Total parque habitacional	Edifícios colapsados	Nº edifícios danificados	Nº edifícios habitáveis	Fonte
	10 % lançados por terra	60 % inabitáveis	30 % habitáveis	Moreira de Mendonça [1758] citado por Pereira de Sousa [1919-1923] e Farinha [1997]
	Ruíram milhares de casas, talvez cerca de 10 000			Moreira de [1984]
20 000	2 000	12 000		Oliveira [1988] citando observadores da época

Quadro 6.2 – Estatísticas de perdas humanas em Lisboa no sismo de 1755.

Total de habitantes.	Nº de vítimas	Percentagem de vítimas	Fonte
	12 000 a 15 000 mortos		Padre Manuel Portal citado por Pereira de Sousa [1919-1923] e por Fonseca [2004]
	5 000 pessoas que acabaram nas ruínas, mar e incêndio (900 devido ao tsunami). 5 000 dos feridos que entraram em cura morreram no mês de Novembro	Consoante as fontes utilizadas o número de mortos podia variar entre 10% e os 50%	Moreira de Mendonça [1758] citado por Farinha [1997] e por Solares [2001]
260 000	10 000 mortos	4%	Pereira de Sousa [1919-1923] citando também Moreira de Mendonça [1758] relativamente ao número de óbitos
	10 000 a 18 000 mortos		França [1989]
150 000 a 250 000	7 000 a 10 000 mortos 20 000 feridos	3 a 7% mortos 8 a 13% feridos	SNPC [1983]
38 000 famílias			Oliveira [1988] citando observadores da época
190 000	6 000 a 8 000 (estimativa oficial)	12 000	Farinha [1997]

A partir dos elementos reunidos no quadro 6.2 conclui-se que a percentagem de habitantes mortos e feridos em Lisboa pode variar entre 2 e 10% e entre 8 e 13%, respectivamente. Salienta-se que estas estimativas não diferenciam as vítimas devidas ao colapso das estruturas das originadas pelo incêndio que se seguiu ao abalo. Apenas Moreira de Mendonça [1758, citado por Farinha 1997] estima o número de vítimas do tsunami, apontando para 9% do total dos mortos. A estimativa do número de mortos em consequência deste sismo, mas ao nível de Portugal Continental, é um tema raramente abordado na bibliografia, sendo referido por Solares [2001] que esse número estaria próximo dos 12 000.

Para atenuar as diferenças entre o parque habitacional da época do evento e o actual, o Simulador será aplicado às existências dos edifícios apurados nos Censos 2001, no concelho de Lisboa, supondo que todos eles pertencem à tipologia mais vulnerável do parque habitacional, ou seja:

- as tipologias ATAPS e Outros, com dois pavimentos, nos casos das metodologias de avaliação de danos FEMA & NIBS e Tiedemann;
- as tipologias Alvenaria de pedra irregular e solta e de Adobe com 1 a 2 pavimentos no caso da metodologia de avaliação de danos Giovinazzi & Lagomarsino e
- a classe de vulnerabilidade A nos casos das metodologias de avaliação de danos Di Pasquale & Orsini e Zuccaro & Papa.

Está-se consciente de que esta hipótese de trabalho não reproduz o parque habitacional da época, mas que a avaliação dos resultados, em termos percentuais, decorrentes desta simulação constitui a melhor aproximação possível.

No que toca à acção sísmica, não se recorreu às intensidades macrossísmicas avaliadas por Pereira de Sousa [1919-1923] na escala de Mercalli de 1909, por se considerar que corresponderiam a valores demasiado elevados nas escalas macrossísmicas actuais. Desta forma, de acordo com os trabalhos de Oliveira [1988] a intensidade macrossísmica no concelho de Lisboa no sismo de 1755 situou-se em torno de VIII-IX, não discriminando porém, ao contrário de Pereira de Sousa [1919-1923] os valores das intensidades pelas freguesias da cidade de Lisboa.

Assim, nesta abordagem simplista em que se considera uma tipologia única e uma acção sísmica constante em todo o território analisado não faz sentido efectuar o mapeamento dos resultados, pois estes serão constantes, em termos percentuais, para toda a cidade de Lisboa. No caso das metodologias de avaliação de danos de Di Pasquale & Orsini e de Zuccaro & Papa basta consultar as respectivas matrizes de probabilidade de danos, dada a intensidade do evento em Lisboa, para se obterem os resultados de imediato.

Ao longo deste capítulo, na elaboração das figuras relativas aos danos no edificado, e quando se utilizam métodos estatísticos, agruparam-se os edifícios que se encontravam nos graus de dano 3, 4 e 5, embora se discrimine a percentagem de edifícios no grau de dano 5 das restantes. Na metodologia FEMA & NIBS agrupam-se os edifícios nos estados Dano

Moderado, Severo e Total, embora se discrimine a percentagem de edifícios colapsados no universo dos que se encontram no estado de Dano Total. Por uma questão de simplificação independentemente da metodologia de avaliação de danos, os edifícios que se encontram nesses três estados de danos serão designados simplesmente de edifícios que sofreram *danos estruturais moderados, severos ou colapso*.

No quadro 6.3 explicam-se os códigos que constam das figuras relativas às perdas humanas exibidas neste capítulo. A decisão sobre a taxa de ocupação dos edifícios no instante do sismo, designada de factor *M2* na metodologia de Coburn & Spence (ver secção 2.5.3), é mencionada nas próprias figuras que ilustram as estimativas de perdas humanas.

Quadro 6.3 – Legenda das figuras de danos no edificado e perdas humanas.

Código	Avaliação de danos no edificado	Avaliação de perdas humanas
F × F	FEMA & NIBS	FEMA & NIBS
F × C	FEMA & NIBS	Coburn & Spence
G × C	Giovinazzi & Lagomarsino	Coburn & Spence
D × C	Di Pasquale & Orsini	Coburn & Spence
Z × C	Zuccaro & Papa	Coburn & Spence
T × T	Tiedemann	Tiedemann

Os resultados obtidos, após a execução do programa de simulação de cenários sísmicos nas condições atrás descritas, reúnem-se nas figuras 6.5 a 6.7. Nestas figuras assinala-se, num tom mais claro, a incerteza na estimativa das vítimas do sismo de 1755.

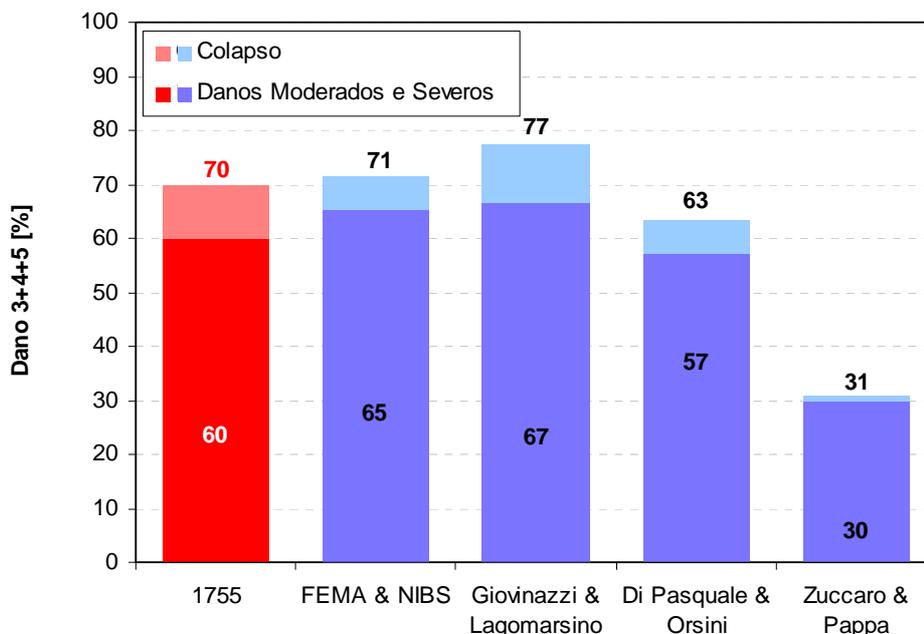


Figura 6.5 – Percentagem de «casas lançadas por terra e inabitáveis» em Lisboa em consequência do sismo de 1755. Resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1755.

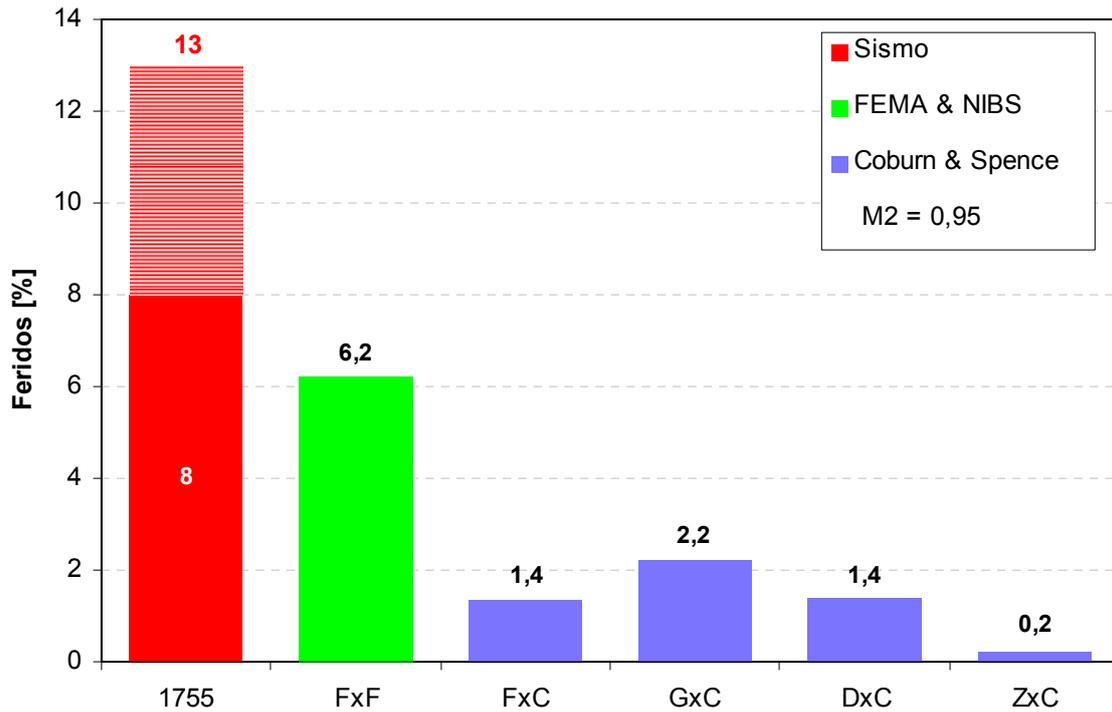


Figura 6.6 – Percentagem de feridos em Lisboa em consequência do sismo de 1755 e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1755.

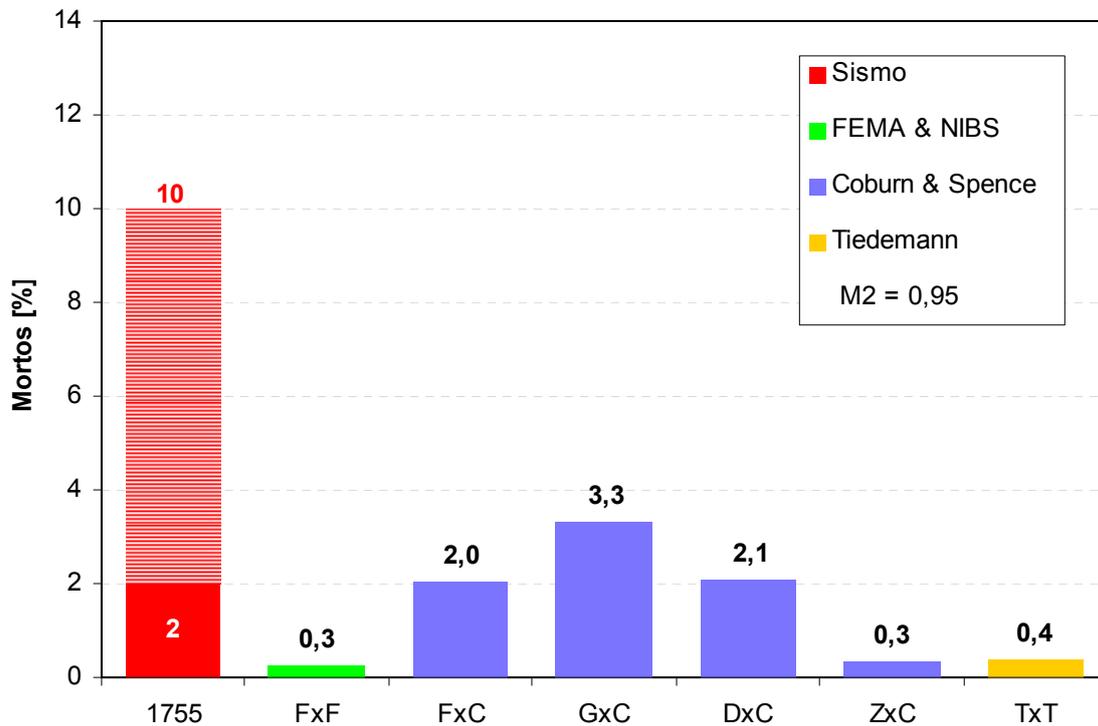


Figura 6.7 – Percentagem de mortos em Lisboa em consequência do sismo de 1755 e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1755.

### 6.3.3. Sismo de 1909

*O efeito do sismo foi principalmente o desligamento das fachadas, algumas das quaes tombaram inteiras, ao passo que o interior das habitações ficava relativamente intacto.*

*As derrocadas dos tectos são relativamente raras e teem lugar, ou quando abateram as paredes que sustentavam as vigas, ou quando as vigas estavam em mau estado ou não se embebiavam sufficientemente na parede [...]*



*As casas de alvenaria ou de tijolo cozido resistiram melhor, sendo nellas raro o desligamento das fachadas. [...] rachas verticaes profundas mostram que o desligamento esteve quasi a effectuar-se, mas os casos mais frequentes são os da queda parcial de um cunhal.*



*[...]os estragos causados , tanto pelo primeiro choque como pelas replicas podem dividir-se aproximadamente da forma seguinte: 1 prédio, na Rua de Santarem não careceu de concertos; 20 por cento, ou sejam 190, ficaram habitaveis mediante ligeiras reparações; 40 por cento (380) careceram de reparações importantes, e igual número, proxicamente, teve de ser demolido.*

*Ficaram mortas 27 pessoas pelo choque e 38 feridas, 3 das quaes falleceram em consequencia dos ferimentos [...]*



*Na generalidade, as paredes ficavam de pé, de forma que a povoação [Benavente] vista à distância de 200 ou 300 metros, nada aparentava de anormal. Não obstante a quasi totalidade das casas estava inhabitavel e a população acampava na praça publica.*

*Figura 6.8 – Danos nos edificios de Benavente e vista desta localidade após o sismo de 1909  
Choffat & Bensaúde [1913].*

No dia 23 de Abril de 1909, às 17h 04m 32s (hora de Lisboa), o Continente Português foi abalado pelo sismo que causou mais danos neste território no século XX. A região epicentral, onde ocorreram os estragos mais importantes, situou-se predominantemente a sul do Tejo, na zona de Benavente.

Quatro dias depois do abalo, uma portaria do Ministro das Obras Públicas nomeou uma comissão para o estudo científico do sismo de Benavente, que enviou para todo o País um questionário sobre os efeitos do evento, redigido pelo geólogo Paul Choffat. Com base nas respostas a esse questionário, em artigos de jornais e na observação directa da região em que os estragos foram mais elevados Choffat & Bensaúde [1913] elaboram o trabalho intitulado «Estudos sobre o sismo do Ribatejo de 23 de Abril de 1909», organizado em função da constituição geológica das regiões analisadas e onde são expostas as observações sobre a caracterização do evento, das suas réplicas e dos seus efeitos em cerca de 400 localidades de Portugal afectadas pelo sismo.

Em particular, nas localidades de Benavente e Santo Estêvão essas observações são muito minuciosas, reunindo-se no quadro 6.4 as estatísticas de danos deste sismo com o objectivo de se testar o Simulador para um cenário sísmico de ocorrência semelhante ao de 1909. No quadro 6.5 lista-se uma estatística menos pormenorizada de danos coligida por Choffat & Bensaúde [1913] para uma região mais alargada. Também em quatro localidades da zona epicentral os autores referem o número de vítimas do abalo e a população recenseada em 1900 (quadro 6.6). De acordo com Moreira [1984] o sismo terá causado 46 mortos e 75 feridos sendo todas as vítimas originárias da região epicentral. No quadro 6.7 resume-se as especificações de Choffat & Bensaúde [1913] sobre as tipologias dos edifícios da região epicentral, bem como uma apreciação qualitativa efectuada pelos autores dos respectivos danos.

*Quadro 6.4 – Estatísticas de danos no edificado no sismo de 1909 nas localidades de Benavente e Santo Estêvão.*

Localidade	Benavente		Santo Estêvão	
Nº de fogos em 1900	879 <sup>9</sup>		205	
Edifícios habitáveis mediante reparações ligeiras	190	20%	11	5%
Edifícios com reparações importantes	380	40%	35	17%
Edifícios arruinados	380	40%	161	78%

<sup>9</sup> De acordo com Choffat & Bensaúde [1913] em geral não se conhece o número de edifícios de uma freguesia, mas somente o número de fogos. Acrescentam ainda que em localidades rurais esses dois números são aproximadamente iguais.

Quadro 6.5 – Intensidade EMS-92 num conjunto alargado de localidades muito afectadas pelo sismo de 1909; número e percentagem de fogos danificados na região [Choffat, 1912].

Localidade	Intensidade EMS-92	Nº de fogos	Nº de fogos a reparar	Proporção
Benavente	IX	-	-	1:1
Samora Correia	IX	499	394	1:1,3
Santo Estêvão	IX	205	142	1:1,4
Salvaterra	VIII	899	448	1:2
Castanheira	VII-VIII	210	76	1:3
Muge	VII	772	627	1:1,1
Alverca	VII-VIII	494	137	1:3
Alhandra	VII	595	90	1:6
Cartaxo	VII	1 697	678	1:2,5
Santa Iria (Santarém)	VI	335	92	1:3,6
Santarém de Cima	VI	1 982	111	1:18
Valada	VI	436	169	1:2,6
Benfica	VI	301	105	1:3
Vila Franca de Xira		-	179	-

Quadro 6.6 – Estatísticas de danos humanos no sismo de 1909.

Localidade	Habitantes em 1900	Mortos		Feridos	
		[#]	[%]	[#]	[%]
Benavente	3 557	30	0.84	35	0.98
Samora Correia	2 084	7	0.34	7	0.34
Santo Estêvão	832	3	0.36	3	0.36
Salvaterra	4 633	2	0.04		
Total 4 localidades	11 106	42	0.38	45	0.41
Total sismo	--	46	100	75	100

Face à descrição das tipologias da região epicentral, que refere que a maioria dos edifícios são de taipa ou de tijolo cru e de um piso, correu-se o Simulador para uma de tipologia única, a mais vulnerável com 1 piso entre todas as metodologias de avaliação de danos disponíveis.

A acção sísmica adoptada resultou da transformação das intensidades avaliadas por Choffat & Bensaúde [1913] na escala de Forel Mercalli Cancani em intensidades na escala EMS-92 seguindo o algoritmo de Paula [1996].

Quadro 6.7 – Danos e tipologias dos edifícios na região epicentral do sismo de 1909 de acordo com Choffat & Bensaúde [1913].

Localidade	Tipologias de edifícios	Danos por tipologia
Benavente	<i>As casas são em geral de taipa ou de tijolo cru, mas que também as havia de alvenaria de calcáreo e de tijolo cozido.</i>	<i>As casas de alvenaria ou de tijolo cozido resistiram melhor, sendo nellas raro o desligamento das fachadas. Muitas vezes não se veem no exterior senão pequenas fendas horizontaes ou verticaes [...] mas no interior os estragos são bastante consideraveis para tornar a casa inhabitavel. [...] os estragos sejam mais pronunciadas nas casas de taipa e de tijolo cozido.</i>
Samora Correia	<i>A maioria das casas não tem senão rez-do-chão e a sua construção é de taipa ou de tijolo cru.</i>	<i>As casas de taipa ficaram quasi todas arruinadas, umas pela queda das fachadas, outras em virtude de fendas nos cunhaes.</i>
Santo Estêvão	<i>Povoação pobre construída de taipa ou de tijolo cru, salvo nos cunhaes de algumas casas que são de tijolo cozido.</i>	<i>Parte das paredes abateram, outra parte ficou de pé apesar das rachas.</i>
Salvaterra	<i>A maior parte das paredes são construidas de taipa, muitas de tijolo cru e um pequeno numero de alvenaria argamassada, em geral de má qualidade (tijolo cozido ou pedra grossa.)</i>	<i>[...] tendo-se mantido de pé a maior parte dos predios, só mostravam fendas; mas na realidade os estragos são quasi tão consideraveis, visto que foi necessario demolir até ao piso algumas casas que apresentavam um bom aspecto exterior.</i>

Dado que de acordo com Choffat & Bensaúde [1913] «o número de vitimas não foi mais elevado, devido à hora do sismo, dado que a maior parte das pessoas se encontravam no campo a trabalhar» recorreu-se à figura 2.14 e assumiu-se que a taxa de ocupação dos edifícios no instante do sismo (factor  $M2$  da metodologia de Coburn & Spence) se situava próximo dos 35%.

Na figura 6.9 mostra-se a distribuição geográfica dos danos no edificado e humanos para as freguesias em que existe informação sobre os efeitos do sismo de 1909, exemplificando-se os resultados para várias opções de modelação disponíveis no Simulador.

Os resultados do Simulador, nas condições atrás especificadas, são ilustrados nas figuras 6.10 a 6.12. Nesta última figura, distinguem-se, num tom de verde mais claro, os Feridos Ligeiros dos restantes.

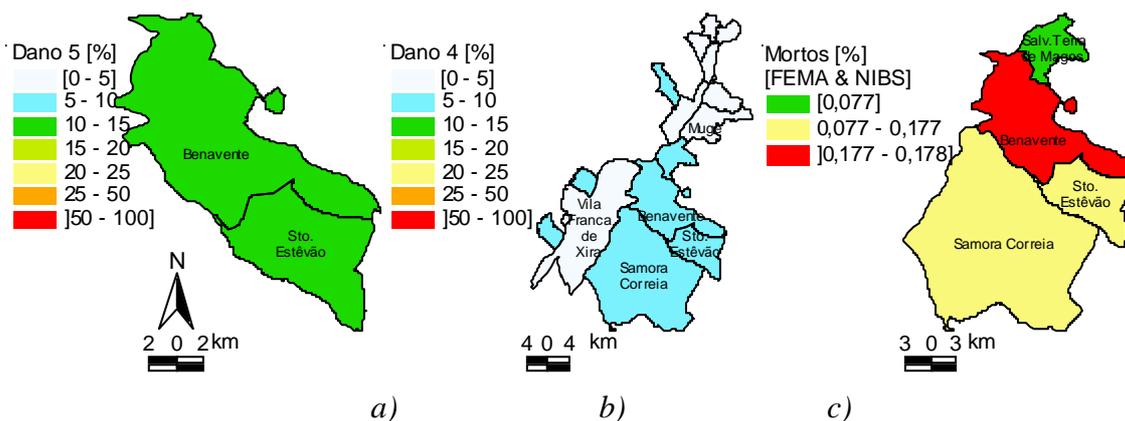


Figura 6.9 – Cenário de ocorrência de 1909: a) percentagem de edifícios no estado de dano 5, modelo de danos de Di Pasquale & Orsini; b) percentagem de edifícios no estado de dano 4 nas freguesias correspondentes às localidades mencionadas no quadro 6.6, modelo de danos de Zuccaro & Pappa; c) percentagem de mortos, modelos FEMA & NIBS.

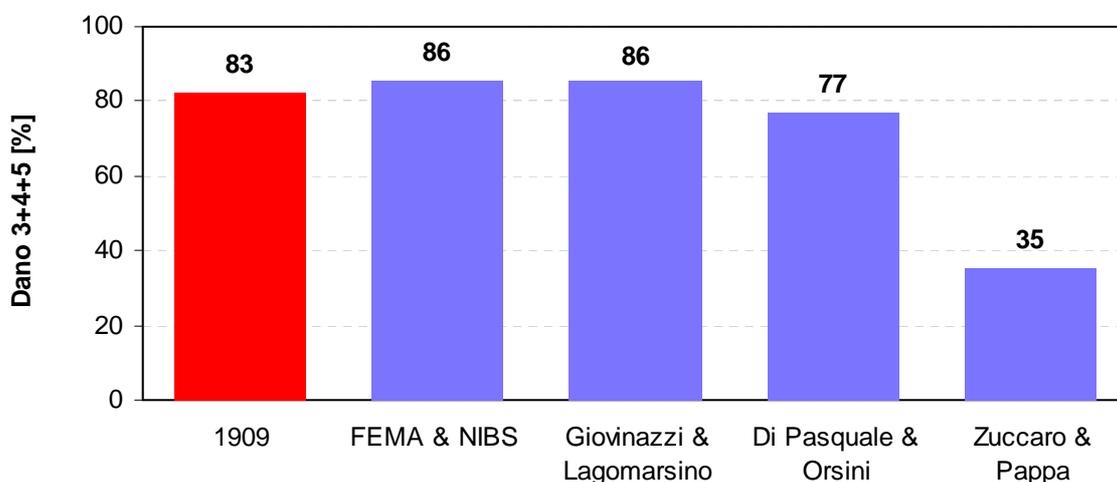


Figura 6.10 – Percentagem de edifícios com reparações importantes ou colapsados em consequência do sismo de 1909 nas localidades de Benavente e Santo Estêvão e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.

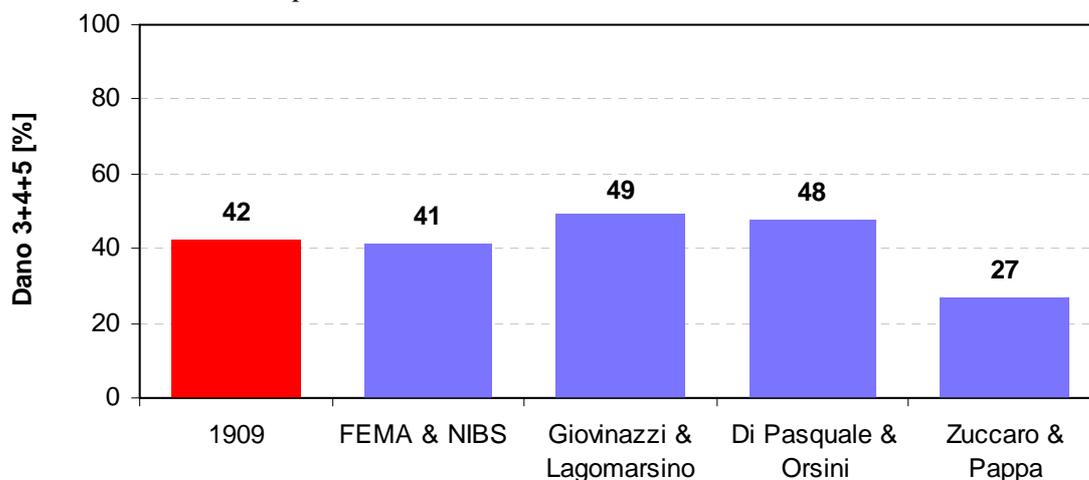


Figura 6.11 – Percentagem de fogos danificados em consequência do sismo de 1909 na região epicentral (localidades mencionadas no quadro 6.5) e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.

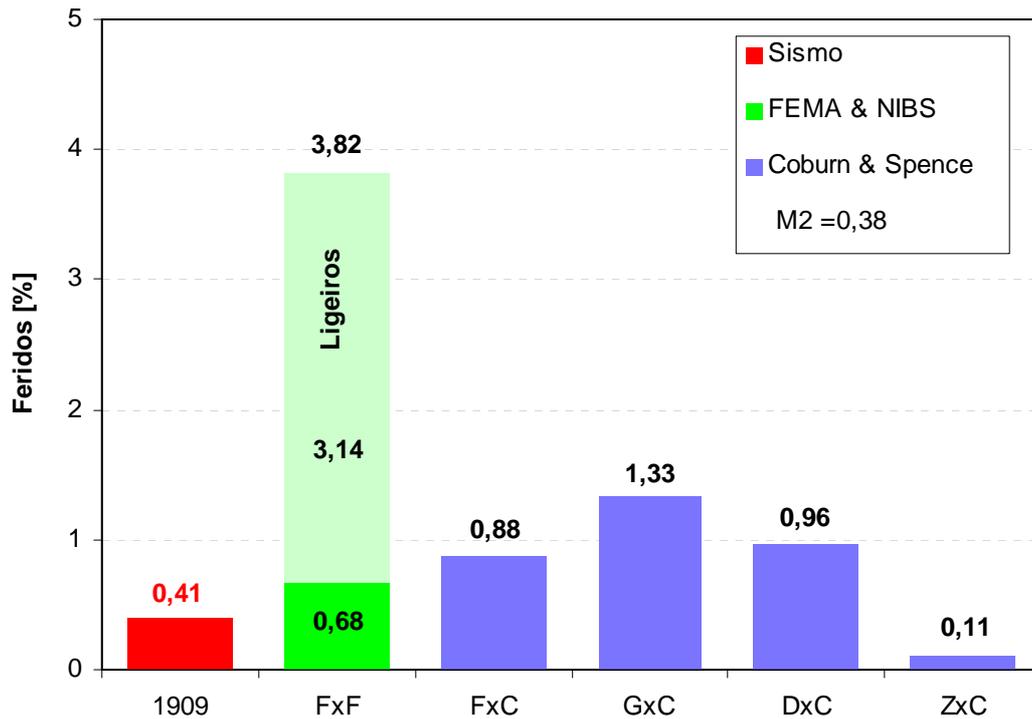


Figura 6.12 – Percentagem de feridos em consequência do sismo de 1909 nas localidades de Benavente, Santo Estêvão, Samora Correia e Salvaterra de Magos e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.

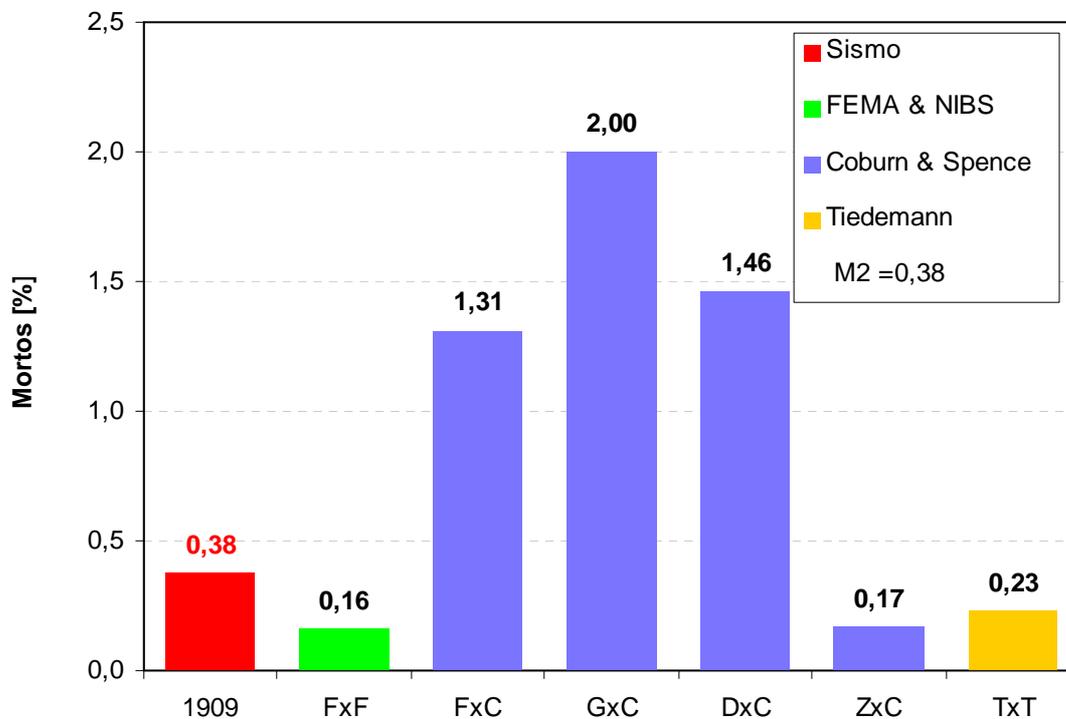


Figura 6.13 – Percentagem de mortos em consequência do sismo de 1909 nas localidades de Benavente, Santo Estêvão, Samora Correia e Salvaterra de Magos e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1909.

### 6.3.4. Sismo de 1969

[sobre os edifícios de grande porte com estrutura de betão armado] Outro aspecto importante reside na necessidade de serem devidamente cuidados os pormenores construtivos.

Verificou-se que a maior parte dos danos resultou de deficiências e erros cometidos quando da execução. Tais deficiências traduziram-se sobretudo, em elevados custos de reparação.



Nas localidades visitadas, consideradas como das mais atingidas pelo sismo, verificou-se que a maioria das casas que ruíram eram desse tipo [taipa ou adobes], como por exemplo em Vila do Bispo e em Bensafrim.

O hospital de Sines, que sofreu grandes estragos, apresenta uma estruturação de cunho “pombalino” em que as paredes de alvenaria se encontram enquadradas nas características “gaiolas” de madeira. Neste edifício, durante o sismo, parte dos panos de alvenaria desprenderam-se dos quadros envolventes, acontecendo que um tijolo, na queda, perfurou o tecto de madeira de uma das enfermarias atingindo mortalmente um dos ocupantes.



[...] os tipos mais generalizados de construções tradicionais [edifícios de alvenaria com pavimentos de madeira e construções rurais de taipa e adobe] não são adequados para resistirem às solicitações sísmicas. Embora este tipo de construção seja dos que oferecem menos garantias sob o ponto de vista da resistência às acções sísmicas, observaram-se alguns exemplos de casas de habitação e grandes armazéns que tiveram um comportamento perfeitamente satisfatório, por terem sido adoptadas disposições construtivas adequadas que lhes conferem um travamento e cintagem aceitáveis [...]

Figura 6.14 – Sismo de 1969 [texto e fotografias em Marécos e Castanheta, 1970].

No dia 28 de Fevereiro de 1969 pelas 2h 40min 45s (T.M.G.) ocorreu um sismo de magnitude estimada entre 7,3 e 7,5, na escala de Richter, [Cabral, 1993; Moreira, 1985] tendo o seu hipocentro sido localizado a sudoeste do cabo de S. Vicente, com as coordenadas 35° 58,0'N, 10°35,0'W, a uma profundidade entre 14-25 km [Senos *et al.*, 1994].

Como foi atrás referido, o sismo de 1969 foi aquele que causou danos mais importantes no século XX, em Portugal Continental, depois do sismo de 1909. Provocou alarme e pânico entre a população, avarias nos telefones, corte no fornecimento de energia eléctrica e, de acordo com Quintino [1970], causou 13 vítimas mortais em Portugal Continental, embora apenas 2 em consequência directa do sismo, sendo as restantes originadas por doenças cardíacas agravadas pela comoção.

Neste evento, eventualmente devido à sua intensidade pouco elevada, não se realizaram levantamentos pós-sismo que permitissem estabelecer estatísticas de danos. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil promoveu, no início de Março de 1969, uma missão [Marécos & Castanheta, 1970] para analisar o comportamento das estruturas afectadas pelo sismo, em que um dos principais objectivos era o estudo do comportamento de edifícios de grande porte, com estrutura de betão armado, para ajuizar da eficiência da construção anti-sísmica em vigor. Para além destes edifícios, os participantes nesta missão inspeccionaram de forma sistemática igrejas, escolas primárias, hospitais, depósitos de água elevados e faróis, tendo analisado os danos por tipologia construtiva de edifícios conforme se resume no quadro 6.8.

A razão determinante para a utilização de um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969 prende-se com a tentativa de reprodução dos efeitos de um sismo que tenha causado alguns danos em Portugal Continental, num parque habitacional relativamente recente, quando comparado com o parque existente à data dos sismos históricos. Com efeito, a utilização da informação dos Censos 2001 para quantificar as existências corresponde, por um lado, a uma sobreavaliação dos quantitativos em risco e, por outro, a um parque menos vulnerável do que o existente à data do sismo. Estas fontes de erro, aliadas ao facto de não existirem estatísticas de dano em 1969, farão com que a comparação dos efeitos do sismo sobre o edificado com os resultados do Simulador seja meramente qualitativa

A acção sísmica adoptada na simulação resultou da transformação das intensidades avaliados pelo Instituto de Meteorologia na escala de Mercalli Modificada em intensidades da escala EMS-92, seguindo o algoritmo de Paula [1996] (ver figura 6.15 em cima).

Na figura 6.15 exemplifica-se a distribuição geográfica dos mortos no Algarve para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969, incidindo sobre o parque habitacional e habitantes apurados nos Censos 2001 e recorrendo à metodologia de avaliação de perdas humanas Coburn & Spence combinada com o modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. Nas figuras 6.16 a 6.18 sintetizam-se os resultados do Simulador em termos de danos no edificado e perdas humanas para as várias metodologias disponíveis.

Quadro 6.8 – Danos por tipologia de edifícios na região mais afectada pelo sismo de 1969 de acordo com Marécos & Castanheta [1970].

Tipologias de edifícios	Danos por tipologia
Edifícios de grande porte com estruturas de betão armado: hotéis e blocos de apartamento recentes à data do sismo.	<i>Não sofreram danos estruturais, no entanto, os estragos nos acabamentos e recheios implicaram custos de reparação elevados: fendilhação das paredes de alvenaria, chaminés, revestimentos de juntas de dilatação, deslocamento de telhas, quebras de vidros, quebra de elementos decorativos, etc.</i>
Outros edifícios com estrutura resistente de betão armado construídos na década de 60 do século XX; incluindo moradias e edifícios de 2 a 8 pisos.	<i>Sofreram apenas ligeira fendilhação ocasional nas localidades em que a intensidade da acção sísmica foi mais elevada; em geral surgiram fendas periféricas na ligação dos panos de tijolo à estrutura [figura 6.14] e fendas diagonais nas alvenarias de enchimento.</i>
Edifícios de alvenaria com alguns elementos de betão armado moradias, prédios de rendimento e edifícios públicos com idade compreendida entre 10 e 30 anos e em geral bem conservados.	<i>Este tipo de construções, teve em geral, um bom comportamento sob a acção do sismo, notando-se apenas o aparecimento eventual de pequenas fendas nas alvenarias, localizadas, por vezes, na zona de ligação a lintéis de betão armado.</i>
Edifícios de alvenaria; casas de habitação e instalações de serviços públicos com pavimentos de madeira, com idade superior a 40 anos; hospitais e igrejas com cerca de 200 anos.	<i>Edifícios que sofreram estragos consideráveis que se devem à má qualidade de alvenaria, ao precário estado de conservação e à falta de travamento entre paredes resistentes e entre essas e as divisórias.</i>
Construções em taipa e adobes - grande percentagem das construções rurais da região afectada.	<i>Nas localidades mais atingidas pelo sismo verificou-se que a maioria das casas que ruíram eram deste tipo. Observou-se também que os edifícios destas tipologias tiveram um comportamento satisfatório quando adoptadas disposições construtivas adequadas que lhes confirmam travamento e cintagem adequada.</i>

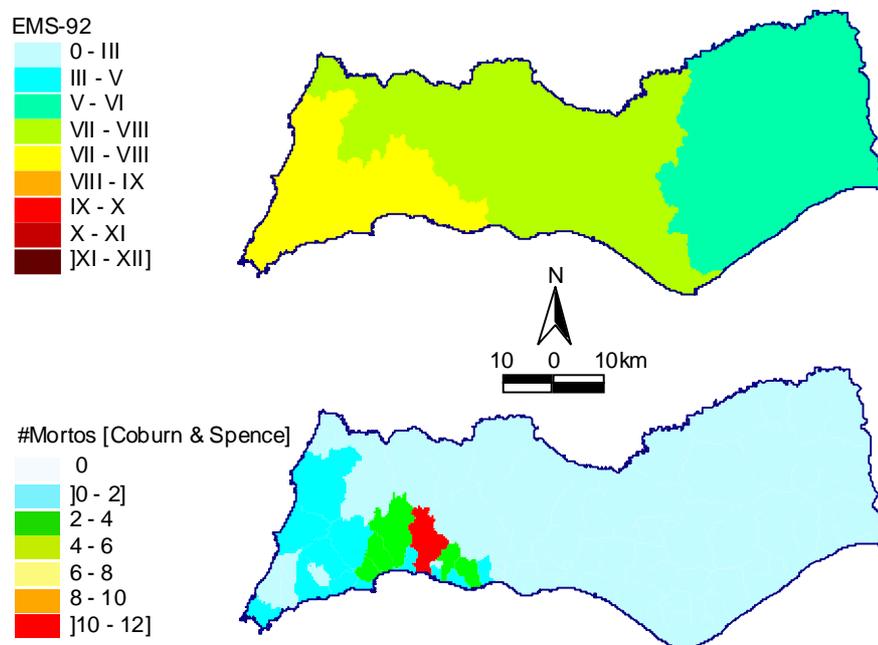


Figura 6.15 – Cenário de ocorrência de 1969: em cima, mapa de intensidades macrossísmicas, por concelho, no distrito do Algarve; em baixo, número de mortos no Algarve de acordo com a metodologia de avaliação de perdas humanas Coburn & Spence combinada com o modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino.

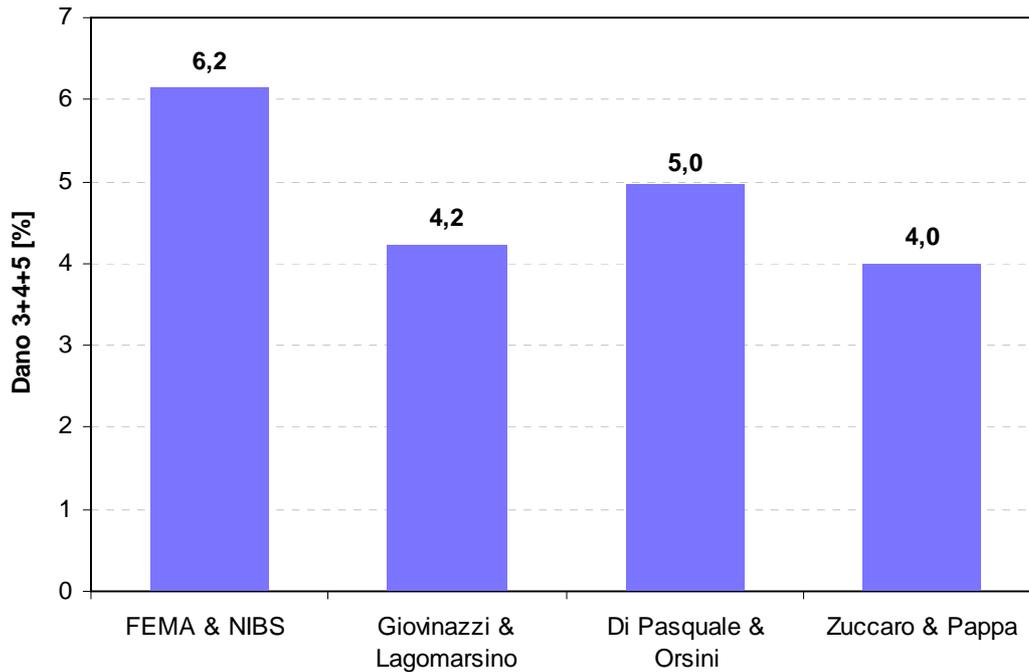


Figura 6.16 – Resultados do Simulador: percentagem de edifícios que sofreram danos estruturais moderados, severos, ou colapso no Algarve, para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969.

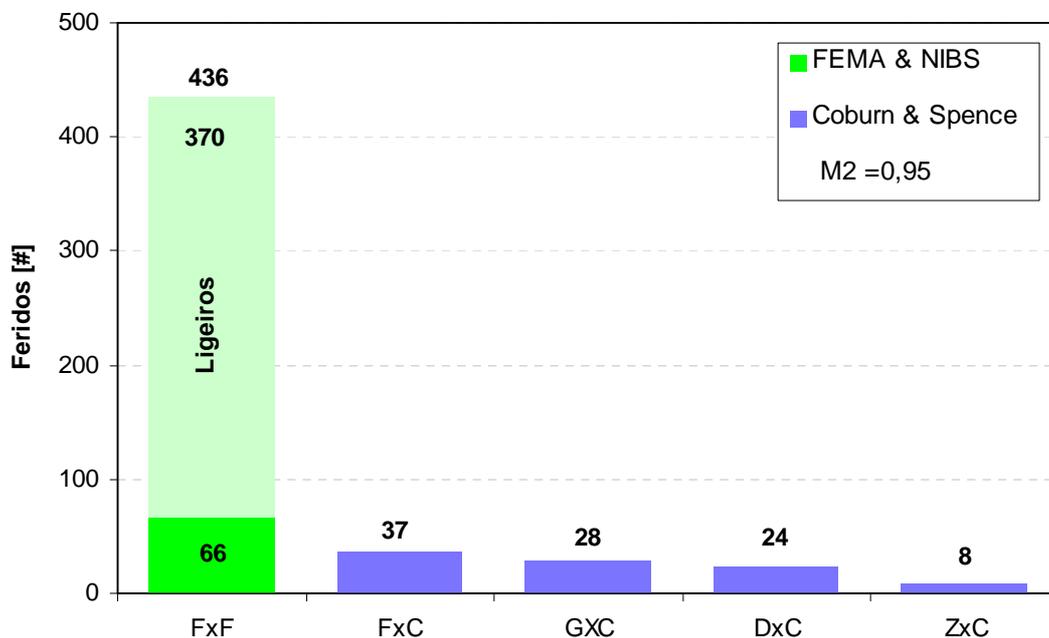


Figura 6.17 – Resultados do Simulador: percentagem de feridos no Algarve, para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969.

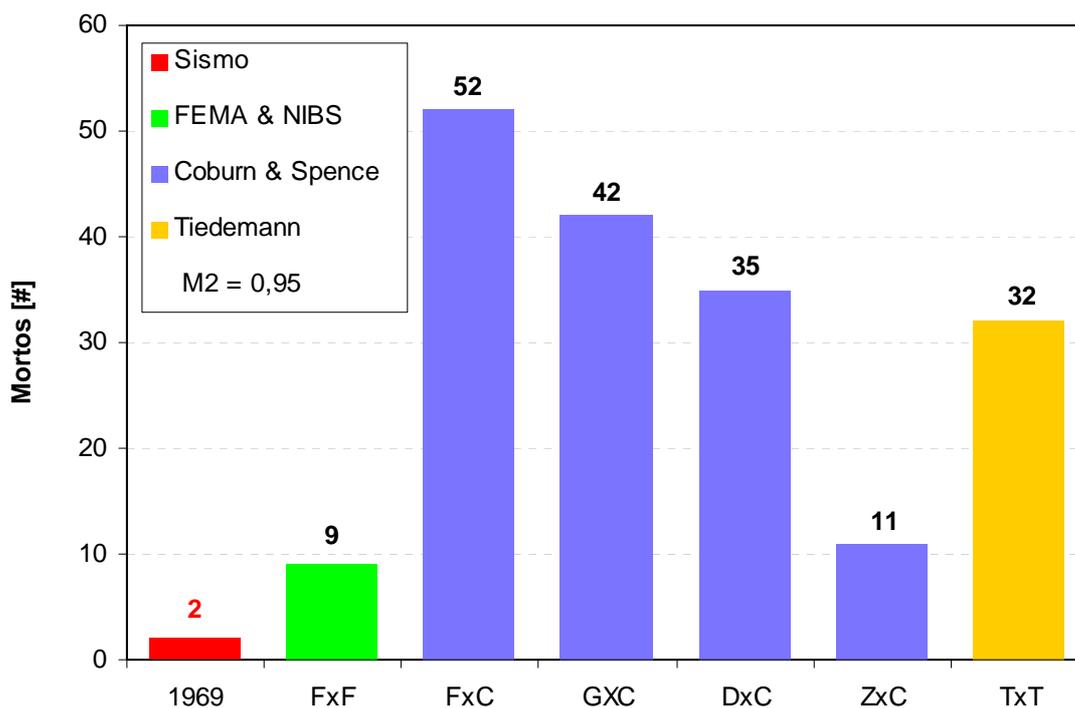


Figura 6.18 – Percentagem de mortos no Algarve em consequência do sismo de 1969 e resultados do Simulador para um cenário de ocorrência semelhante ao de 1969.

### 6.3.5. Apreciação dos resultados do Simulador

Da análise efectuada nas secções 6.3.2 a 6.3.4 ressalta que a aferição dos resultados do Simulador recorrendo a sismos históricos exhibe grandes incertezas. Porém, a utilização de sismos mais recentes, como o de 1969, revelou dificuldades acrescidas, conduzindo a comparações meramente qualitativas no que toca à avaliação de danos no edificado.

Não obstante, verifica-se uma concordância razoável entre os resultados do Simulador e a experiência dos sismos do passado.

Aliás, é particularmente expressivo o acerto entre os danos estimados pelo Simulador e os danos observados nos sismos históricos (figuras 6.5, 6.10 e 6.11). Exceptuam-se as simulações realizadas com a metodologia de avaliação de danos de Zuccaro & Papa que, regra geral, conduzem a resultados inferiores aos que terão ocorrido.

Como foi atrás referido, as iterações efectuadas para se conseguir este acerto situaram-se ao nível dos parâmetros das curvas de capacidade e fragilidade na metodologia FEMA & NIBS e ao nível da classificação do parque habitacional nas restantes metodologias. Conseguido este ajuste no módulo de danos no edificado a iteração seguinte incidiu sobre o módulo das perdas humanas. Na metodologia Coburn & Spence o único factor susceptível a ser interpretado é o  $M5$  que traduz a mortalidade pós-colapso. Assim, o Simulador foi programado para

contemplar duas opções sobre a eficácia da resposta de emergência consoante o cenário é histórico, como o de 1755 e o de 1909, ou é recente, como o de 1969. Na metodologia FEMA & NIBS alterou-se ligeiramente a taxa de mortalidade no colapso para as tipologias mais vulneráveis (quadro C.5).

Nas figuras referentes às perdas humanas (figuras 6.6, 6.7, 6.12, 6.13, 6.17 e 6.18) sobressaem duas tendências: (i) a de subavaliação dos mortos nos cenários históricos quando se recorre à metodologias FEMA & NIBS e Tiedemann e (ii) a de sobreavaliação dos mortos no cenário mais recente, para qualquer das três metodologias ensaiadas. A necessidade de estabelecer um compromisso entre estas duas tendências opostas, impediu que os valores da taxa de mortalidade no colapso da metodologia FEMA & NIBS fossem alterados de forma significativa.

Nas mesmas figuras constata-se que a metodologia Coburn & Spence estima um número de vítimas mortais superior ao estimado pelas restantes metodologias, mesmo tendo por base valores inferiores das percentagens de colapso, como no caso do sismo de 1755 (figura 6.5). Exceptuam-se uma vez mais as simulações realizadas com a metodologia de avaliação de danos de Zuccaro & Papa.

Resta ainda acrescentar que a metodologia FEMA & NIBS estima um número de feridos sempre superior ao da metodologia Coburn & Spence, entendendo-se que, para a estimativa de feridos, a primeira se encontra mais próxima da realidade do cenário de 1755 e a segunda do cenário de 1909.

Dada a natureza imprecisa da informação histórica experimental e uma vez que os resultados são bastante sensíveis à taxa de ocupação adoptada para o instante do sismo (factor  $M2$  da metodologia Coburn & Spence) considera-se que os resultados obtidos não são negados pelos cenários reais, conferindo alguma confiança às estimativas produzidas pelo Simulador.

#### **6.4. Simulações de cenários sísmicos para elementos em risco actuais**

Nesta secção procede-se à estimativa de danos e perdas para dois cenários de ocorrência semelhantes aos que, no passado, afectaram com alguma severidade Portugal Continental, ou seja, cenários semelhantes aos de 1755 e 1909. As simulações são efectuadas assumindo que os cenários ocorrem na actualidade, isto é, que actuam sobre os elementos sujeitos ao risco sísmico apurados nos Censos 2001.

Na figura 6.19 ilustra-se as acções macrossísmicas adoptadas nas simulações efectuadas para as diversas freguesias do País.

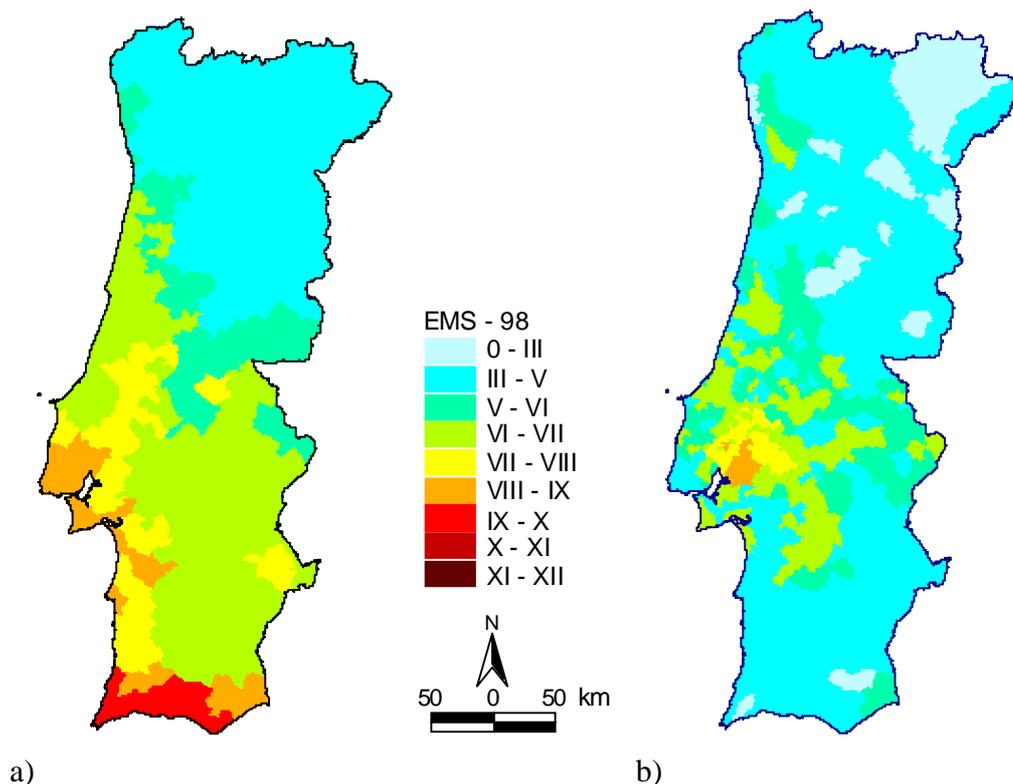


Figura 6.19 – Intensidades macrosísmicas dos sismos de a) 1755 e b) 1909; representadas para as freguesias de Portugal Continental.

Nos quadros 6.9 e 6.10 sintetizam-se os resultados globais do Simulador para os dois cenários mencionados evidenciando a correspondência entre estados de dano semelhantes das metodologias estatísticas e mecanicista. Na figura 6.20 ilustra-se a distribuição geográfica de danos e perdas para algumas das metodologias disponíveis. Relembra-se que os códigos exibidos na figura 6.20 identificativos das metodologias utilizadas foram especificados no quadro 6.3.

A estimativa das perdas humanas foi efectuada pressupondo que toda a população apurada nos Censos 2001 se encontrava presente nas suas habitações ( $M2 = 100\%$ ) e que a resposta de emergência dos Serviços da Protecção Civil era eficaz ( $M5$  actual).

Na estimativa da área perdida as metodologias estatísticas de avaliação de danos englobam os danos estruturais e não estruturais em edifícios de habitação, enquanto a metodologia mecanicista se restringe aos danos estruturais. Em ambos os casos, não são avaliadas as restantes perdas económicas directas, como por exemplo as perdas nos recheios das habitações, nem as perdas indirectas.

As perdas totais em milhões de Euro, incluídas nas penúltimas linhas dos quadros mencionados, resultam da transformação da área do parque habitacional danificado em valores monetários, assumindo, de forma simplificada, um valor de reposição que varia entre os concelhos do País, mas que é uniforme entre tipologias (secção 6.2.3 – módulo de perdas económicas). Para facilitar a percepção da dimensão das perdas envolvidas esses valores foram convertidos em percentagem do PIB de 2001 ( $= 122\,900,6 \times 10^6$  Euro [MF-DGEP, 2002]).

Quadro 6.9 – Síntese dos resultados do Simulador para um cenário sísmico de ocorrência semelhante ao de 1755.

Metodologias		Di Pasquale & Orsini	Giovinazzi & Lagomarsino	Zuccaro & Papa	FEMA & NIBS	Tiedemann
Danos em edifícios	Dano 0	1 501 386 (50,1%)	1 974 434 (65,9%)	1 503 170 (50,1%)	2 259 179 (75,4%)	Edifícios afectados 197 130 (6,6%)
	Dano 1	797 042 (26,6%)	450 813 (15,0%)	975 793 (32,6%)	Ausência de Dano	
	Dano 2	380 827 (12,7%)	283 524 (9,5%)	384 787 (12,8%)	264 753 (8,8%) Ligeiro	
	Dano 3	189 071 (6,3%)	176 123 (5,9%)	109 081 (3,6%)	170 841 (5,7%) Moderado 159 913 (5,3%) Severo	
	Dano 4	87 586 (2,9%)	86 512 (2,9%)	22 193 (0,74%)	142 973 (4,8%)	
Total = 2 997 659 edifícios	Dano 5	41 747 (1,4%)	26 253 (0,88%)	2 635 (0,09%)	Total	
Metodologias		Coburn & Spence			FEMA & NIBS	Tiedemann
Perdas Humanas	S/ Ferimentos	9 724 186 (99,34%)	9 746 509 (99,56%)	9 786 774 (99,98%)	9 697 042 (99,06%)	Mortos 17 689 (0,18%)
	F. Ligeiros	3 999 (0,04%)	3 479 (0,04%)	212 (0,00%)	74 940 (0,77%)	
	Cuidados Hospitalares	8 945 (0,09%)	6 350 (0,06%)	360 (0,00%)	13 797 (0,14%)	
	F. Graves	5 410 (0,06%)	4 992 (0,05%)	309 (0,00%)	1 691 (0,02%)	
	Mortos	46 569 (0,48%)	27 779 (0,28%)	1 454 (0,02%)	1 640 (0,02%)	
Área perdida total [m <sup>2</sup> ] Total = 610 822 555 m <sup>2</sup>		43 690 670 (7,2%)	37 210 034 (6,1%)	20 853 750 (3,4%)	49 598 760 (8,1%)	39 840 000 (6,5%)
Perda total [Euro × 10 <sup>6</sup> ] (% PIB de 2001)		22 870 (18,6%)	19 799 (16,1%)	10 656 (8,7%)	26 539 (21,6%)	21 293 (17,3%)

Quadro 6.10 – Síntese dos resultados do Simulador para um cenário sísmico de ocorrência semelhante ao de 1909.

Metodologias		Di Pasquale & Orsini	Giovinazzi & Lagomarsino	Zuccaro & Papa	FEMA & NIBS	Tiedemann
Danos em edifícios	Dano 0	2 603 674 (86,9%)	2 820 049 (94,1%)	2 521 932 (84,1%)	2 936 794 (98,0%)	Edifícios afectados  9 504 (0,32%)
	Dano 1	282 381 (9,4%)	126 192 (4,2%)	336 890 (11,2%)	Ausência de Dano	
	Dano 2	84 021 (2,8%)	38 062 (1,27%)	110 072 (3,7%)	43 492 (1,5%) Ligeiro	
	Dano 3	22 600 (0,75%)	10 587 (0,35%)	24 850 (0,83%)	11 800 (0,39%) Moderado  4 235 (0,14%) Severo	
	Dano 4	4 496 (0,15%)	2 431 (0,08%)	3 656 (0,12%)	1 338 (0,04%)	
Total = 2 997 659 edifícios	Dano 5	487 (0,02%)	338 (0,01%)	259 (0,01%)	Total	
Metodologias		Coburn & Spence			FEMA & NIBS	Tiedemann
Perdas Humanas	S/ Ferimentos	9 788 802 (100,00%)	9 788 784 (100,00%)	9 789 088 (100,00%)	9 788 040 (99,99%)	Mortos  128 (0,00%)
	F. Ligeiros	24 (0,00%)	29 (0,00%)	2 (0,00%)	895 (0,01%)	
	Cuidados Hospitalares	45 (0,00%)	50 (0,00%)	2 (0,00%)	143 (0,00%)	
	F. Graves	34 (0,00%)	42 (0,00%)	3 (0,00%)	14 (0,00%)	
	Mortos	205 (0,00%)	206 (0,00%)	12 (0,00%)	16 (0,00%)	
Área perdida total [m <sup>2</sup> ] Total = 610 822 555 m <sup>2</sup>		4 657 302 (0,76%)	2 269 306 (0,37%)	5 253 011 (0,86%)	1 153 189 (0,19%)	1 995 000 (0,33%)
Perda total [Euro × 10 <sup>6</sup> ] (% PIB de 2001)		2 334 (1,9%)	1 131 (0,92%)	2 650 (2,2%)	563 (0,46%)	991 (0,8%)

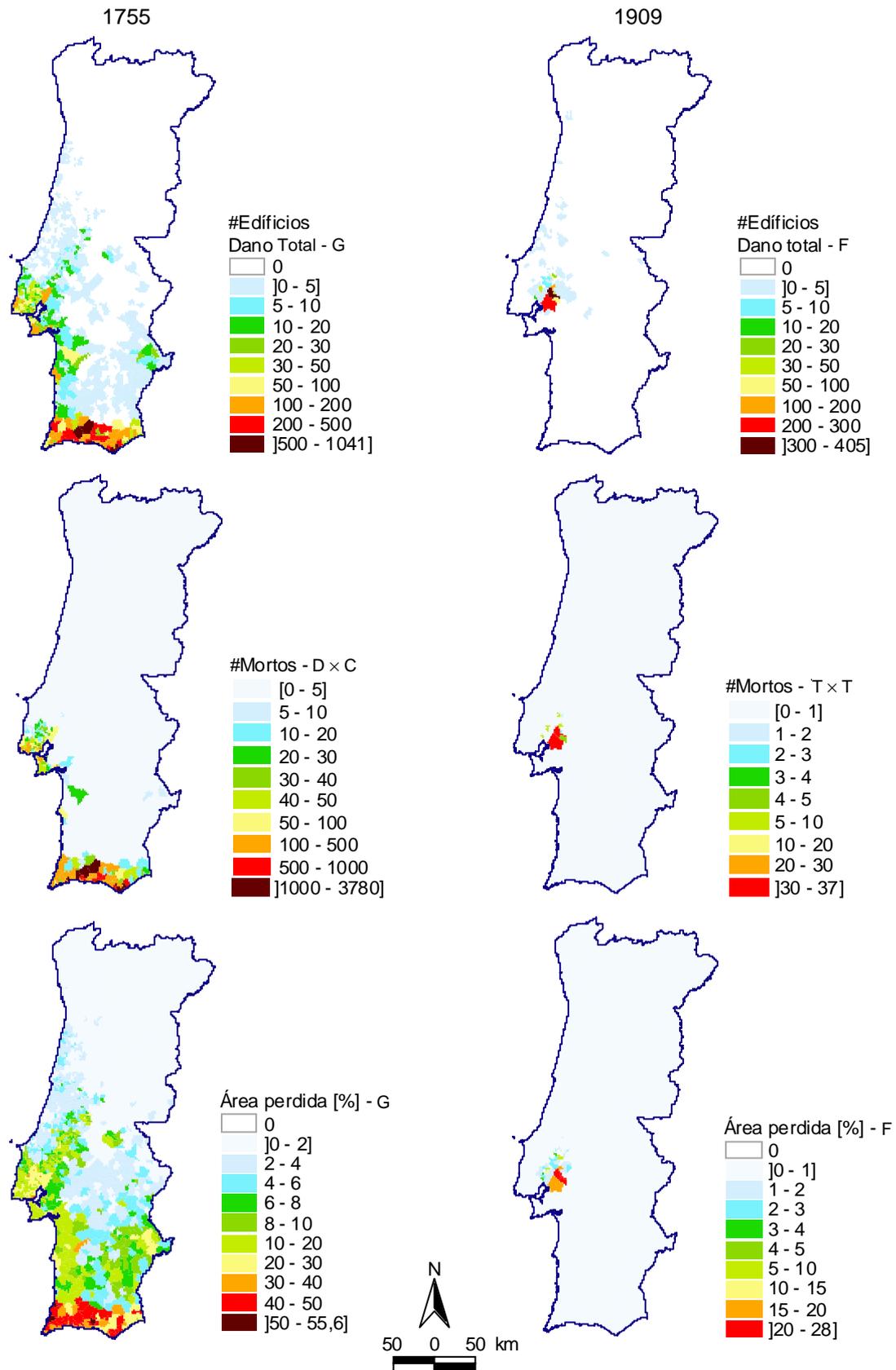


Figura 6.20 – Distribuição geográfica de danos e perdas para cenários sísmicos de ocorrência semelhantes aos de 1755 e 1909.

Analisando os quadros 6.9 e 6.10 é possível tecer diversas considerações sobre os danos no parque habitacional e seus ocupantes existente em Portugal Continental, à data dos Censos 2001.

No que toca aos danos no edificado, verifica-se que no cenário que reproduz um sismo afastado de magnitude elevada, o de 1755, a metodologia FEMA & NIBS conduz a estimativas de colapsos totais ou parciais superiores às das metodologias estatísticas de avaliação de danos. Por outro lado, no cenário de 1909, que simula um sismo próximo de magnitude moderada, verifica-se o inverso. Pesa negativamente nesta comparação o facto dos estados de dano serem definidos de forma não coincidente. Também noutras simulações efectuadas se confirmou que estas duas tendências são sistemáticas e que advêm do facto dos sismos de 1909 e 1755 configurarem duas situações opostas em termos de duração do movimento sísmico, ou seja, uma duração curta e longa respectivamente. A duração do movimento sísmico influencia a metodologia FEMA & NIBS ao nível da obtenção dos espectros de sollicitação sucessivos de amortecimento crescente (secção 2.4.3.3).

Na figura 6.21 estuda-se o efeito da variável Estado de conservação sobre os danos no edificado, estimados pela metodologia Giovinazzi & Lagomarsino. As simulações foram efectuadas para os cenários sísmicos de 1755 e de 1909 assumindo três condições para o estado de conservação do parque habitacional (ver secção 5.4.2 e quadro C.1): (i) todo o parque se encontra em bom estado de conservação apenas necessitando de nenhuma ou de pequenas reparações nas estruturas dos edifícios, (ii) a necessidade de reparações na estrutura é semelhante à apurada nos Censos 2001, ou (iii) todo o parque se encontra em mau estado de conservação necessitando de reparações médias, grandes ou muito grandes nas estruturas dos edifícios.

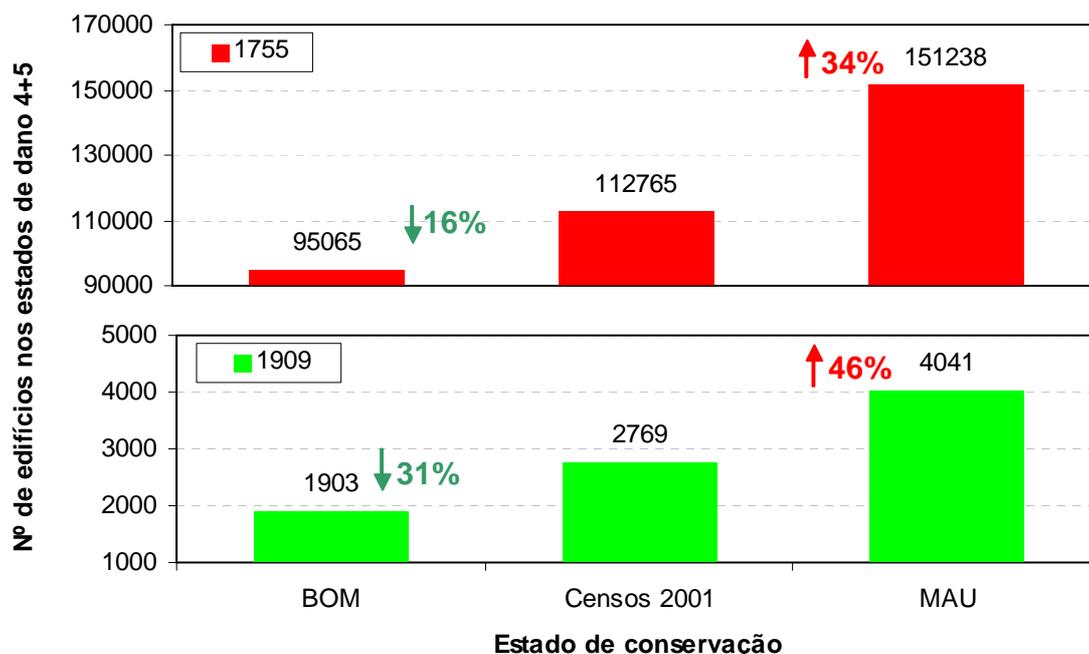


Figura 6.21 – Efeito da variável estado de conservação sobre os danos no edificado para os cenários de ocorrência semelhantes aos de 1755 e 1909.

Nesta figura sobressai a tendência de crescimento dos danos quando piora o estado de conservação estrutural do edificado, como seria de esperar. Na hipótese de todo o parque habitacional se encontrar em bom estado de conservação, os danos diminuem em 16% e 31%, nos cenários de 1755 e 1909, respectivamente, em relação aos danos estimados com os edifícios no estado de conservação estrutural apurado nos Censos 2001. Na hipótese de todo o parque habitacional se encontrar em mau estado de conservação, os danos aumentam em 34% e 46%, nos cenários de 1755 e 1909, respectivamente, em relação aos danos estimados para os elementos em risco de referência.

Em termos de perdas humanas nos quadros 6.9 e 6.10 verifica-se que as metodologias estatísticas estimam sempre um número de vítimas mortais superior ao obtido pela metodologia FEMA & NIBS, constatando-se o oposto nas estimativas do número de feridos. Quando se comparam as diversas metodologias utilizadas ressalta a dispersão elevada dos resultados que, no caso das vítimas mortais, originam coeficientes de variação de 92% e de 96% nos cenários de 1755 e de 1909, respectivamente.

Saliente-se que os valores estimados pelas simulações de perdas humanas representam estimativas por excesso, no sentido em que se assumiu que 100% da população se encontrava na sua habitação no instante do sismo, o que constitui uma hipótese pessimista mesmo para um cenário que ocorra durante a noite.

A figura 6.22 foi construída para comparar a mortalidade obtida com o Simulador com a observada em 20 sismos ocorridos nos últimos 10 anos em todo o mundo [Decanini *et al.*, 2002; Indirli *et al.*, 2004; Mahdi, 2004; MCEER, 2004; Pai *et al.*, 2004; Spence *et al.*, 2000; USGS, 2004]. A este conjunto de 20 sismos foi adicionado o sismo de 1980, sentido fortemente nas ilhas da Terceira, S. Jorge e Graciosa do Arquipélago dos Açores [Lucas *et al.*, 1992]. Para os cenários de 1755 e 1909, os valores do eixo das abcissas correspondem ao número de edifícios nos estados de dano 4 e 5 ou no estado Dano Total, consoante a metodologia utilizada.

A figura agora analisada é semelhante à figura 2.12 reproduzida na secção 2.5.1, para evidenciar a existência de uma relação entre o montante de vítimas e a destruição causada por sismos e a variabilidade elevada dessa correlação. Tal como na figura 2.12 é notória a dispersão exibida na figura 6.22, mesmo sendo esta última elaborada a partir de sismos mais recentes.

A figura 6.22 coloca em evidência que as quatro estimativas de vítimas mortais obtidas para cada cenário se encontram bem enquadradas nas observações de mortalidade de sismos recentes. Salvaguarda-se o cenário de 1755 em que as estimativas obtidas pelas metodologias D×C e G×C correspondem aos valores mais elevados de vítimas mortais para uma dada destruição do edificado.

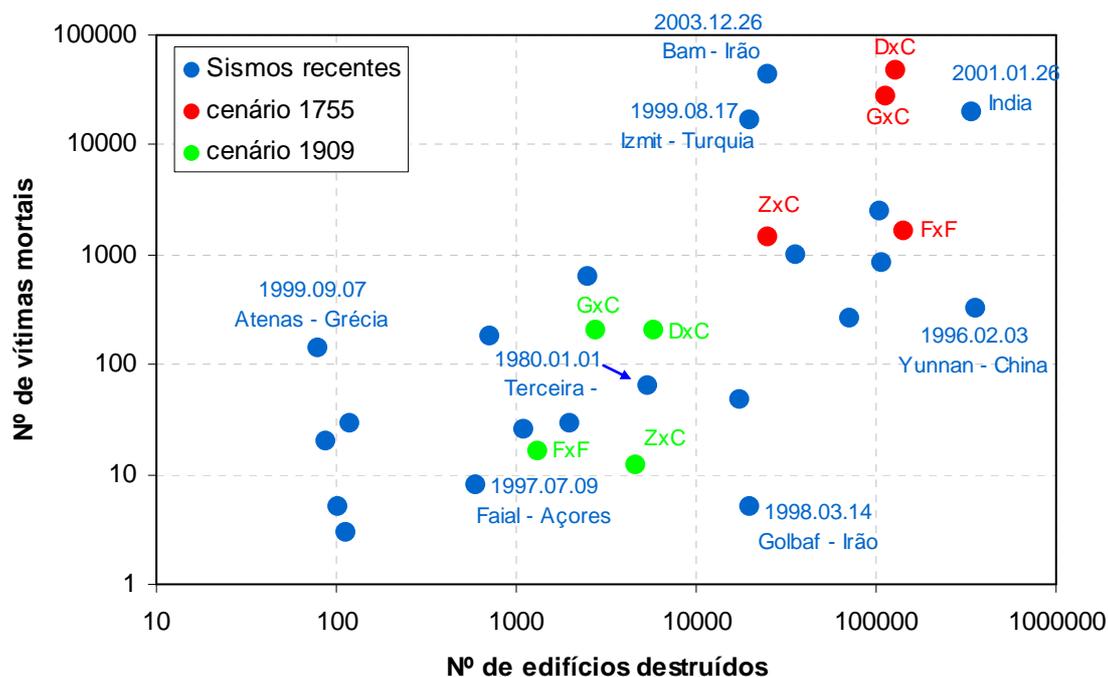


Figura 6.22 – Comparação da mortalidade obtida com o Simulador com a observada em sismos ocorridos entre 1980 e 2004.

As principais críticas a registar a esta comparação prendem-se com a natureza pouco precisa da informação sobre os danos e perdas humanas em sismos, nomeadamente os dados de base da figura 6.22. Também nesta figura não existem indicações sobre as tipologias construtivas mais afectadas em cada sismo, sendo sabido que, entre os sismos mais mortíferos apresentados, o edificado destruído tem características bem diferenciadas das do parque habitacional de Portugal Continental. Além disso, a ocupação média dos edifícios poderá ser bem distinta.

### 6.5. Conclusões

Ao longo do presente capítulo apresentou-se a versão mais recente do Simulador de Cenários Sísmicos do LNEC, fornecendo-se uma panorâmica geral do seu modo de operação, dados, procedimentos e resultados. Para aferir os resultados do Simulador seleccionaram-se alguns sismos que no passado afectaram Portugal Continental e procedeu-se à simulação de alguns cenários sísmicos de ocorrência sobre elementos em risco actuais, comparando-se a mortalidade obtida com a verificada em sismos ocorridos no mundo na última década.

Na sequência da análise efectuada constata-se que as estimativas obtidas pelo Simulador são bastante consentâneas com os valores de danos e perdas humanas ocorridas em sismos que no passado afectaram Portugal Continental e em sismos mundiais recentes.

A falta de precisão das estatísticas existentes sobre os sismos que afectaram Portugal Continental impede que elas comprovem a veracidade dos resultados do Simulador de

Cenários Sísmicos; em contrapartida, esses mesmos resultados têm a virtude de não serem negados por essas estatísticas.

Sobre o desempenho dos diversos modelos utilizados ressaltam as seguintes conclusões:

1. A opção de avaliação de danos baseada em modelos mecanicistas fornece estimativas superiores às dos métodos estatísticos no caso de cenários de ocorrência afastados e de magnitude elevada e estimativas inferiores no caso de cenários de ocorrência próximos de magnitude moderada. A comparação entre os resultados do modelo mecanicista e os resultados dos modelos estatísticos são dificultadas pelas diferenças nas definições dos estados de dano. No entanto, com exceção do modelo de Zuccaro & Papa, os modelos estatísticos e mecanicista produzem resultados aproximados nos cenários analisados.
2. O modelo estatístico de danos de Zuccaro & Papa conduz a estimativas inferiores às ocorridas nos sismos históricos. Esta conclusão é válida para a gama de intensidades macrossísmicas analisada, que nos sismos históricos corresponde a intensidades elevadas. Para intensidades mais baixas, como as que se observaram fora da região epicentral no sismo de 1909, o modelo de Zuccaro & Papa já conduz a estimativas de danos mais consentâneas com as estimativas dos restantes modelos estatísticos.
3. O modelo de Giovinazzi & Lagomarsino estima tendências razoáveis para o crescimento e decrescimento dos danos quando se considera o estado de conservação das estruturas dos edifícios.
4. Sobre as perdas humanas, e no caso do modelo FEMA & NIBS, houve a necessidade de estabelecer um compromisso entre a subavaliação de vítimas nos cenários históricos e a sobreavaliação no cenário mais recente. Também no modelo de Coburn & Spence o cômputo de vítimas mortais é sempre superior ao de feridos, o que na realidade, apenas é confirmado pelas estatísticas de vítimas em regiões muito afectadas por sismos severos. Este resultado confirma a análise efectuada na secção 5.6.1 relativa a este modelo. De facto, o modelo de Coburn & Spence apenas considera as vítimas que ficam aprisionadas no colapso de edifícios. Entre os prisioneiros do colapso a mortalidade pós-colapso (factor  $M5$ ) é elevada, pelo que a estimativa do número de feridos é reduzida.
5. Os modelos de perdas económicas conduzem a valores de perdas relativamente elevados para sismos pouco intensos. Efectivamente, os factores de dano que nestes modelos multiplicam o número de edifícios nos estados de dano Ligeiro e Moderado (ver quadro 2.9 na secção 2.6.2) não são suficientemente reduzidos para contrabalançar o elevadíssimo número de edifícios existentes nestes estados de dano, para uma acção sísmica pouco severa. Esta conclusão é consentânea com a de um estudo efectuada para a Califórnia por Cao *et al.* [1999]. Estes autores analisaram a desagregação das perdas em relação ao factor de dano tendo concluído que a maioria das perdas resultava de factores de dano inferiores a 15-20%, independentemente do nível de perigosidade da região.

Como conclusão geral pode afirmar-se que, devido à sua estrutura modular, o Simulador de Cenários Sísmicos é um instrumento computacional bastante flexível, que permite uma actualização expedita de modelos e dados e a integração de diversas competências inter-disciplinares. O Simulador tem a vantagem de aliar as capacidades de visualização e análise espacial intrínsecas de um SIG aos modelos mais actuais de avaliação de danos no edificado e de perdas humanas. O Simulador de Cenários Sísmicos pode ser explorado para os mais diversos fins, nomeadamente: (i) o de avaliação do risco sísmico, (ii) o do planeamento e gestão da emergência sísmica, pois tem a capacidade de simular computacionalmente, num curto espaço de tempo, as perdas resultantes de cenários sísmicos múltiplos ou de sismos reais conhecidas a sua magnitude e localização do seu epicentro e (iii) o de apoio à decisão na definição de estratégias de mitigação do risco sísmico, permitindo estudar diversos cenários alternativos, em termos da ocorrência, área geográfica de incidência, ou tipo de construção sobre a qual intervir.

Os desafios de desenvolvimento que actualmente se colocam incluem:

1. A actualização do Simulador para versões mais recentes de SIG, por exemplo, o ArcGIS, com conseqüente necessidade de recodificação das rotinas de *Avenue*.
2. Incluir procedimentos adicionais no Simulador, como por exemplo (i) a caracterização da acção sísmica no local, sob a forma espectral, considerando um modelo de propagação da rotura em falha finita e de propagação no meio, que aliás está a ser actualmente implementado por Carvalho & Campos Costa [2004], ou (ii) a inclusão da avaliação dos danos nas componentes não estruturais dos edifícios para a metodologia mecanicista, ou (iii) o aperfeiçoamento de um modelo para a avaliação das necessidades de alojamentos temporários e realojamentos em consequência de um sismo, ou ainda (iv) a inclusão de modelos alternativos de perdas económicas mais rigorosos dos que actualmente implementados.
3. A disponibilização de versões específicas do Simulador através da *Internet*, com um âmbito de aplicação municipal, que permitam contemplar actualizações com informação local.
4. A avaliação da incerteza epistémica do estudo de risco sísmico de Portugal Continental, por meio de árvores lógicas. Com efeito, no que concerne à vulnerabilidade sísmica foram desenvolvidas neste trabalho ferramentas informáticas alternativas para a avaliação de danos em edifícios e para a avaliação de perdas humanas. A análise efectuada no presente capítulo contribuirá para apoiar decisões subjectivas sobre os factores de ponderação a atribuir aos diferentes ramos da árvore lógica.

## 7. AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO

### 7.1. Introdução

Neste capítulo efectua-se a avaliação do risco sísmico em termos de perdas económicas e humanas, para o território do Continente Português.

A secção 7.2 incide sobre as opções de modelação tomadas para a avaliação do risco sísmico e sobre as principais limitações da análise.

Na secção 7.3 analisaram-se as distribuições probabilísticas das perdas económicas e humanas, em cada concelho de Portugal Continental, permitindo avaliar a probabilidade anual de excedência de um determinado nível de perdas.

Na secção 7.4 estimam-se os valores esperados anuais das perdas económicas e humanas e analisa-se a influência sobre o risco das principais variáveis envolvidas. Neste contexto, desenvolveu-se, por regressão linear múltipla, um modelo que permite efectuar previsões expeditas do risco sísmico anual, dados os valores concretos das variáveis explicativas envolvidas, que traduzem a perigosidade, a vulnerabilidade e a exposição.

A secção 7.5 dedica-se ao problema da acumulação do risco sísmico que é tratado seguindo três abordagens diferentes: (i) a acumulação das perdas esperadas anuais obtidas a partir dos valores esperados anuais estimados para cada concelho (secção 7.5.1), (ii) a simulação dos efeitos de todos os eventos existentes no catálogo sísmico (secção 7.5.2) e (iii) a determinação de cenários de risco sísmico com base na análise de desagregação da perigosidade sísmica (secção 7.5.3). Comparam-se os níveis de risco entre regiões de Portugal Continental recorrendo-se a vários indicadores.

Na secção 7.6 faz-se a comparação de alguns dos resultados obtidos com avaliações de risco para outras regiões do globo recolhidas na literatura internacional.

O trabalho desenvolvido termina na secção 7.7 em que se sintetizam as principais conclusões sobre o risco sísmico a que o território de Portugal Continental se encontra exposto.

Para transmitir a ideia do nível de risco sísmico a que um habitante de Portugal Continental se encontra exposto quando comparado com o nível de exposição a outros tipos de risco, ou com o nível de exposição ao risco sísmico dos habitantes de outros países, mostra-se, no quadro 7.1, a probabilidade anual de uma pessoa morrer, em diversos locais do mundo, em consequência de diversos fenómenos, entre eles os sismos ou outros desastres naturais. Os valores reunidos no quadro 7.1 constituem meras expressões estatísticas dos níveis de risco analisados, obtidos por processos muito simplificados. Com estes valores apenas se pretende fornecer uma visão da importância relativa dos diversos riscos.

Para o efeito, os valores referentes ao risco sísmico de Portugal, apresentados a branco sobre fundo cinzento, foram obtidos pela divisão do valor médio anual das vítimas mortais de

sismos, num dado período de tempo, pela média ponderada da população que habitava neste território no mesmo período. Nesta análise foram considerados dois intervalos de tempo: o século XX e o período compreendido entre 1755, inclusive, e 2001. A grande disparidade dos valores obtidos nos dois períodos é explicada pelo elevado número de mortos originado pelo sismo de 1755 quando comparado com o reduzido número de vítimas mortais causado pelos sismos que afectaram o Continente Português no século XX. A apresentação de duas estimativas para o nível do risco sísmico no Continente teve o intuito de salientar a importância da exaustividade dos dados e da extensão do período de tempo em que são recolhidos.

Quadro 7.1 – Probabilidade anual de um indivíduo morrer [adaptado de Coburn et al., 1994].

Causas de morte	Probabilidade anual
Consumo diário de 10 cigarros	1 : 200
Todas as causas naturais aos 40 anos	1 : 850
Violência ou envenenamento	1 : 3 300
Acidente rodoviário em Portugal <sup>1</sup>	1 : 4 300
Gripe	1 : 5 000
Acidente rodoviário (na Europa)	1 : 8 000
Leucemia	1 : 12 500
<b>Sismo no Irão</b>	<b>1 : 23 000</b>
Prática de desportos	1 : 25 000
Acidente em casa	1 : 26 000
Acidente de trabalho	1 : 43 500
Inundações (Bangladesh)	1 : 50 000
Exposição a radiações (Indústria nuclear)	1 : 57 000
Homicídio (Europa)	1 : 100 000
Inundações (norte da China)	1 : 100 000
<b>Sismo em Portugal Continental (1755-2000)</b>	<b>1 : 105 000</b>
<b>Sismo no Arquipélago dos Açores (século XX)<sup>2</sup></b>	<b>1 : 252 000</b>
Acidente ferroviário (Europa)	1 : 500 000
<b>Sismo na Califórnia</b>	<b>1 : 2 000 000</b>
Condições meteorológicas extremas (EUA central e este) <sup>3</sup>	1 : 5 000 000
Relâmpago	1 : 10 000 000
Tempestade no norte da Europa	1 : 10 000 000
<b>Sismo em Portugal Continental (século XX)</b>	<b>1 : 13 400 000</b>

<sup>1</sup> Risco calculado a partir de dados da Direcção-Geral de Viação referentes a vítimas mortais de acidentes rodoviários ocorridos entre 1975 e 2003 [DGV, 2003].

<sup>2</sup> Risco baseado no número vítimas mortais publicado por Nunes & Ribeiro [2001] e na evolução da população no período mencionado.

<sup>3</sup> McGuire [2004].

Ao longo deste capítulo serão apresentadas estimativas de risco obtidas por métodos mais sofisticados do que os conducentes às probabilidades representadas no quadro 7.1. Esses métodos permitem considerar a distribuição geográfica da perigosidade sísmica, bem como a variação temporal, geográfica e tipológica da vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco.

## 7.2. Opções e limitações da avaliação do risco sísmico

Para evitar tornar a presente dissertação demasiada extensa houve a necessidade de se optar por um dos vários modelos de danos e perdas ensaiados no capítulo 6.

Nesse capítulo verificou-se que, para os cenários analisados, os modelos estatísticos e mecanicista simulam quantitativos aproximados de danos no edificado, exceção feita para o modelo de Zuccaro & Papa que, por essa razão, não será utilizado. Ora, a opção pela via de modelação de danos baseada em dados estatísticos é cerca de trinta vezes menos dispendiosa, em termos de tempo processamento, do que a alternativa mecanicista. Nestas circunstâncias, é razoável que o critério de tempo de processamento prevaleça na escolha do modelo de danos, pelo que esta recaiu sobre a opção de modelação estatística.

Entre os três modelos estatísticos de danos disponíveis o de Giovinazzi & Lagomarsino, o de Di Pasquale & Orsini e o de Tiedemann, optou-se pelo primeiro. De facto, o modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino tem subjacente uma classificação tipológica mais fina do parque habitacional que a dos outros dois modelos, tendo também a possibilidade de contemplar os novos factores de vulnerabilidade apurados nos Censos, como o estado de conservação dos edifícios. Tem ainda a vantagem de considerar a fragilidade das tipologias construtivas para vários estados de dano, em lugar de se basear apenas em curvas de vulnerabilidade médias, como o faz o modelo de Tiedemann. Consequentemente, a escolha do modelo estatístico de danos de Giovinazzi & Lagomarsino implica a utilização do modelo de perdas económicas da Protecção Civil Italiana [SSN, 1998] e do modelo de perdas humanas de Coburn & Spence (ver fluxograma do Simulador na figura 6.1).

Advertir-se porém, que as avaliações efectuadas ao longo deste capítulo constituem uma aproximação ao nível do risco sísmico real a que o Continente Português se encontra sujeito, pois os dados recolhidos e os modelos implementados apresentam algumas limitações.

Por exemplo, a implementação do modelo de Giovinazzi & Lagomarsino foi realizada impondo-se, à partida, uma truncatura para intensidades EMS-98 inferiores a V. Com efeito, este modelo admite uma probabilidade não nula, embora reduzida, de ocorrência de graus de dano diferentes de 0, para intensidades inferiores a V o que contraria a definição dos graus de intensidade da escala EM-98. Esses valores de probabilidade reduzidos aliados a um número muito elevado de edifícios em regiões extensas e ao modelo de perdas económicas do quadro 2.9, tem como consequência uma avaliação das perdas, por excesso, nas regiões de perigosidade mais baixa, quando comparada com a avaliação das perdas com a imposição dessa truncatura.

Por outro lado, as perdas económicas absolutas avaliadas para o território do Continente decorreram, exclusivamente, das estimativas dos danos nos edifícios do parque habitacional o que tem como consequência uma sub-avaliação das perdas para todo o território. De facto, tal como foi referido nos capítulos 4 e 5, os edifícios de habitação são os únicos tipo de estruturas para os quais existe uma base de dados disponível e exaustiva, fornecendo informação sobre a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional de todo o Continente, à data dos Censos 2001.

Outros elementos em risco, tais como edifícios exclusivamente não habitacionais, edifícios vitais para a gestão da emergência (hospitais, etc.) edifícios monumentais, infra-estruturas e redes, etc., não serão incluídos na actual avaliação do risco. Acresce que nesta análise apenas foram contemplados os custos directos de reparação dos edifícios de habitação em consequência dos danos causados por sismos, para um dado período de tempo, não tendo sido analisados outras perdas directas como as do recheio dos edifícios ou a interrupção temporária de actividades económicas, apenas para dar dois exemplos.

No caso do modelo mecanicista FEMA & NIBS além de não terem sido analisadas as perdas nos recheios dos edifícios apenas foram considerados os danos nas componentes estruturais dos mesmos.

Também não foram analisadas as perdas resultantes de perigos e efeitos colaterais induzidos por sismos (liquefacção, incêndios etc.), nem as perdas indirectas ou as perdas intangíveis.

Na secção 7.7 reúnem-se algumas estimativas grosseiras de valores relativos de perdas que não foram contempladas neste estudo.

Outra hipótese de trabalho simplificadora prende-se com o pressuposto de que todos os edifícios, não dispensados de dimensionamento para as acções sísmicas, construídos em data posterior à da entrada em vigor do RSCCS [1958], teriam sido projectados e construídos de acordo com as normas sismo-resistentes em vigor à data da sua construção. Por exemplo, os edifícios de betão armado com data de construção posterior a 1960 representam cerca de 28% do parque apurado em 2001 (ver quadro 4.6) e, na prática, não existem garantias que apresentem um desempenho sísmico consentâneo com o preconizado nos regulamentos.

Ao contrário das perdas económicas, as estimativas de perdas humanas não estão condicionadas pela ausência de levantamentos exaustivos dos elementos em risco, pois baseiam-se no recenseamento da população total residente em Portugal Continental. No entanto, têm um constrangimento adicional, resultante de apenas serem válidas para cenários de ocorrência de sismos, em que a população se encontra maioritariamente nas suas habitações, uma vez que a mobilidade espacial não foi modelada, tal como foi mencionado na secção 4.1. Além disso, o risco probabilístico de perdas humanas foi abordado exclusivamente em termos de vítimas mortais, não se contemplando estimativas de feridos ou desalojados.

Face a estas restrições, efectuaram-se avaliações do risco sísmico, específico e absoluto, e estimaram-se as perdas económicas e humanas para os concelhos do Continente Português. Posteriormente, acumularam-se os valores esperados destas perdas para regiões mais vastas.

Para facilitar a percepção dos valores envolvidos os resultados são apresentados com recurso a diversos indicadores de risco, alguns deles facilmente relacionáveis entre si. Por exemplo, contabilizaram-se as perdas económicas em termos de valores monetários e em termos de valores relativos ao PIB de Portugal de 2001. Foram também avaliadas as percentagens de área habitacional perdida do parque de 2001, o número de vítimas mortais, etc.

### 7.3. Distribuição probabilística das perdas por concelho

#### 7.3.1. Perdas económicas

Seguindo a formulação exposta na secção 2.6.2 apresentam-se e analisam-se os resultados da avaliação probabilística do risco sísmico, em termos de perdas económicas, para os 278 concelhos do Continente. Optou por se exibir dois indicadores de risco, ao nível do concelho: a percentagem de área habitacional perdida e as perdas em termos de percentagem do PIB de 2001 de Portugal. O primeiro indicador encontra-se normalizado pelo valor dos elementos expostos em cada concelho, constituindo um indicador do risco específico, enquanto que o segundo é um indicador do risco sísmico absoluto.

Nas figuras 7.1 e 7.2 mostram-se as envolventes das distribuições probabilísticas do risco sísmico, em termos económicos, para todos os concelhos do território Continental, evidenciando-se a distribuição obtida para o concelho de Lisboa.

A informação subjacente à figura 7.1 permite afirmar que a envolvente máxima das distribuições probabilísticas do risco específico coincide, para a grande maioria dos períodos de retorno, com a distribuição do risco do concelho de Aljezur, localizado no Barlavento Algarvio. Para períodos de retorno elevados, a envolvente máxima passa a coincidir com a distribuição probabilística do risco específico do concelho de Monchique também localizado no Barlavento Algarvio. Por outro lado, a envolvente mínima coincide com a distribuição probabilística do risco específico do concelho de Esposende, no distrito de Braga.

Se o risco analisado for o absoluto a envolvente máxima representada na figura 7.2 coincide com a distribuição probabilística do risco económico do concelho de Lisboa, o que é consistente com o valor significativo dos elementos em risco deste concelho. A envolvente mínima coincide com a distribuição probabilística do risco económico do concelho de Manteigas no distrito da Guarda.

Ilustrando o tipo de informação passível de ser extraída da figura 7.1, refira-se, por exemplo, que no concelho de Lisboa, existe uma probabilidade anual de 1 em 1 000 de ser excedido um patamar de 10% de área habitacional perdida e uma probabilidade de 10%, em 50 anos, de ser excedido um nível de 7% da área habitacional perdida, devido a sismos potenciais. Relatando a mesma informação por outras palavras, conclui-se que também em consequência de sismos potenciais as perdas de pelo menos 10% da área do parque habitacional de Lisboa têm um período de retorno de 1 000 anos e que perdas de pelo menos 7% dessa área têm um período de retorno de 475 anos.

Analogamente, da análise da figura 7.2 conclui-se que existe uma probabilidade anual de 1 em 100 de ser excedido, em Lisboa, um valor de perdas económicas de 0,13% do PIB de 2001 e uma probabilidade de 5%, em 50 anos, de ser excedido um valor de perdas de 0,6% do PIB de 2001. Fornecendo a mesma informação de outra forma, pode afirmar-se que, pelo menos 0,13% do PIB de 2001 é perdido, em média, em Lisboa de 100 em 100 anos, em

consequência de sismos, e que pelo menos 0,6% do PIB de 2001 é perdido, em média, em Lisboa, de 975 em 975 anos.

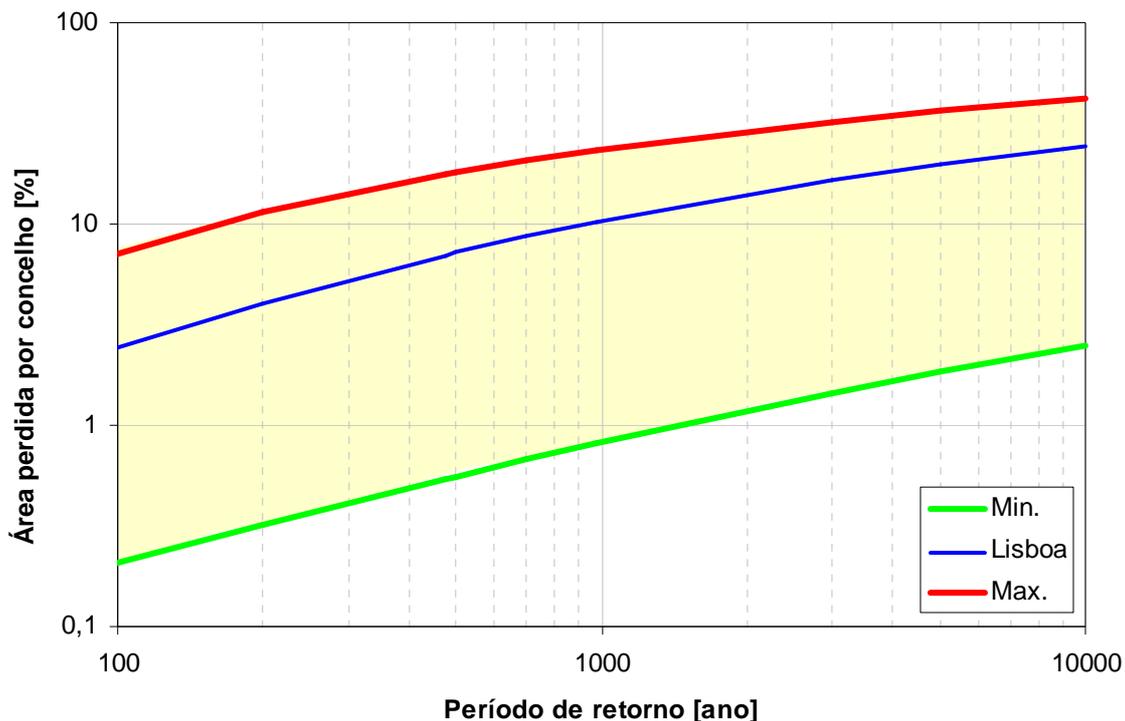


Figura 7.1 – Distribuições probabilísticas de perdas económicas específicas de todos os concelhos do País, medidas em termos de percentagem de área habitacional perdida.

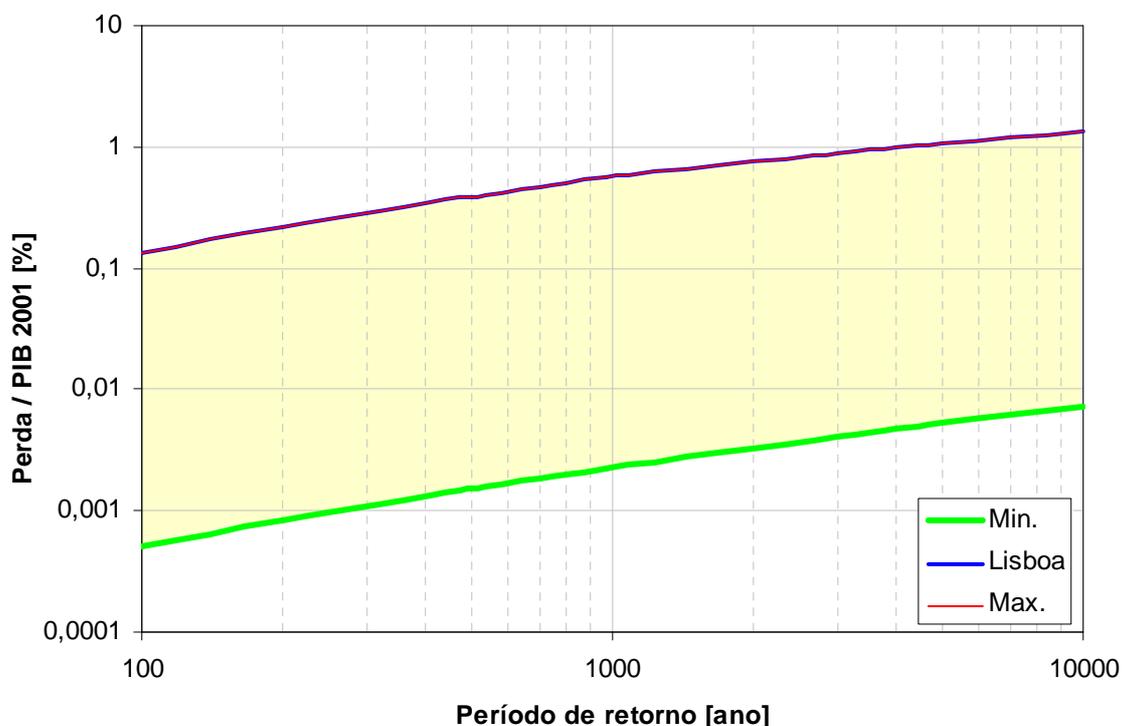


Figura 7.2 – Distribuições probabilísticas de perdas económicas absolutas de todos os concelhos do País, medidas em termos de percentagem do PIB de 2001.

Na figura 7.3 exemplifica-se a distribuição geográfica do risco sísmico, em termos económicos, para as probabilidades de excedência de 10 e 5% num período de tempo de exposição de 50 anos.

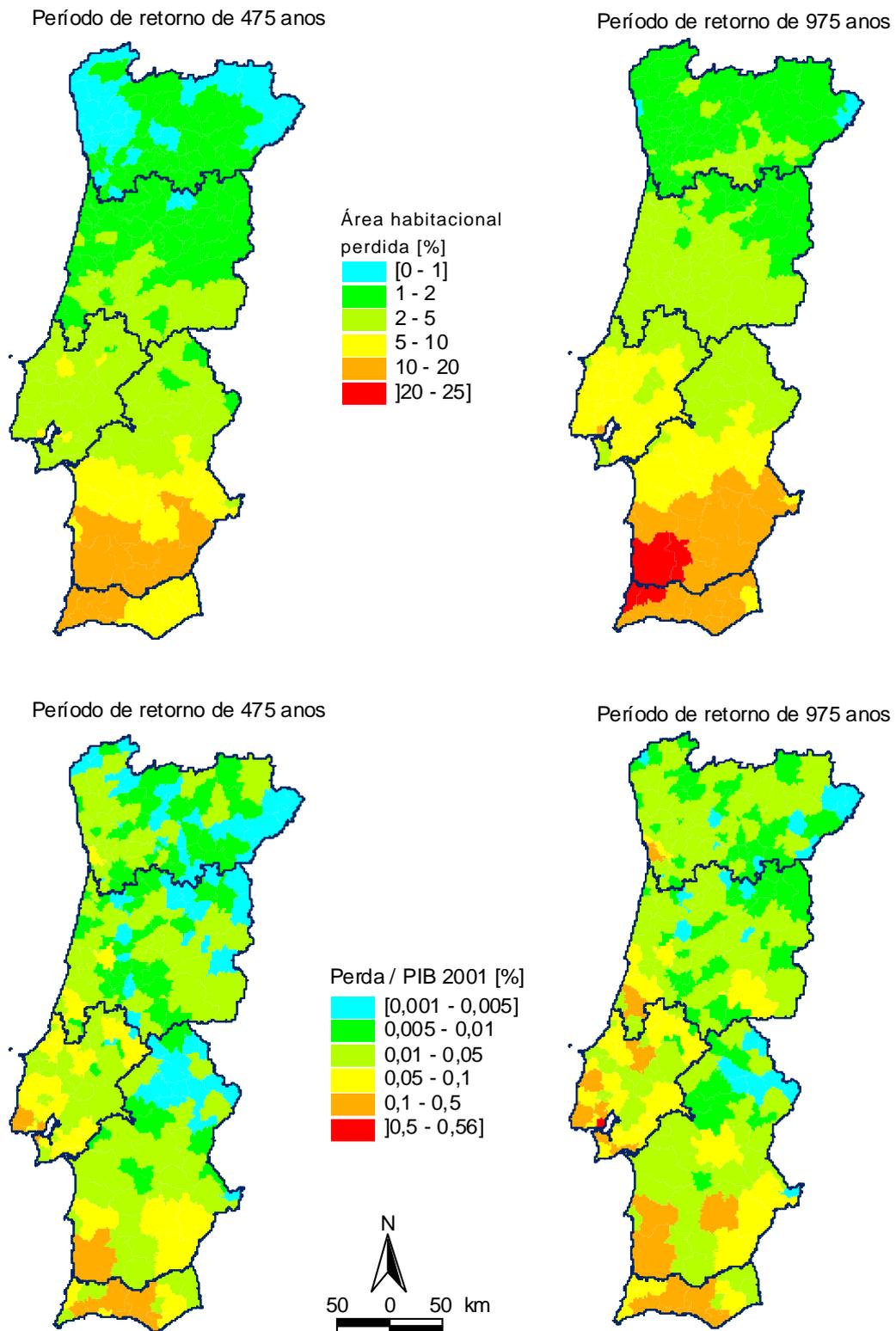


Figura 7.3 – Perdas económicas, por concelho, para os períodos de retorno de 475 e 975 anos.

Reconhece-se a coerência das distribuições geográficas representadas na figura 7.3 com a análise das envolventes das distribuições probabilísticas de perdas traçadas nas figuras 7.1 e 7.2. Nesse sentido, os valores máximos do risco específico ocorrem no Algarve, Baixo Alentejo e sul do Alentejo Litoral, em particular nos concelhos de Odemira e Ourique no distrito de Beja e nos concelhos de Aljezur e Monchique no distrito de Faro.

A influência regional da perigosidade sísmica, decrescendo de sudoeste para nordeste de Portugal Continental condiciona sobremaneira os resultados agora obtidos. As diferenças entre o padrão das cartas de risco específico (figura 7.3 topo) e as de perigosidade sísmica (figura 3.5) deverão ser atribuídas à variação geográfica da vulnerabilidade sísmica. Efectivamente, a percentagem de edifícios com estrutura de Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta (ATAPS), classificados na tipologia mais vulnerável da metodologia de avaliação de danos de Giovinazzi & Lagomarsino, é muito elevada no Alentejo (ver figura 5.17). Consequentemente, apesar da perigosidade sísmica ser mais severa no Barlavento Algarvio, a percentagem elevada de edifícios vulneráveis no Alentejo, implica que, para além do Algarve, os maiores valores do risco específico económico também surjam nesta região.

Já na carta de risco sísmico económico absoluto, constante do quadrante inferior direito da figura 7.3, é particularmente nítido o efeito da concentração dos elementos em risco sísmico nas principais áreas metropolitanas do Continente (ver figura 4.25), principalmente a de Lisboa. Os valores elevados do risco sísmico, não poderão certamente ser dissociados das características regionais da perigosidade e vulnerabilidade sísmicas, pelo que também surgem na região Algarvia a oeste de Faro e no sul do Alentejo Litoral.

A distribuição geográfica das perdas é semelhante para os dois períodos de retorno, sendo, obviamente, a severidade das perdas superior para o período de retorno mais elevado.

### **7.3.2. Perdas humanas**

Na figura 7.4 mostram-se as envolventes das distribuições probabilísticas do risco sísmico, em termos de vítimas mortais, para todos os concelhos do território Continental, traçando-se a azul a distribuição obtida para o concelho de Lisboa.

A envolvente máxima coincide, para a grande maioria dos períodos de retorno, com a distribuição probabilística das vítimas mortais do concelho de Lisboa. A informação subjacente a esta figura também permite afirmar que, para alguns dos períodos de retorno entre os 100 e os 1000 anos, a envolvente máxima coincide com a distribuição do probabilística do risco sísmico do concelho de Odemira, que abrange todo o litoral do distrito de Beja, embora se constate que a distribuição probabilística do risco no concelho de Lisboa esteja próxima da envolvente máxima.

Para a grande maioria dos períodos de retorno, a envolvente mínima coincide com a distribuição probabilística das vítimas mortais do concelho de Penedono, situado a nordeste

no distrito de Viseu, e, para períodos de retorno superiores a 1 000 anos, coincide com a distribuição probabilística de vítimas mortais do concelho de Miranda do Douro, no distrito de Bragança.

Outro tipo de análise da figura 7.4 permite concluir que, por exemplo, no concelho de Lisboa, existe uma probabilidade anual de 1 em 100 de ocorrerem mais de 1,7 vítimas mortais em consequência de sismos, uma probabilidade de 10% de, em 50 anos, serem excedidas 74 vítimas mortais e uma probabilidade de 5% de, em 50 anos, serem excedidas 194 vítimas mortais.

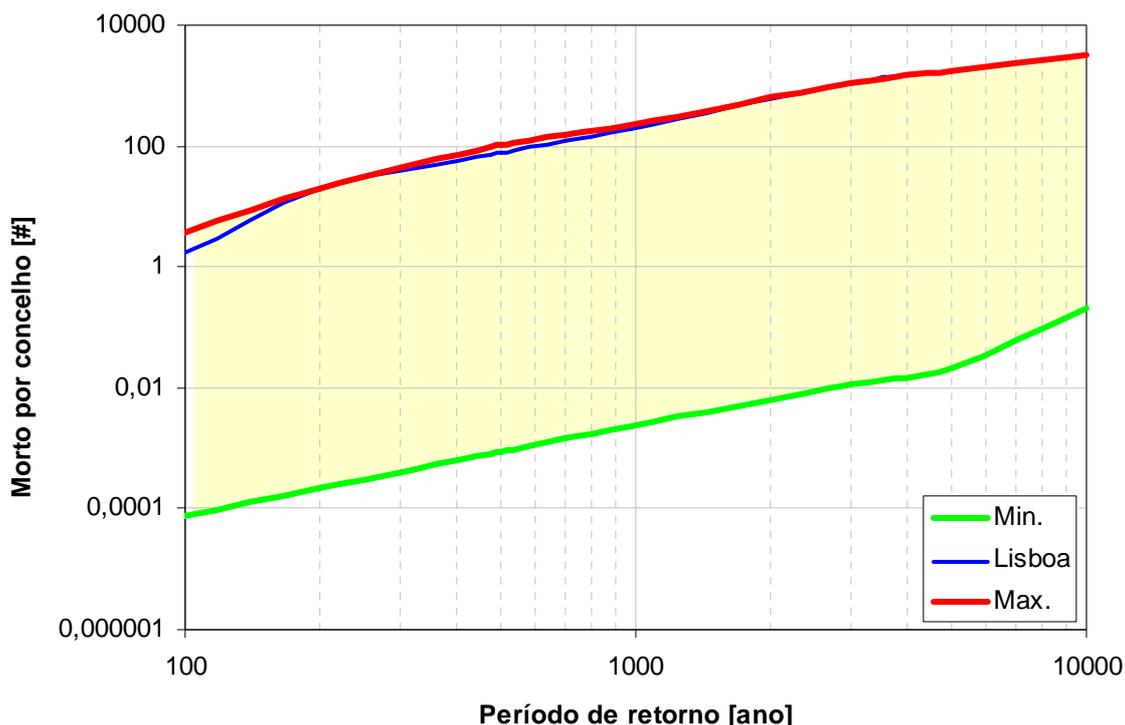


Figura 7.4 – Distribuição probabilística de perdas humanas para todos os concelhos do País.

Na figura 7.5 ilustra-se a distribuição geográfica do risco sísmico, em termos de perdas humanas, para as probabilidades de excedência de 5 e 10% num período de tempo de exposição de 50 anos.

A influência regional da perigosidade sísmica encontra-se bem patente nas duas cartas de risco de perdas humanas, pois genericamente o risco decresce de sudoeste para nordeste no Continente. Sendo o número de vítimas mortais um indicador do risco absoluto, também sobressai na figura 7.5 a concentração da população em risco, sobretudo no concelho de Lisboa, corroborando o que já tinha sido observado na figura 7.4. Mais uma vez, a concentração dos edifícios mais vulneráveis no Alentejo (figura 5.17) combinada com perigosidade sísmica elevada no Algarve (figura 3.5), conduzem à obtenção de estimativas de perdas humanas elevadas no sul do Alentejo Litoral e no Algarve, a oeste de Faro. Ressalva-se que nas regiões Norte, Centro e nas zonas a norte das regiões de Lisboa e Vale do Tejo e do Alentejo os mapas da figura 7.5 apresentam um risco de morte uniforme e reduzido.

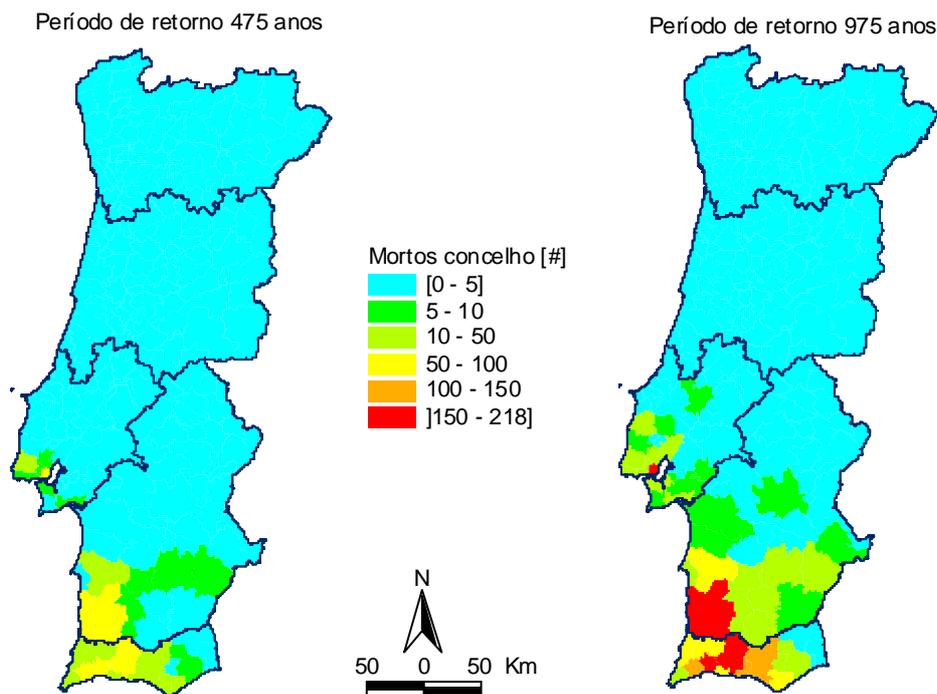


Figura 7.5 – Perdas humanas, por concelho, para os períodos de retorno de 475 e 975 anos.

## 7.4. Valor esperado anual das perdas em consequência de sismos

### 7.4.1. Objectivos

São objectivos desta secção avaliar e analisar os valores esperados anuais das perdas económicas e humanas, em consequência de sismos, em Portugal Continental, e compreender a influência das variáveis *perigosidade*, *vulnerabilidade* e *exposição* sobre o risco sísmico. Os valores esperados anuais das perdas serão avaliados a partir do modelo probabilístico de risco sísmico formulado na secção 2.6.2, ou seja, recorrendo à expressão 2.51.

### 7.4.2. Variáveis envolvidas

À semelhança das secções anteriores o risco sísmico é caracterizado em termos absolutos e relativos, económicos e humanos. Para caracterizar o risco absoluto estimam-se os valores esperados anuais das perdas económicas, *AEL*, e das perdas humanas, *AED*, em consequência de sismos potenciais. No que concerne ao risco específico estimam-se: (i) os valores esperados anuais das perdas económicas normalizadas pelo valor de reposição do parque habitacional da região, *AELR*, (ii) os valores esperados anuais das perdas económicas normalizadas pela população residente na região, ou seja, as perdas económicas *per capita*, *AELC*, e (iii) os valores esperados anuais das perdas humanas também normalizadas pela população residente na região, *AEDR*. Relembre-se que no quadro 2.10 da secção 2.6.2 se apresentou uma matriz a especificar os indicadores de risco que são utilizados neste capítulo.

Nesta fase é necessário escolher as unidades a utilizar para os indicadores de risco. Por exemplo, o risco económico absoluto (*AEL*) avaliado em percentagem de PIB de 2001 é de compreensão mais imediata do que o risco expresso em milhões de Euro. O mesmo se aplica ao risco económico específico (*AELR*) expresso em termos de percentagem de área habitacional perdida que também é de compreensão mais imediata do que o risco específico expresso em permilagem, ou seja, em termos de Euro por milhar de Euro do valor dos edifícios expostos. Note-se que para preços de construção constantes, por m<sup>2</sup>, o *AELR* expresso em Euro por milhar de Euro, apresenta valores dez vezes superiores ao *AELR* expresso em percentagem de área habitacional perdida. Contudo, as unidades dos indicadores utilizados nesta secção foram escolhidas com o intuito de viabilizar a comparação das estimativas agora obtidas com resultados de outros estudos realizados noutras regiões do globo (ver secção 7.6), expressos em milhões de USD e em permilagem.

Para estudar a influência das variáveis perigosidade, vulnerabilidade e valor dos elementos expostos ao risco sísmico sobre os valores esperados anuais do risco sísmico revelou-se necessária a construção de descritores ou índices médios destas variáveis.

Para descrever a perigosidade sísmica  $H$  de cada concelho, medida em termos de intensidade macrossísmica, adoptou-se o valor esperado desta variável aleatória, calculado a partir da sua distribuição de probabilidade para um período de tempo de exposição de 50 anos (ver expressão 2.17).

Simbolizou-se o índice de perigosidade assim obtido por  $IH$ , embora ao longo desta secção seja, algumas vezes, designado simplesmente de perigosidade.

A descrição da vulnerabilidade média de cada concelho,  $\bar{V}$ , foi obtida a partir da ponderação do índice de vulnerabilidade total  $\bar{V}_I$  (definido na secção 2.4.4.3) pelas existências das várias tipologias de edifícios do concelho.

O valor dos elementos expostos ao risco sísmico, num concelho, é descrito pelo valor de reposição dos edifícios do parque habitacional ( $VRPH$ ) aí existentes (ver secções 2.6.2 e 6.2.3) e pela população total nele residente ( $Np_T$ ).

A figura 7.6 exhibe a distribuição geográfica, por concelho, das variáveis que explicam os valores esperados anuais do risco sísmico.

As distribuições geográficas, por concelho, das diversas medidas das perdas económicas esperadas anuais, em consequência de sismos potenciais, são representadas na figura 7.7.

Mais uma vez os traços mais salientes nas cartas de risco específico (topo da figura 7.7) são os seus valores elevados no Alentejo e Algarve, em particular no sul do Alentejo Litoral, no Baixo Alentejo e no Barlavento Algarvio, enquanto que os indicadores que medem o risco absoluto (parte inferior da figura 7.7) evidenciam os maiores valores do risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e também no sul do Alentejo Litoral (concelho de Odemira) e no centro do Algarve (concelhos de Silves e Loulé).

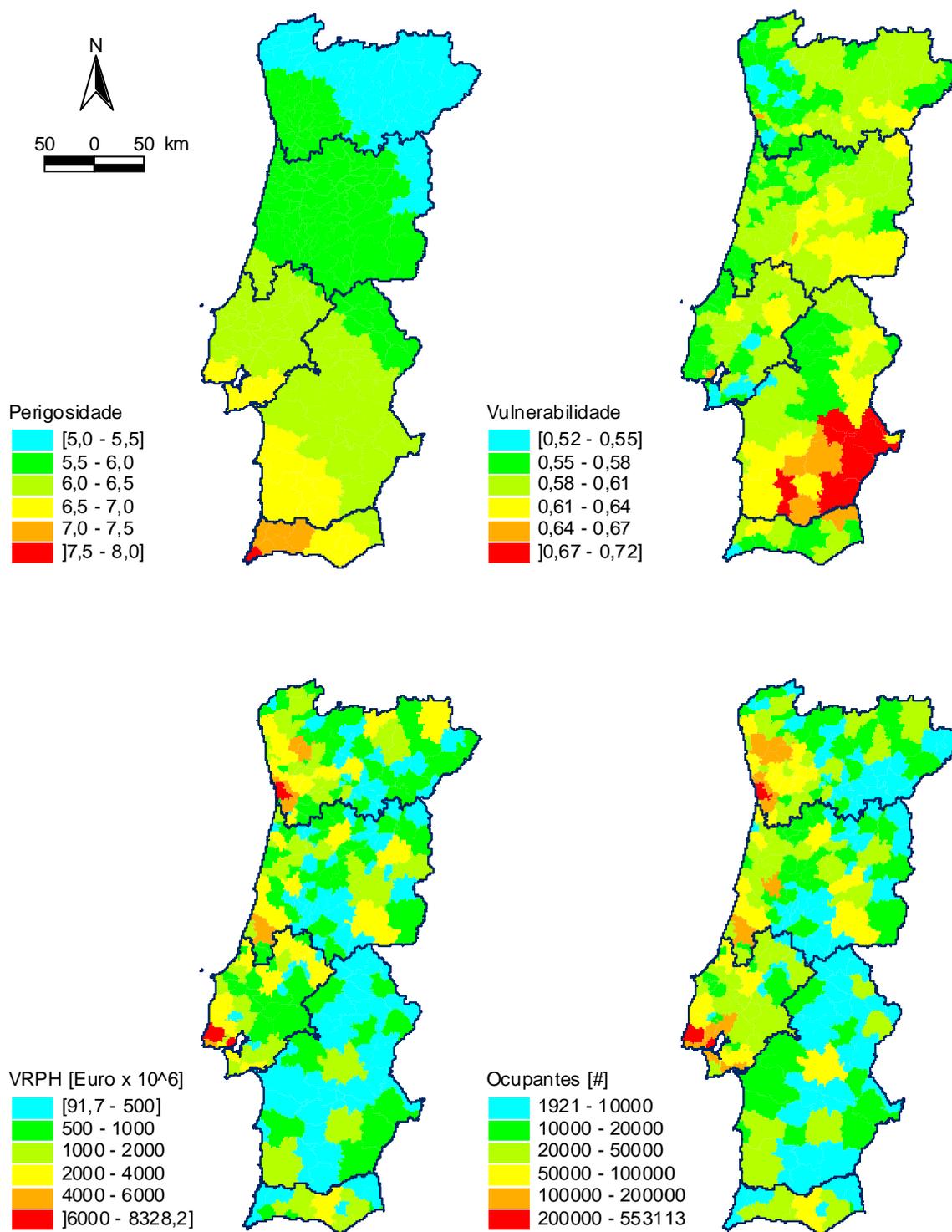


Figura 7.6 – Variáveis envolvidas na avaliação do risco sísmico, por concelho.

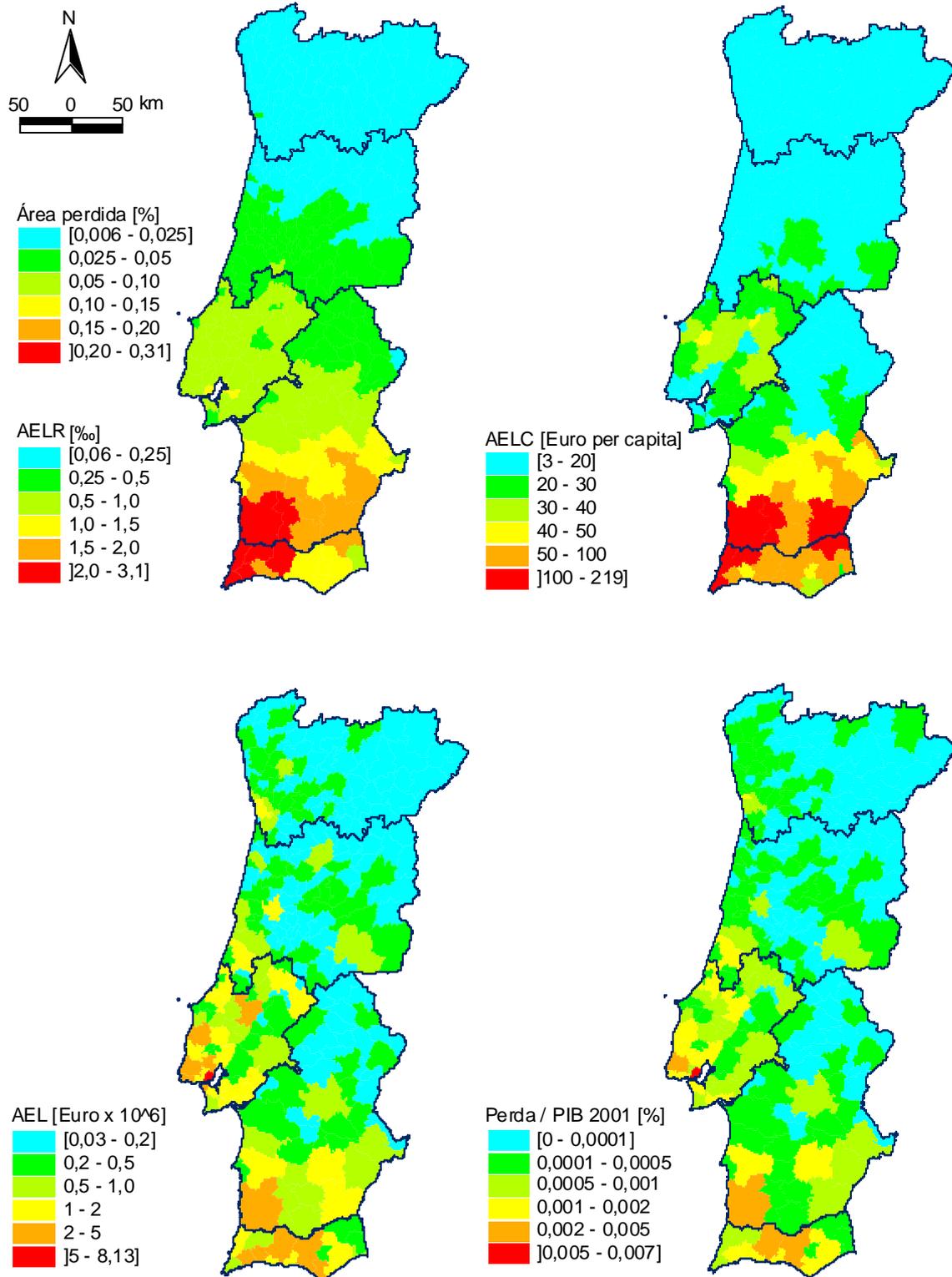


Figura 7.7 – Perdas económicas esperadas anuais, por concelho.

A figura 7.8 mostra a distribuição geográfica, por concelho, dos valores esperados anuais das vítimas mortais, decorrentes de sismos. Na perspectiva do risco absoluto (à esquerda) salienta-se o valor mais elevado de vítimas mortais anuais no sul do Alentejo Litoral, no Barlavento Algarvio e particularmente em Lisboa. Em termos relativos (à direita) salienta-se o sul do distrito de Beja e todo o Barlavento Algarvio, relevando-se os concelhos do litoral oeste destas regiões (Odemira, Aljezur, Vila do Bispo e Monchique).

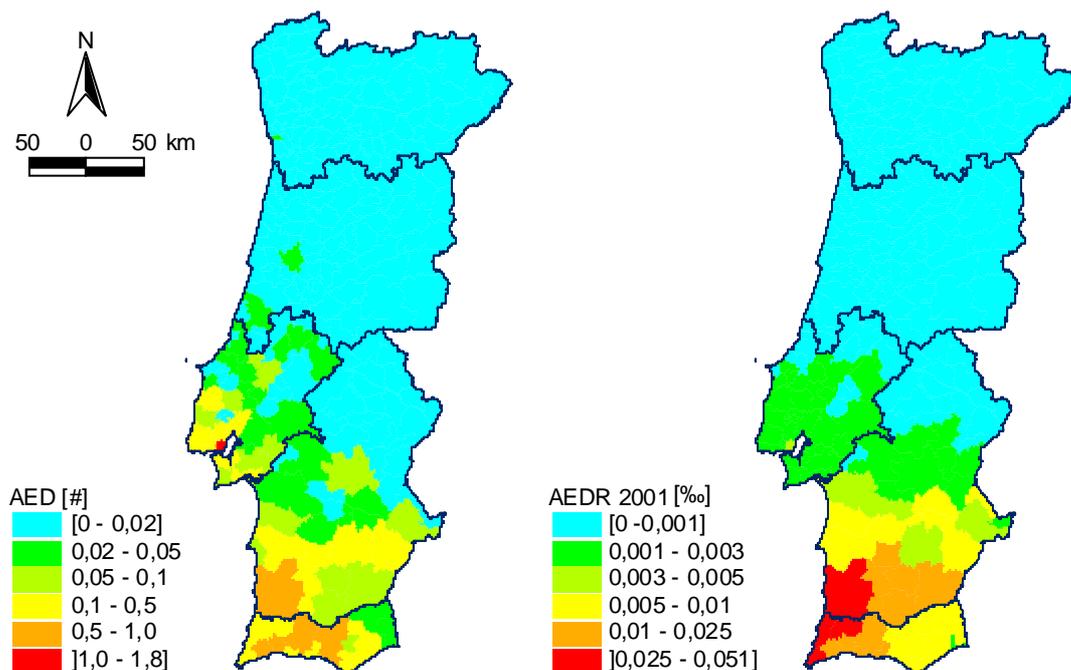


Figura 7.8 – Perdas humanas esperadas anuais, por concelho.

### 7.4.3. Modelos de regressão para o risco sísmico

Uma vez determinados para cada concelho do Continente Português as variáveis envolvidas no processo de avaliação do risco sísmico anual, ou seja, o valor esperado do índice de perigosidade,  $IH$ , a média da vulnerabilidade,  $\bar{V}$ , e sendo também conhecido o valor de reposição do parque edificado em risco,  $VRPH$ , e a população nele residente,  $N_{pT}$ , ensaiaram-se diversos modelos causais do tipo:

$$\mathcal{R} = g(IH, \bar{V}, VRPH, N_{pT}) \quad (7.1)$$

em que  $g$  é um modelo linear, ou linearizável, que traduz a dependência entre cada indicador do risco sísmico anual médio, designado genericamente por  $\mathcal{R}$ , e as variáveis explicativas  $IH$ ,  $\bar{V}$ ,  $VRPH$  e  $N_{pT}$ .

Como seria de esperar, as variáveis valor de reposição e população possuem uma correlação elevada entre si, de cerca de 90%, pelo que não foram utilizadas em simultâneo nos modelos.

Os parâmetros dos modelos de risco sísmico anual médio foram ajustados, por análise de regressão linear múltipla [StatSoft, 2004], aos valores das variáveis explicativas e explicadas, observadas ou estimadas nos 278 concelhos de Portugal Continental. Condicionaram-se os vários modelos de regressão linear múltipla ensaiados a serem estatisticamente significativos de acordo com o teste  $F$ , a 5%, e a terem parâmetros significativamente diferentes de zero de acordo com o teste  $t$  para o mesmo nível de significância.

A primeira indicação sobre o modelo de regressão múltipla a utilizar foi fornecida pela análise de regressão simples efectuada entre os indicadores de risco e cada variável explicativa. Por exemplo, a curva a verde na figura 7.9, em cima, indica a existência de uma tendência exponencial na relação entre a variável que traduz o risco específico e o índice de perigosidade.

Entre os modelos de regressão múltipla analisados escolheu-se, para ser representado graficamente, aquele que possui a maior capacidade explicativa. Mais concretamente, exemplifica-se na figura 7.9 o modelo da variável  $AELR$  em função da perigosidade e da vulnerabilidade sísmicas (expressão 7.2).

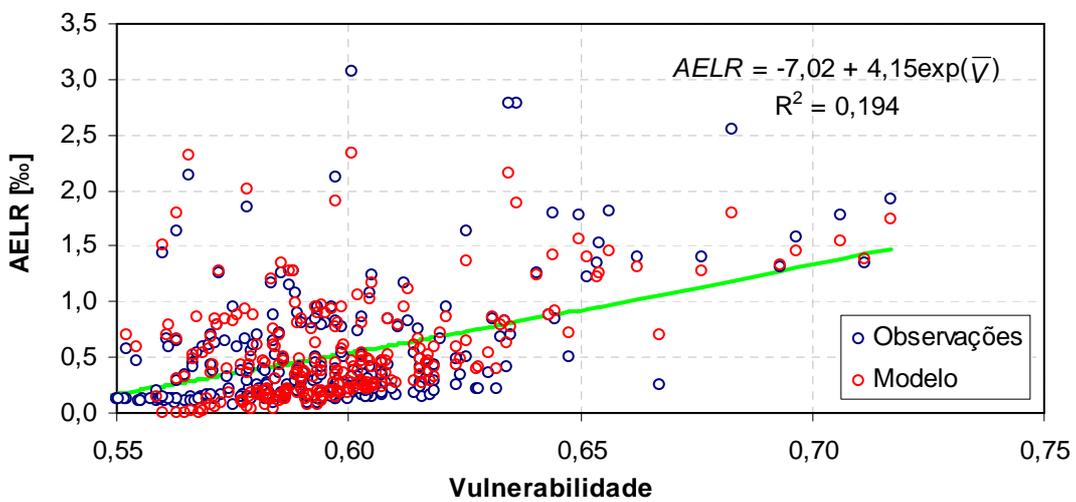
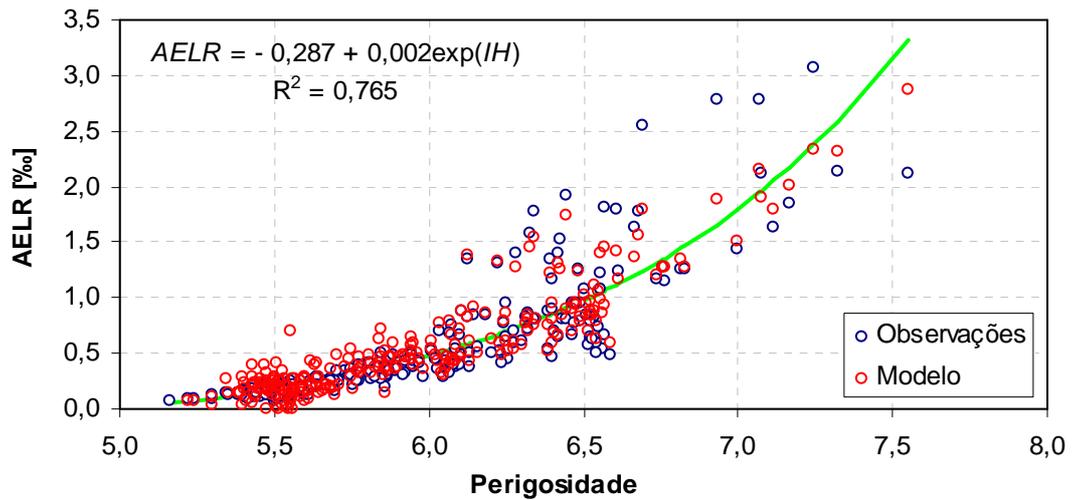
As marcas encarnadas da figura 7.9, em cima e ao centro ilustram, bidimensionalmente, segundo cada variável explicativa, o modelo de regressão múltipla do risco sísmico (expressão 7.2). Também é efectuada, em baixo, a representação tridimensional do modelo de regressão de  $AELR$  e respectivos dados.

Nas expressões 7.2 e 7.3 apresentam-se os modelos de risco sísmico obtidos, explicitando-se os respectivos parâmetros, os coeficientes de determinação múltipla ajustados e os erros das estimativas. Os indicadores de risco que não constam destas expressões decorrem facilmente das variáveis dependentes aí modeladas, conjugadas com as observações dos valores de reposição e/ou da população da região analisada, ou seja, aplicando as expressões 2.52 a 2.54 da secção 2.6.2.

$$AELR [\%] = -9,122 + 0,002 \times \exp(IH) + 5,146 \times \exp(\bar{V}) \quad R_a^2 = 0,892 \quad \text{erro} = 0,180 \quad (7.2)$$

$$AEDR [\%] = -0,031 + 0,00002 \times \exp(IH) + 0,014 \times \exp(\bar{V}) \quad R_a^2 = 0,668 \quad \text{erro} = 0,0033 \quad (7.3)$$

Verifica-se que o modelo que traduz o risco de perdas humanas possui uma capacidade explicativa inferior ao modelo que traduz o risco de perdas económicas.



**Modelo:**  $AELR [\%] = -6,738 + 0,002 \exp(IH) + 3,574 \exp(\bar{V})$   
 $R^2$  ajustado = 0,908      erro da estimativa = 0,157 [%]

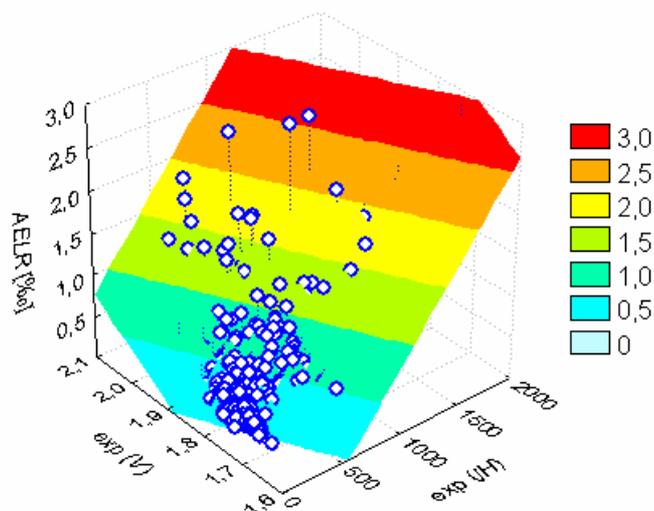


Figura 7.9 – Valores de AELR nos 278 concelhos de Portugal Continental em função das variáveis explicativas perigosidade e vulnerabilidade; modelo de risco sísmico e tendências bidimensionais.

#### 7.4.4. Análise do risco sísmico dos concelhos de Portugal Continental

Nesta secção far-se-á a análise do risco sísmico anual, por concelho de Portugal Continental, tentando explicar-se a forma como as diferentes variáveis envolvidas influenciam os indicadores de risco esperado.

A figura 7.10 exemplifica a distribuição do risco sísmico nos concelhos de Portugal Continental representando um histograma da frequência de ocorrência de dois indicadores de risco, as perdas esperadas anuais económicas e humanas.

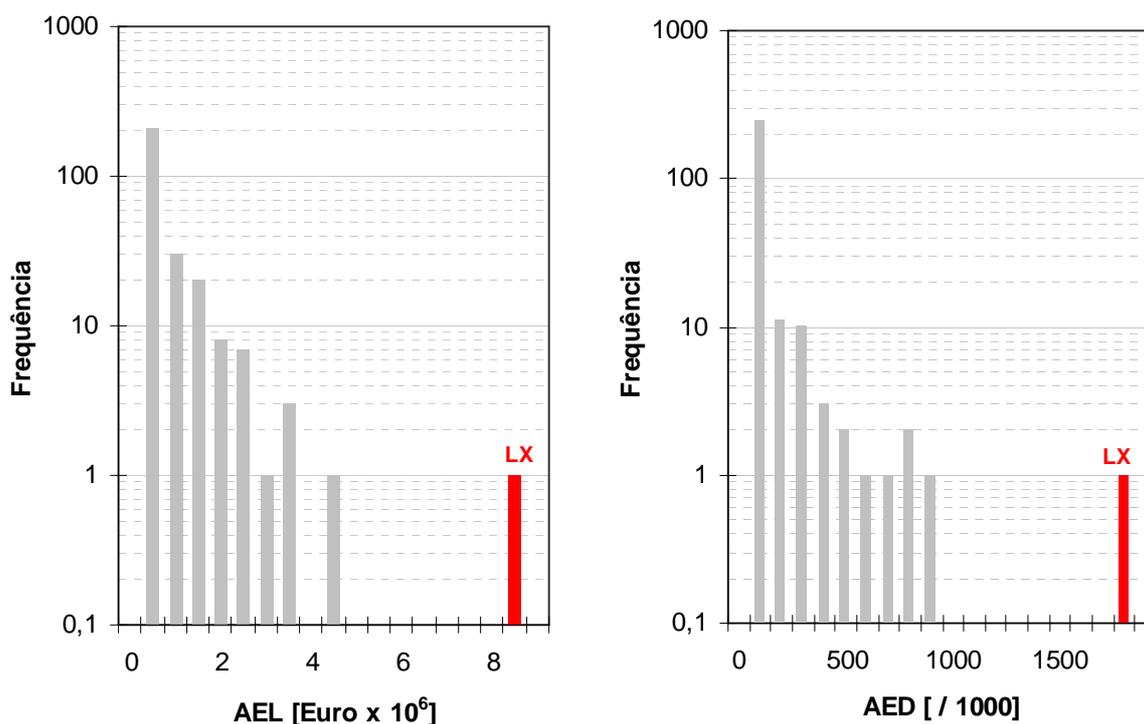


Figura 7.10 – Histogramas das perdas esperadas anuais, económicas e humanas, por concelho.

A classe modal da distribuição de *AEL* engloba o seu valor mínimo, o qual ocorre no concelho de Manteigas (ver quadro 7.2). No mesmo histograma salienta-se o concelho de Lisboa (LX), que entre os 278 concelhos do Continente possui o maior valor de *AEL*, localizando-se numa classe destacada das restantes.

Também no histograma de *AED* se destaca o concelho de Lisboa com cerca de 1,8 mortes por ano, em consequência de sismos.

No quadro 7.2 descreveu-se, de forma sintética, algumas estatísticas dos diversos indicadores do risco distribuído pelos 278 concelhos de Portugal Continental. Neste quadro sobressai o concelho de Lisboa, por possuir os maiores valores das duas medidas de risco absoluto analisadas *AEL* e *AED*, e o concelho de Aljezur, no Barlavento Algarvio, onde se presenciam os maiores valores das três medidas de risco específico analisadas, *AELR*, *AELC* e

*AEDR*. Note-se a elevada dispersão dos valores obtidos denotando a grande variabilidade do risco sísmico entre os diversos concelhos do Continente.

Quadro 7.2 – Estatísticas de risco sísmico para os 278 concelhos de Portugal Continental.

Risco	valor mínimo	valor máximo	Média	Desvio padrão
<i>AEL</i> [Euro × 10 <sup>6</sup> ]	0,026 (Manteigas)	8,13 (Lisboa)	0,487	0,765
<i>AELR</i> [%o]	0,063 (Miranda do Douro)	3,06 (Aljezur)	0,497	0,517
<i>AELC</i> [Euro <i>per capita</i> ]	2,64 (S. J. da Madeira)	219 (Aljezur)	20,6	25,1
<i>AED</i> [/ 1000]	0,1366 (Penedono)	1778 (Lisboa)	50,82	155,2
<i>AEDR</i> [%o]	0,00002 (Miranda do Douro)	0,05054 (Aljezur)	0,00202	0,00568

No remanescente da presente secção analisa-se, com maior detalhe, o risco sísmico anual, absoluto e específico, nos 18 concelhos de Portugal Continental que incluem as capitais de distrito deste território.

Tal como é enunciado pela expressão 2.51 da secção 2.6.2 os indicadores de risco absoluto de cada concelho, resultam da integração do produto da função densidade de probabilidade da perigosidade sísmica pelas perdas esperadas para os diferentes níveis da acção sísmica correspondendo, assim, às áreas delimitadas pelas curvas das figuras 7.11 e 7.12. Estas ilustram a análise de desagregação das perdas esperadas anuais económicas e humanas em termos da intensidade macrossísmica.

Nestas figuras foram desenhadas a tracejado as perdas resultantes de intensidades macrossísmicas inferiores ao grau V, para evidenciar a necessidade de truncatura abaixo deste grau do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. De forma consentânea, os valores de *AEL* e *AED* indicados nas legendas das figuras correspondem às áreas delimitadas pelas curvas a cheio, truncadas para intensidades inferiores a V. Com efeito, não existem evidências históricas para a ocorrência de perdas elevadas em edifícios em consequência de sismos nos concelhos do norte do Continente, como as que seriam estimadas caso não se impusesse a referida truncatura. No entanto, a descontinuidade resultante desta truncatura também será discutível, nomeadamente pela natureza probabilística do método de avaliação de danos em causa e também pela subjectividade na atribuição dos graus de intensidade macrossísmica. Essa descontinuidade é ainda mais marcante devido ao facto do modelo de perdas económicas (quadro 2.9) conduzir a valores de perdas relativamente elevados para sismos pouco intensos. Desta forma, para efeitos comparativos, serão apresentados, na secção 7.5.1, estimativas de risco acumulado anual para regiões de Portugal Continental com e sem a imposição da referida truncatura.

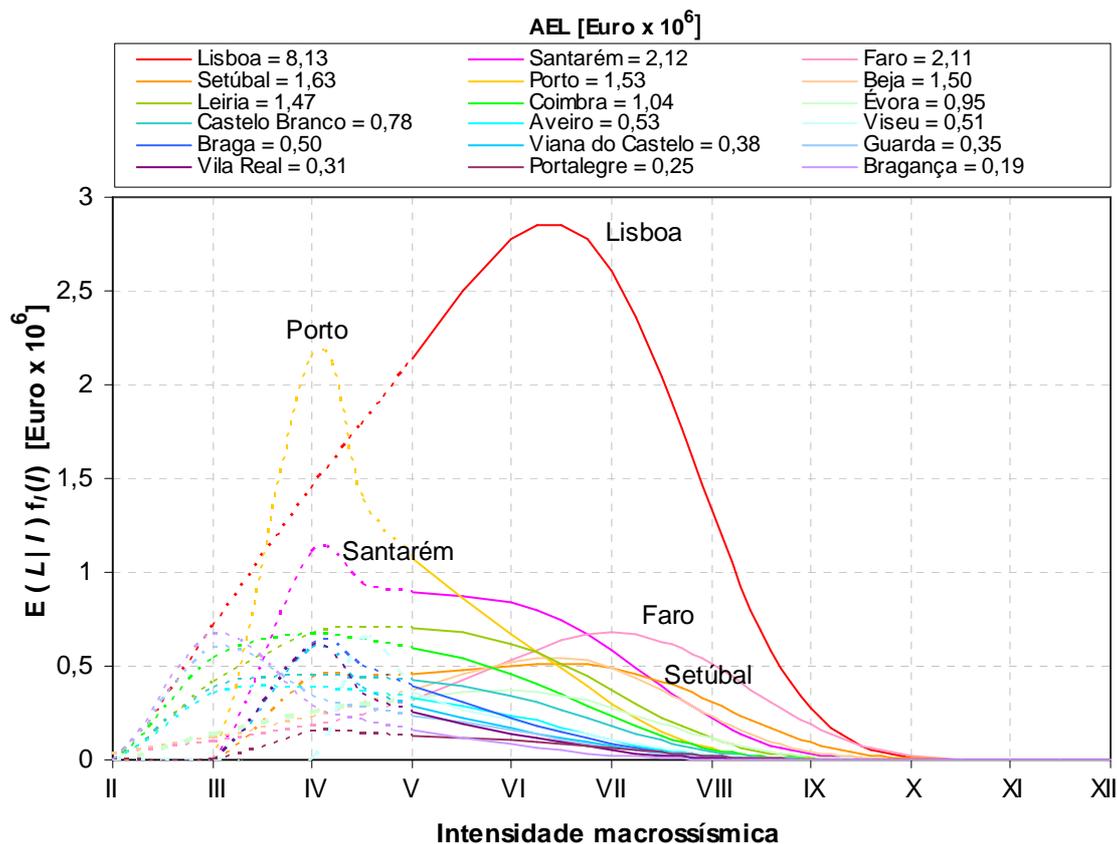


Figura 7.11 – Valores esperados anuais das perdas económicas, para os 18 concelhos de Portugal Continental que incluem as capitais de distrito.

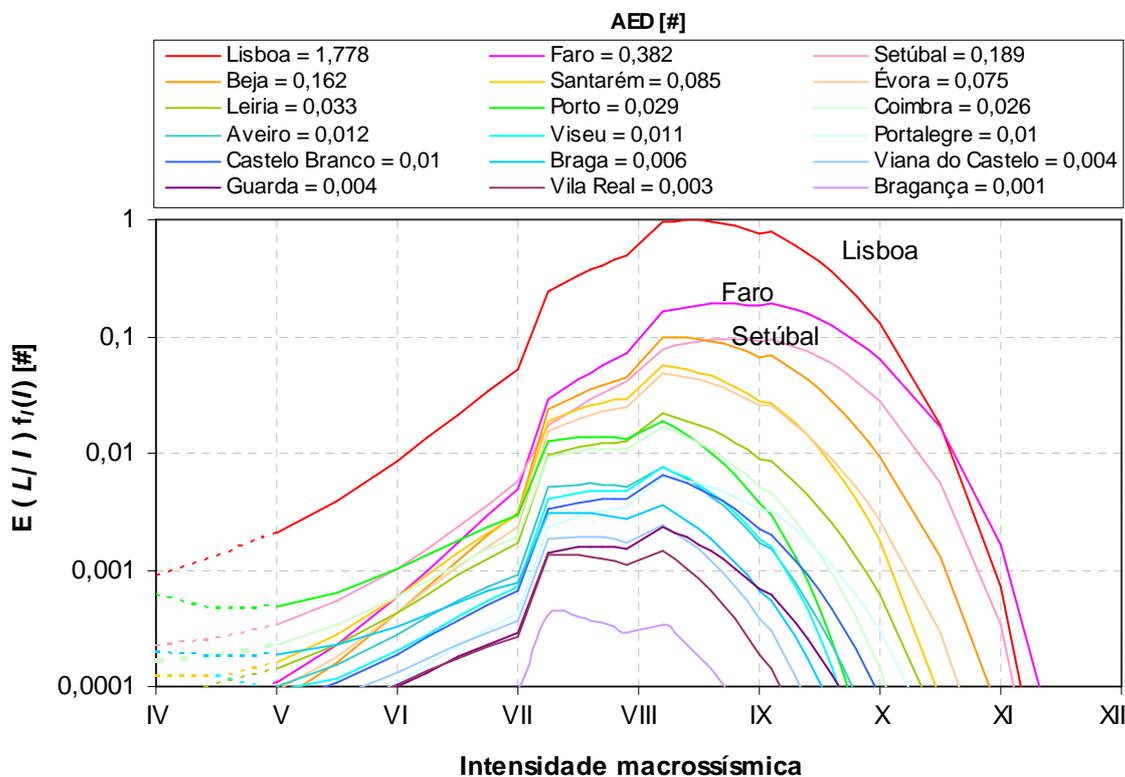


Figura 7.12 – Valores esperados anuais das perdas humanas, para os 18 concelhos de Portugal Continental que incluem as capitais de distrito.

Nas figuras 7.11 e 7.12 confirma-se a relevância do concelho de Lisboa em termos dos valores esperados das perdas absolutas anuais em consequência de sismos. Nota-se também que, para cada concelho analisado, a intensidade correspondente ao maior valor da ordenada ilustrada na figura 7.11 é inferior à intensidade correspondente ao maior valor da ordenada ilustrada na figura 7.12. Tal significa que os níveis de perigosidade que dominam as perdas económicas esperadas anuais serão inferiores aos níveis de perigosidade com maior relevância para as perdas humanas esperadas anuais. Outra razão para desenhar a parte tracejada das curvas é que permite verificar que nos concelhos localizados mais a norte no Continente, e com perigosidade mais reduzida, as curvas traçadas na figura 7.11 apresentam uma assimetria positiva, enquanto que nos concelhos localizados mais a sul no Continente, em regiões de maior perigosidade apresentam uma assimetria negativa. Assim se conclui que são baixos os níveis de perigosidade que mais contribuem para as perdas nos concelhos localizados no norte.

No quadro 7.3 listam-se os referidos 18 concelhos por ordem decrescente dos valores das variáveis envolvidas na avaliação do risco sísmico: o índice de perigosidade, o valor médio da vulnerabilidade, o valor de reposição do parque habitacional e o número de indivíduos residentes em risco. No mesmo quadro, mostram-se a branco sobre fundo cinzento os valores médios de todas as variáveis explicativas obtidos para os 278 concelhos de Portugal Continental.

Nos quadros 7.4 e 7.5 ordenam-se os 18 concelhos por valores decrescentes das *AEL*, *AELR*, *AELC*, *AED* e *AEDR* com o intuito de fornecer uma visão hierarquizada da severidade do risco sísmico anual em alguns concelhos do País. Analogamente, em texto branco sobre fundo cinzento indicam-se os valores médios de todos os indicadores de risco obtidos para os 278 concelhos de Portugal Continental. No anexo D listam-se todos os 278 concelhos de Portugal Continental por valores decrescente dos indicadores de risco.

Sobre os valores esperados das perdas económicas anuais constantes do quadro 7.4 refira-se, mais uma vez, que o concelho de Lisboa sobressai por possuir a *AEL* mais elevada. O risco elevado de Lisboa é consentâneo com o maior valor de reposição do seu parque habitacional entre todos os concelhos de Portugal e com índices de perigosidade e vulnerabilidade elevados (2º e 3º das listas respectivas).

A perda absoluta anual estimada para Lisboa é cerca de quatro vezes superior à perda estimada para o segundo concelho da lista, o de Santarém. Este concelho da região de Lisboa e Vale do Tejo tem uma posição cimeira na lista das *AELs* (2º), devido a valores moderadamente elevados dos respectivos índices de perigosidade (6º) e de vulnerabilidade (5º) e a um valor próximo do mediano (8º) de reposição do seu parque habitacional. Já os 3º e 4º lugar da lista das *AELs*, ocupados pelos concelhos de Faro e Setúbal, respectivamente, devem-se aos valores elevados dos seus índices de perigosidade (1º e 3º, respectivamente), pois os índices vulnerabilidade apresentam valores semelhantes, tendo sido remetidos para 11º e 12º lugar. O valor reduzido de reposição do parque habitacional do concelho de Faro (15º) relativamente ao de Setúbal (9º) acaba por ser compensado pelos seus índices de perigosidade e vulnerabilidade mais elevados.

Quadro 7.3 – Ordenação dos concelhos de Portugal Continental, que incluem as 18 capitais de distrito, pelo valor de reposição do seu parque habitacional (VRPH), indivíduos residentes, e índices de perigosidade e vulnerabilidade sísmica.

Ordem do concelho	VRPH [Euro × 10 <sup>6</sup> ]	Indivíduos [#]	Ordem do concelho	Indivíduos [#]	Ordem do concelho	Perigosidade [int. macros.]	Ordem do concelho	Índice Vulnerab.
1. Lisboa	6686	553 113	1. Lisboa	553 113	1. Faro	6,816	1. Porto	0,667
2. Porto	6099	261 190	2. Porto	261 190	2. Lisboa	6,555	2. Beja	0,663
3. Leiria	4352	163 468	3. Braga	163 468	3. Setúbal	6,527	3. Lisboa	0,652
4. Braga	4268	147 817	4. Coimbra	147 817	4. Beja	6,418	4. Castelo Branco	0,617
5. Coimbra	3874	119 511	5. Leiria	119 511	5. Évora	6,304	5. Santarém	0,611
6. Viana do Castelo	3783	113 155	6. Setúbal	113 155	6. Santarém	6,244	6. Portalegre	0,607
7. Viseu	3359	92 690	7. Viseu	92 690	7. Leiria	6,040	7. Guarda	0,596
8. Santarém	2738	88 162	8. Viana do Castelo	88 162	Portugal Continental	5,910	Portugal Continental	0,594
9. Setúbal	2613	72 936	9. Aveiro	72 936	8. Portalegre	5,871	8. Bragança	0,591
10. Castelo Branco	2536	63 237	10. Santarém	63 237	9. Coimbra	5,815	9. Coimbra	0,590
11. Vila Real	2394	56 983	11. Faro	56 983	10. Castelo Branco	5,741	10. Aveiro	0,587
12. Aveiro	2176	56 267	12. Évora	56 267	11. Aveiro	5,671	11. Faro	0,586
13. Guarda	2052	55 361	13. Castelo Branco	55 361	12. Viseu	5,563	12. Setúbal	0,571
14. Bragança	2045	49 788	14. Vila Real	49 788	13. Porto	5,553	13. Évora	0,570
15. Faro	1672	43 961	15. Guarda	43 961	14. Braga	5,513	14. Vila Real	0,568
16. Évora	1546	35 449	16. Beja	35 449	15. Guarda	5,509	15. Leiria	0,565
Portugal Continental	1114	35 212	Portugal Continental	35 212	16. Vila Real	5,476	16. Braga	0,562
17. Beja	1074	34 662	17. Bragança	34 662	17. Viana do Castelo	5,459	17. Viana do Castelo	0,560
18. Portalegre	748	25 926	18. Portalegre	25 926	18. Bragança	5,243	18. Viseu	0,560

Quadro 7.4 – Ordenação dos concelhos de Portugal Continental, que incluem as 18 capitais de distrito, pelos valores esperados anuais do seu risco sísmico medido em termos económicos.

Ordem do concelho	AEL [Euro × 10 <sup>6</sup> ]	Ordem do concelho	AELR [%]	Ordem do concelho	AELC [Euro per capita]
1. Lisboa	8,132	1. Beja	1,398	1. Beja	42,3
2. Santarém	2,115	2. Faro	1,259	2. Faro	37,0
3. Faro	2,106	3. Lisboa	1,216	3. Santarém	33,4
4. Setúbal	1,634	4. Santarém	0,773	4. Évora	16,9
5. Porto	1,531	5. Setúbal	0,625	5. Lisboa	14,7
6. Beja	1,501	6. Évora	0,616	6. Setúbal	14,4
7. Leiria	1,466	Portugal Continental	0,437	7. Castelo Branco	14,1
8. Coimbra	1,038	7. Leiria	0,337	Portugal Continental	13,8
9. Évora	0,953	8. Portalegre	0,335	8. Leiria	12,3
10. Castelo Branco	0,782	9. Castelo Branco	0,308	9. Portalegre	9,7
11. Aveiro	0,530	10. Coimbra	0,268	10. Guarda	8,0
12. Viseu	0,511	11. Porto	0,251	11. Aveiro	7,3
13. Braga	0,504	12. Aveiro	0,244	12. Coimbra	7,0
Portugal Continental	0,487	13. Guarda	0,171	13. Porto	6,3
14. Viana do Castelo	0,384	14. Viseu	0,152	14. Vila Real	5,9
15. Guarda	0,351	15. Vila Real	0,130	15. Viseu	5,5
16. Vila Real	0,311	16. Braga	0,118	16. Bragança	5,3
17. Portalegre	0,251	17. Viana do Castelo	0,101	17. Viana do Castelo	4,4
18. Bragança	0,185	18. Bragança	0,090	18. Braga	3,1

Quadro 7.5 – Ordenação dos concelhos de Portugal Continental, que incluem as 18 capitais de distrito, pelos valores esperados anuais do seu risco sísmico medido em termos de vítimas mortais.

Ordem do concelho	AED [1000]
1. Lisboa	1778,0
2. Faro	382,3
3. Setúbal	189,1
4. Beja	162,3
5. Santarém	85,2
6. Évora	74,6
<b>Portugal Continental</b>	<b>50,8</b>
7. Leiria	33,4
8. Porto	29,0
9. Coimbra	25,7
10. Aveiro	11,6
11. Viseu	10,8
12. Portalegre	10,1
13. Castelo Branco	9,9
14. Braga	6,2
15. Viana do Castelo	3,8
16. Guarda	3,6
17. Vila Real	2,5
18. Bragança	0,7

Ordem do concelho	AEDR [%]
1. Faro	0,006709
2. Beja	0,004579
3. Lisboa	0,003215
4. Setúbal	0,001671
<b>Portugal Continental</b>	<b>0,001443</b>
5. Santarém	0,001347
6. Évora	0,001325
7. Portalegre	0,000388
8. Leiria	0,000280
9. Castelo Branco	0,000179
10. Coimbra	0,000174
11. Aveiro	0,000160
12. Viseu	0,000116
13. Porto	0,000111
14. Guarda	0,000083
15. Vila Real	0,000050
16. Viana do Castelo	0,000043
17. Braga	0,000038
18. Bragança	0,000021

O concelho do Porto ocupa o 5º lugar da lista das *AELs* devido ao valor elevado de reposição do seu parque habitacional (2º) e ao valor elevado do seu índice de vulnerabilidade (1º), apesar de se encontrar numa região de perigosidade sísmica reduzida (13º).

O concelho de Beja apresenta um valor de perdas esperadas económicas anuais próximo do valor do concelho do Porto, pois embora ambos os concelhos apresentem índices de vulnerabilidade em posição cimeiras (2º e 1º, respectivamente), o valor elevado da perigosidade sísmica do concelho do Alentejo (4º) contribui para a sua transição de um décimo sétimo lugar da lista dos valores de reposição para a sexta posição da lista das *AEL*.

Em contrapartida, o concelho de Bragança tem a *AEL* mais reduzida da lista, uma vez que se situa em 14º lugar no que se refere ao valor de reposição do seu parque habitacional, em último lugar (18º) em termos da sua perigosidade sísmica e numa posição próxima da mediana (8ª), entre os concelhos analisados, no que respeita à sua vulnerabilidade sísmica.

Outro exemplo digno de menção é o dos concelhos de Beja e Leiria que, apesar de possuírem riscos absolutos idênticos (6º e 7º da lista de *AEL*), na hipótese de estarem sujeitos a uma acção sísmica de intensidade semelhante, o primeiro concelho é susceptível de sofrer danos percentuais mais elevados que o segundo. Com efeito, na lista de *AELR*, Beja localiza-se 6 posições acima do concelho de Leiria (1º vs 7º) em consequência de possuir índices de perigosidade (4º vs 7º) e vulnerabilidade (2º vs 15º) superiores. Os dois concelhos acabam por possuir *AEL* idênticos em consequência do valor de reposição do parque habitacional de Leiria ser cerca de quatro vezes superior ao de Beja (3º vs 17º).

Os concelhos que se situam numa posição cimeira da lista das *AELR* são aqueles que possuem uma vulnerabilidade e/ou perigosidade sísmica elevadas, como é o caso do concelho de Lisboa, e/ou têm valores reduzidos de reposição do seu parque habitacional, como ocorre no concelho Beja. Este concelho reúne todas as condições necessárias para ocupar uma posição cimeira na lista das *AELR* (1º), ou seja, um valor de reposição do parque habitacional baixo (17º) e valores de perigosidade e vulnerabilidade elevados (4º e 2º, respectivamente). Aplica-se um raciocínio idêntico na explicação da posição cimeira do concelho de Beja na lista das *AELC* (1º), substituindo apenas o valor de reposição do seu parque habitacional pelo número de pessoas nele residentes e confirmando que este número é coerentemente baixo (16º).

Os concelhos de Lisboa, Santarém e Faro sobressaem-se por se encontrarem entre as primeiras cinco posições nas listas dos três indicadores de risco sísmico económico reunidos no quadro 7.4. Entre as seis posições cimeiras destes três indicadores de risco sísmico económico também se encontram os concelhos de Beja e Setúbal.

Quanto aos valores esperados das perdas humanas absolutas anuais, expostos no quadro 7.5, sobressai, mais uma vez, o concelho de Lisboa com um valor esperado anual de 1,8 vítimas mortais, cerca de 5 vezes superior ao número de mortes esperadas por ano para o segundo concelho da lista, o de Faro. Este concelho do Algarve tem uma posição cimeira na lista de *AED*, devido ao valor elevado da sua perigosidade sísmica, o que aliás também se verifica no concelho de Lisboa (1º e 2º da lista do índice de perigosidade no quadro 7.5).

Note-se que a população presente no concelho de Faro tem uma sazonalidade elevada, potenciando o risco nas épocas de férias e que essa sazonalidade não foi tida em consideração nesta análise, pelo que se obteve uma estimativa por defeito do risco real anual deste concelho. Em termos de importância relativa de valores de *AED* seguem-se os concelhos de Setúbal, Beja e Santarém ocupando os 3º, 4º e 5º lugares, respectivamente, que correspondem a valores superiores ao valor médio de *AED* para Portugal Continental.

O concelho de Bragança é o que possui os valores esperados de risco de perdas humanas, *AED* e *AEDR*, mais reduzidos (18º lugar das respectivas listas), confirmando a relevância da variável perigosidade sísmica nesta análise. De facto, este é o concelho com menor índice de perigosidade entre os 18 analisados.

Sobre a lista de *AEDR* observa-se que o concelho de Faro é aquele que revela o maior risco específico, em termos de perdas humanas. Também os concelhos de Beja, Lisboa e Setúbal e Santarém atingem valores de *AEDR* elevados (2º, 3º, 4º e 5º, respectivamente), secundando a análise atrás efectuada sobre o risco sísmico em termos económicos.

Concluindo, os concelhos que possuem riscos de perdas humanas mais elevado são, por ordem alfabética, os de Beja, Faro, Lisboa, Santarém e Setúbal.

Por fim compara-se a ordenação das listas elaboradas segundo os diversos indicadores de risco sísmico, constatando-se que os cinco concelhos mencionados no parágrafo anterior ocupam sempre uma entre as seis primeiras posições de todos os indicadores de risco.

## **7.5. Avaliação do risco sísmico acumulado**

### **7.5.1. Acumulação das perdas esperadas anuais**

Para se ter uma visão global do valor esperado anual do risco sísmico por regiões de Portugal Continental analisam-se as perdas acumuladas para o conjunto de elementos em risco que se encontram distribuídos nessas regiões.

No quadro 7.6 procede-se à acumulação dos valores esperados anuais das perdas económicas e humanas para regiões mais vastas que o concelho, nomeadamente a Área Metropolitana de Lisboa (AML) as Unidades Territoriais para fins Estatísticos de 2º nível, NUTS II, e o território do Continente. Esta acumulação fornece uma visão global do risco sísmico de Portugal Continental e permite efectuar abordagens comparativas entre regiões do Continente. No mesmo quadro também se exibem os quantitativos dos elementos em risco e os seus valores de exposição, assinalando-se a negrito os maiores valores, entre todas as NUTS II, dos quantitativos dos elementos em risco, da exposição e dos indicadores de risco.

Remete-se de novo para o quadro 6.3, da secção 6.3.2, a explicação do código dos modelos utilizados nas estimativas.

A inclusão no quadro 7.6 de dois modelos alternativos para a avaliação do risco esperado anual teve o objectivo de estudar a sensibilidade dos resultados à opção pela truncatura do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino para intensidades macro sísmicas inferiores ao grau V.

Quadro 7.6 – Valores esperados anuais do risco sísmico na AML, NUTS II e Portugal Continental (designado de PT).

	AML	Norte	Centro	LVT	Alentejo	Algarve	Total PT	
Nº concelhos	19 (7%)	<b>86</b> <b>(31%)</b>	78 (28%)	51 (18%)	47 (17%)	16 (6%)	278 (100%)	
EXISTÊNCIAS	Edifícios [#]	402 598 (13%)	<b>1 100 329</b> <b>(37%)</b>	758 480 (25%)	721 868 (24%)	256 439 (9%)	160 543 (5%)	2 997 659 (100%)
	Indivíduos [#]	2 644 632 (27%)	<b>3 667 602</b> <b>(37%)</b>	1 773 498 (18%)	3 426 179 (35%)	531 520 (5%)	390 310 (4%)	9 789 109 (100%)
	Área edif. [m <sup>2</sup> × 10 <sup>6</sup> ]	87 (14%)	<b>247</b> <b>(40%)</b>	141 (23%)	155 (25%)	37 (6%)	31 (5%)	611 (100%)
	VRPH [Euro × 10 <sup>6</sup> ]	49 011 (16%)	<b>124 312</b> <b>(40%)</b>	69 312 (22%)	82 530 (27%)	18 108 (6%)	15 460 (5%)	309 722 (100%)
	VRPH / PIB 2001 [%]	40	<b>101</b>	56	67	15	13	252
PERDAS G × C (c/ truncatura limit < V)	AEL [Euro × 10 <sup>6</sup> ]	35 (26%)	17 (13%)	18 (14%)	<b>56</b> <b>(42%)</b>	19 (14%)	24 (18%)	135 (100%)
	AEL / PIB 2001 [%]	0,029	0,014	0,015	<b>0,046</b>	0,016	0,019	0,110
	AELR [‰]	0,72	0,14	0,27	0,68	1,06	1,54	0,44
	AELC [Euro per capita]	13	5	10	16	36	<b>61</b>	14
	AED [#]	4,8 (34%)	0,2 (2%)	0,4 (3%)	<b>5,6</b> <b>(40%)</b>	2,7 (19%)	5,2 (37%)	14,1 (100%)
	AEDR [‰]	0,0018	0,0001	0,0002	0,0016	0,0052	<b>0,0133</b>	0,0014
PERDAS G × C (sem truncatura)	AEL [Euro × 10 <sup>6</sup> ]	51 (20%)	65 (25%)	46 (18%)	<b>89</b> <b>(35%)</b>	28 (11%)	28 (11%)	257 (100%)
	AEL / PIB 2001 [%]	0,042	0,053	0,038	<b>0,073</b>	0,022	0,023	0,209
	AELR [‰]	1,05	0,53	0,67	1,08	1,52	<b>1,81</b>	0,83
	AELC [Euro per capita]	19	18	26	26	52	<b>72</b>	26
	AED [#]	4,8 (34%)	0,2 (2%)	0,4 (3%)	<b>5,6</b> <b>(40%)</b>	2,7 (19%)	5,2 (37%)	14,2 (100%)
	AEDR [‰]	0,0018	0,0001	0,0002	0,0016	0,0052	<b>0,0133</b>	0,0014

Os traços mais salientes revelados na presente síntese de resultados são os seguintes:

1. A região Norte, que agrupa 31% dos concelhos do Continente, é responsável por 40% do valor de reposição do seu parque habitacional, ou seja, por um valor destacado de reposição entre as cinco NUTS II. Em contrapartida, o Algarve contabiliza apenas 5% do valor de reposição do parque habitacional do Continente.
2. É também na região Norte que se observa a maior concentração de elementos humanos em risco agrupando 37% da população residente no Continente. No extremo oposto têm-se as regiões do Alentejo e Algarve onde residem habitualmente apenas 5 e 4% dos indivíduos recenseados em Portugal Continental em 2001.
3. No âmbito da avaliação de perdas económicas o modelo de base estatística truncado para intensidades macrossísmicas inferiores V conduz a estimativas globais para Portugal Continental próximas de metade das obtidas com o modelo não truncado. Estes resultados devem-se, primordialmente, a uma estimativa por excesso das perdas nas regiões de menor perigosidade sísmica, constatando-se que a diferença entre as duas estimativas é tanto mais elevada quanto mais a norte se situa a região analisada.
4. Ordenando as NUTS II por riscos económicos decrescentes, constata-se que o modelo com truncatura preconiza que as maiores perdas absolutas anuais em consequência de sismos deverão ser esperadas na região de Lisboa e Vale do Tejo (LVT). Esta região, que representa 27% do valor de reposição do parque habitacional de Portugal Continental, é responsável por 42% do total das perdas económicas anuais (*AEL*) deste território. O segundo maior valor de perdas económicas absolutas anuais é ocupado pelo Algarve, que agrupa apenas 5% do valor de reposição do parque habitacional de Portugal Continental, mas que graças à sua perigosidade e vulnerabilidade elevadas torna-se responsável por 18% das perdas económicas absolutas anuais do Continente Português. O Algarve é seguido pelas regiões do Alentejo, Centro e Norte que contabilizam entre 14 e 13% das perdas económicas absolutas anuais do Continente.
5. Esta hierarquização é alterada quando se utiliza o modelo sem truncatura. Neste caso o primeiro lugar mantêm-se ocupado pela região de Lisboa e Vale do Tejo, mas passa a ser seguido pela região Norte do País e depois pelas regiões Centro, Algarve e Alentejo. Esta nova ordenação pode ser explicada pelo valor elevado da exposição nas regiões mais a norte no Continente, no entanto, ela não é consentânea com a perigosidade mais reduzida dessas regiões nem com os danos observados na história sísmica do Continente Português. Justifica-se assim a opção pela truncatura para intensidades macrossísmicas inferiores a V do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino. Deste modo, a partir de agora, apenas serão analisados os resultados do modelo truncado.
6. Em termos de perdas humanas não se verificam praticamente diferenças entre a aplicação do modelo de avaliação de danos truncado e não truncado, pois como já tinha sido observado a propósito da figura 7.12 as perdas humanas são dominadas pelas intensidades macrossísmicas mais elevadas.

7. Ordenando agora as NUTS II por riscos humanos decrescentes, constata-se mais uma vez que é na região de Lisboa e Vale do Tejo que se esperam as maiores perdas absolutas anuais em consequência de sismos (40%), sendo seguida de perto pela região do Algarve (37%), estimando-se um valor intermédio para a região do Alentejo (19%) e valores reduzidos para as regiões Centro e Norte (3 e 2%, respectivamente) em que os valores elevados da exposição são contrabalançados pelos valores reduzidos da perigosidade.
8. Assinale-se que o risco sísmico específico cresce sempre do norte para o sul do País, independentemente das perdas analisadas serem económicas ou humanas. Este resultado é consistente com a influência regional da perigosidade e vulnerabilidade sísmicas (ver figura 7.6). Em particular, quando o risco específico é analisado em termos de *AEDR* a região do Algarve destaca-se das restantes, atingindo valores superiores ao dobro das *AEDR* observadas na região que se encontra em segundo lugar neste indicador, o Alentejo.

No quadro 7.7 apresentam-se os seguintes rácios: (i) as perdas anuais na região de Lisboa e Vale do Tejo (LVT) em relação às estimadas para Portugal Continental (PT), (ii) as perdas da Área Metropolitana de Lisboa (AML) em relação às da região de Lisboa e Vale do Tejo e (iii) as perdas do concelho de Lisboa (LX) em relação às obtidas na Área Metropolitana de Lisboa. Os valores assinalados a negrito no quadro 7.7 permitem concluir que a Área Metropolitana de Lisboa é responsável por uma elevada percentagem de perdas económicas anuais dentro da região de Lisboa e Vale do Tejo (62%) e por uma ainda mais elevada percentagem de perdas humanas anuais (85%).

Quadro 7.7 – Comparação dos valores esperados anuais do risco sísmico entre as regiões de LX, AML, LVT e PT.

	<i>AEL</i> (G) [%]	<i>AED</i> (G × C) [%]
LVT / PT	42	40
AML / LVT	<b>62</b>	<b>85</b>
LX / AML	23	37

### 7.5.2. Limite inferior das perdas acumuladas

O risco sísmico de um determinado território pode ser avaliado de forma estatística e directamente a partir da simulação dos efeitos de todos os sismos existentes no seu catálogo sísmico, pressupondo que este é representativo da sismicidade do território e que cobre um período de observação suficientemente extenso para que a distribuição das suas ocorrências seja estacionária. Este procedimento de avaliação do risco sísmico permite obter a distribuição empírica das perdas globais do Continente Português, o que constitui uma alternativa à abordagem da secção 7.3, em que as distribuições das perdas foram traçadas concelho a concelho não se tendo obtido a distribuição do risco global do Continente.

Na tentativa de concretizar esta via de cálculo do risco, seleccionaram-se do catálogo sísmico todos os sismos susceptíveis de causar danos no território continental, ou seja, 806 sismos, com magnitude superior a 4,0, cobrindo um período de observação de 1690 anos, compreendido entre 309 DC e 1999. Para o efeito, actualizou-se o Simulador de Cenários Sísmicos acrescentando-lhe um ciclo exterior que possibilita a execução sucessiva de cenários. Simularam-se os efeitos de 806 cenários sísmicos nas 4 037 freguesias do território Continental, recorrendo às curvas de atenuação de Sousa [1996], ao modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino truncado para intensidades macrossísmicas inferiores a V, ao modelo de perdas humanas de Coburn & Spence e ao modelo de perdas económicas SSN [1998]. Seguidamente, acumularam-se as perdas simuladas nos 806 cenários, e dividiram-se os valores somados pelo intervalo de tempo de 1690 anos, obtendo-se as médias anuais das distribuições empíricas de perdas, económicas e humanas, constantes do quadro 7.8.

No quadro 7.8 verifica-se que as médias anuais das perdas obtidas a partir do catálogo são sistematicamente inferiores às estimativas reunidas no quadro 7.6, utilizando para efeitos comparativos o modelo de danos truncado para intensidades macrossísmicas inferiores a V.

*Quadro 7.8 – Médias anuais das perdas em Portugal Continental simulando o catálogo sísmico.*

Perdas $G \times C$	Total de Portugal Continental
<i>AEL</i> [Euro $\times 10^6$ ]	28
<i>AEL</i> / PIB 2001 [%]	0,023
Área perdida [%]	0,01
<i>AELR</i> [‰]	0,09
<i>AELC</i> [Euro <i>per capita</i> ]	2,8
<i>AED</i> [#]	6,6
<i>AEDR</i> [‰]	0,0007

Tal disparidade deve-se, muito provavelmente, ao não cumprimento da hipótese de estacionariedade do catálogo sísmico. De facto, é sobejamente conhecido que o catálogo sísmico Português não é exaustivo, principalmente no seu período histórico, mas afigurava-se razoável que a maioria dos eventos mais severos, susceptíveis de gerar grandes valores de perdas, estivessem recenseados no catálogo.

Atendendo ao que foi exposto, conclui-se que o risco decorrente da simulação do catálogo encontra-se subavaliado, quer devido à ausência do catálogo de alguns eventos históricos severos, ou moderadamente severos, quer devido à ausência do catálogo de um número elevado de eventos pouco severos, que acumulariam perdas significativas.

Uma possível solução para a ausência de exaustividade do catálogo sísmico, passaria pelo recurso a um catálogo artificial de sismos, como é o exemplo do catálogo gerado por Costa [1989] a partir de um modelo de simulação do tipo Markoviano tridimensional, desenvolvido pelo autor para representar o Processo Estocástico Sísmico da Península Ibérica (PESPI).

### **7.5.3. Cenários de risco sísmico com base na desagregação da perigosidade sísmica**

Nas secções 2.3.3 e 3.2 adiantou-se que a análise de desagregação teria continuidade no presente capítulo em que se aborda o risco, pois os cenários de perigosidade sísmica seriam utilizados para a avaliação de cenários regionais de risco sísmico. Deste modo no capítulo 3 e com base na desagregação probabilística da perigosidade sísmica identificaram-se os cenários dominantes, para todos os 278 concelhos de Portugal Continental e para treze probabilidades anuais de excedência. Os cenários assim obtidos são agora utilizados para avaliar os limites inferiores e superiores dos valores do risco sísmico acumulado em regiões extensas de Portugal Continental.

No entanto, existe uma hipótese de trabalho em que se fundamentam essas avaliações, que foi mencionada na secção 2.3.3 e que agora se formula explicitamente. Esta hipótese decorre da própria metodologia de análise de desagregação e dos resultados e conclusões obtidos no capítulo 3, conforme a seguir se enuncia: (i) os cenários de perigosidade sísmica de cada concelho são condicionados pela excedência de um nível  $I_0$  do movimento do solo, (ii) quando substituídos nas respectivas leis de atenuação reproduzem, em boa aproximação, em todos os concelhos de Portugal Continental esse nível do movimento e (iii) na análise probabilística da perigosidade sísmica o nível  $I_0$  do movimento do solo está associado a uma certa probabilidade de excedência. Consequentemente os cenários de perigosidade sísmica, bem como as perdas por eles originadas em cada concelho, são representativos dessa probabilidade de excedência, ou período de retorno.

Com base neste raciocínio é possível traçar curvas de risco sísmico, por concelho, semelhantes às ilustradas nas figuras 7.1, 7.2 e 7.4 a partir da simulação dos cenários de perigosidade sísmica para diversas probabilidades anuais de excedência e para os 278 concelhos do Continente.

O passo seguinte envolve a utilização dessas curvas para a avaliação do risco sísmico acumulado em regiões extensas de Portugal Continental, de acordo com o procedimento que a seguir se descreve. Para uma dada probabilidade de excedência, avaliam-se os efeitos de todos os cenários de perigosidade sísmica da região. Como cada cenário de perigosidade sísmica corresponde a um único evento bem caracterizado, as perdas por ele geradas podem ser acumuladas para a região em análise, avaliando-se um número de perdas acumuladas igual ao número de concelhos da região em análise. Repete-se o procedimento para todos os períodos de retorno.

Na aplicação agora efectuada, correu-se o programa de simulação de cenários sísmicos para 278 cenários de perigosidade sísmica multiplicados por 13 períodos de retorno, ou seja avaliaram-se 3 614 cenários de risco sísmico em cada uma das 4 037 freguesias de Portugal Continental, cujas perdas foram acumuladas em regiões correspondentes às cinco NUTS II. Mais uma vez simularam-se os efeitos destes cenários recorrendo às curvas de atenuação de

Sousa [1996], ao modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino truncado para intensidades macrossísmicas inferiores a V e ao modelo de perdas humanas de Coburn & Spence.

Nas figuras 7.13 e 7.14 traçaram-se, em função do período de retorno, as curvas médias e os limites inferiores e superiores das curvas do risco sísmico acumulado nas regiões estudadas, medido em termos de perdas económicas e humanas, respectivamente.

A análise estatística dos resultados permitiu obter os valores médios, os coeficientes de variação e os limites inferiores e superiores do risco acumulado em cada região, calculados a partir dos cenários de todos os concelhos de cada NUTS II. Nos quadros 7.9 e 7.10 apresentam-se os limites superiores do risco acumulado para alguns dos períodos de retorno analisados.

Para se ter uma percepção do erro cometido neste procedimento pondere-se a hipótese de se avaliar o risco sísmico apenas na gama dos períodos de retorno elevados, em que a maioria dos cenários de perigosidade sísmica tem a mesma localização (figura 3.12). Pondere-se também a hipótese dos cenários de perigosidade sísmica serem definidos pelos cenários modais resultantes da desagregação 2D em *M-R*. Neste caso, o erro que se comete na avaliação do risco sísmico da região, a partir da acção sísmica preconizada por um dado cenário de perigosidade sísmica, decorre exclusivamente da variação das magnitudes que caracterizam os cenários de perigosidade sísmica dos concelhos dessa região. Essas variações e erros subsequentes serão tanto maiores quanto mais vasta for a região em estudo, condicionando a escolha da extensão da região a analisar.

Nos quadros 7.9 e 7.10 reúnem-se também os cenários de perigosidade sísmica que conduziram aos cenários de risco sísmico majorantes traçados nas figuras 7.13 e 7.14. Adianta-se também que as discontinuidades das curvas traçadas nas figuras 7.13 e 7.14 resultam da alteração da localização dos cenários de perigosidade sísmica, em particular da passagem de cenários próximos para cenários afastados, quando se aumenta o período de retorno.

Constata-se que, no caso do risco sísmico ser medido em termos de perdas económicas, há uma tendência para as perdas apresentarem intervalos de variação relativamente estreitos nos períodos de retorno elevados e nas regiões de Lisboa e Vale do Tejo, Alentejo e Algarve. Tal significa que os cenários de perigosidade sísmica não variam muito, nestes períodos de retorno, dentro das regiões analisadas e que, em conformidade, poder-se-á ter maior confiança nas estimativas indicadas pelas perdas médias.

O mesmo se observa, no caso do risco sísmico ser medido em termos de perdas humanas, também nas regiões de Lisboa e Vale do Tejo, Alentejo e Algarve e para os períodos de retorno elevados. Note-se que no Alentejo a curva minorante não foi traçada para períodos de retorno inferiores a 475 anos, pois entre todos os cenários de perigosidade sísmica dos concelhos desta região existem alguns que estimam um número de mortos nulo. Neste caso concreto, são os cenários com epicentro na região de Benavente que dominam a perigosidade sísmica de alguns dos concelhos da região do Alentejo.

Relativamente às curvas majorantes sobressai que, a partir dos 95 anos de período de retorno, inclusive, a região de Lisboa e Vale do Tejo apresenta, sistematicamente, entre todas as NUTS II, os valores de perdas económicas mais elevados, o que é concordante com o que já tinha sido observado no quadro 7.6 em termos dos valores esperados anuais do risco sísmico absoluto. O mesmo ocorre com as perdas económicas médias a partir dos 200 anos de período de retorno.

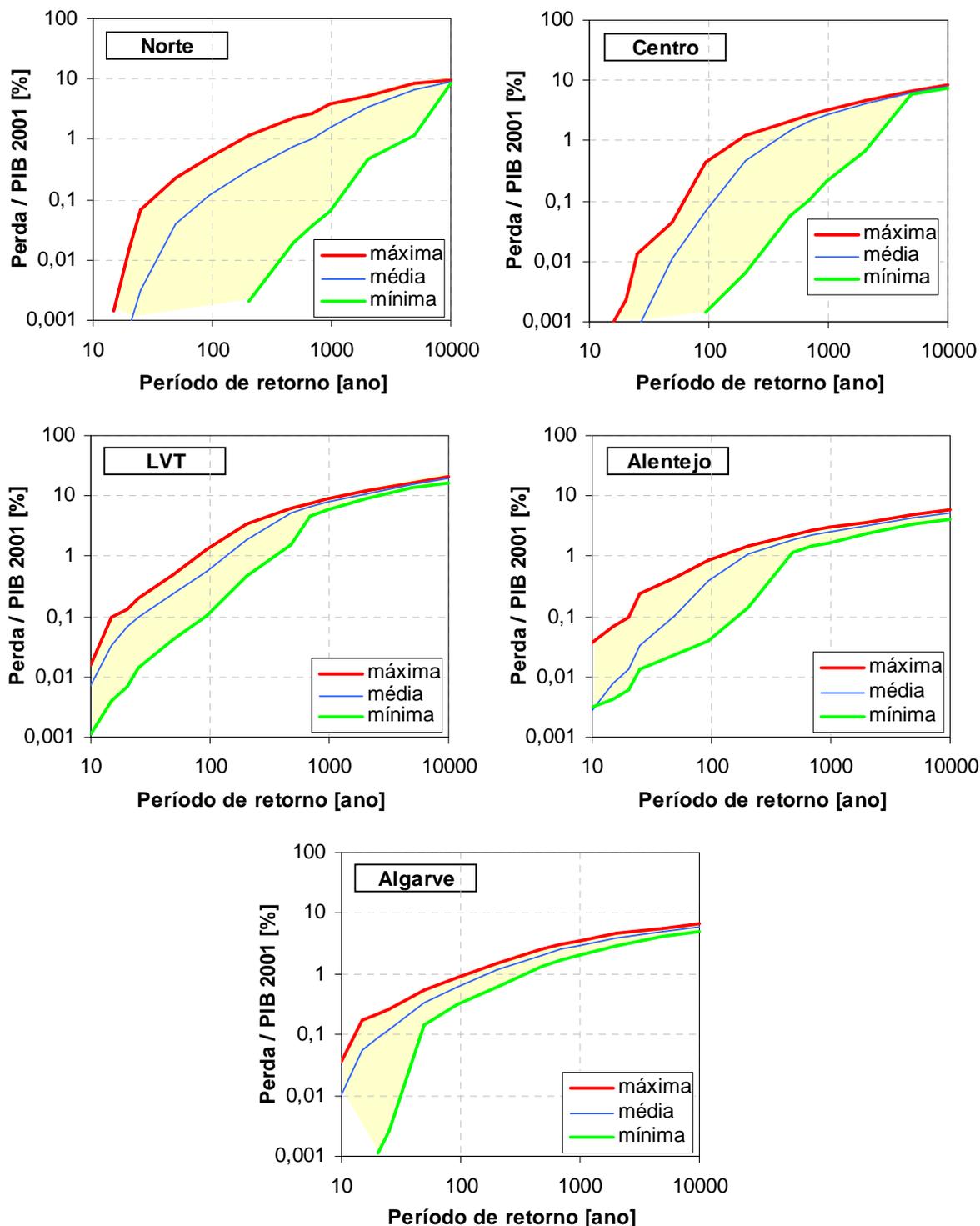


Figura 7.13 – Curvas de risco sísmico minorantes, majorantes e médias para as perdas económicas das NUTS II.

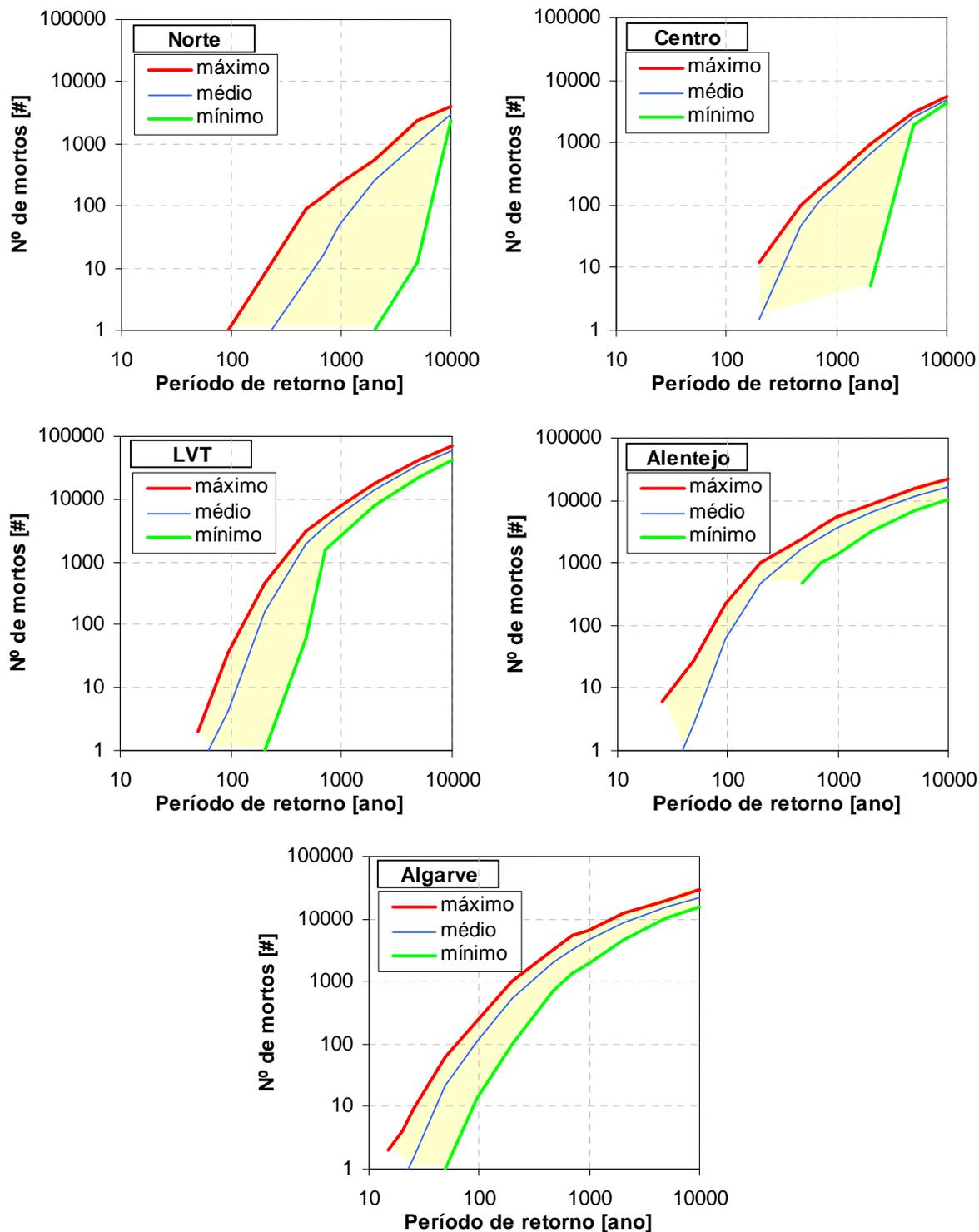


Figura 7.14 – Curvas de risco sísmico minorantes, majorantes e médias para as perdas humanas das NUTS II.

Quadro 7.9 – Cenários de perigosidade sísmica majorantes e perdas económicas para regiões de Portugal Continental.

Período retorno	NUTS II	x [km]	y [km]	M	ε	Perda máxima / PIB 2001 [%]	Perda média / PIB 2001 [%]	Coef. Variação [%]	
10	Norte	285,2	471,3	3,6	1,00	0,0	0,0	-	
	Centro	156,5	382,1	3,7	1,25				
	LVT	146,5	213,6	3,6	2,50				
	Alentejo	225,8	183,9	3,6	1,75				
	Algarve	67,3	-4,4	4,9	0,75				
15	Norte	176,3	481,2	3,7	1,75	0,001	0,000	529,1	
	Centro	245,6	421,7	3,8		0,001	0,000	733,1	
	LVT	146,5	213,6	3,7	2,75	0,098	0,033	68,3	
	Alentejo	215,9	144,2	3,6	1,75	0,069	0,008	201,7	
	Algarve	67,3	-4,4	5,6	0,75	0,177	0,055	99,0	
25	Norte	176,3	481,2	4,1	1,75	0,068	0,003	303,7	
	Centro	245,6	421,7	4,2		0,014	0,001	264,7	
	LVT	146,5	213,6	3,8	3,00	0,206	0,096	48,2	
	Alentejo	146,5	213,6	3,6	2,75	0,248	0,032	162,4	
	Algarve	67,3	-4,4	5,8	0,75	0,260	0,120	62,1	
50	Norte	176,3	481,2	4,5	1,75	0,222	0,039	150,9	
	Centro	245,6	421,7	4,5		0,045	0,011	87,4	
	LVT	146,5	213,6	4,3	3,00	0,505	0,244	44,3	
	Alentejo	265,4	273,1	3,9	1,75	0,430	0,101	115,6	
	Algarve	67,3	-4,4	6,2	0,75	0,529	0,329	38,6	
95	Norte	176,3	481,2	4,9	1,75	0,490	0,116	118,3	
	Centro	67,3	-4,4	6,9		0,75	0,449	0,067	110,6
	LVT	67,3	-4,4	6,7	0,75	1,293	0,566	51,6	
	Alentejo	235,7	223,5	4,7		1,75	0,833	0,395	70,7
	Algarve	67,3	-4,4	6,5		0,75	0,859	0,612	30,9
200	Norte	176,3	481,2	5,4	1,75	1,174	0,303	95,6	
	Centro	67,3	-4,4	7,4		0,75	1,235	0,468	83,7
	LVT	67,3	-4,4	7,2	0,75	3,357	1,925	51,1	
	Alentejo	146,5	213,6	5		2,75	1,488	1,059	29,1
	Algarve	67,3	-4,4	6,9		0,75	1,530	1,152	25,9
475	Norte	176,3	481,2	5,8	1,75	2,251	0,746	76,4	
	Centro	67,3	-4,4	7,7		0,75	2,162	1,500	44,2
	LVT	67,3	-4,4	7,9	0,75	6,186	5,179	15,3	
	Alentejo	67,3	-4,4	7		2,179	1,819	15,8	
	Algarve	67,3	-4,4	7,3		2,518	2,024	19,9	
975	Norte	67,3	-4,4	8,1	0,75	3,759	1,535	71,9	
	Centro	67,3	-4,4	8,1	0,50	3,228	2,635	28,3	
	LVT	67,3	-4,4	7,8	0,75	8,864	7,970	11,4	
	Alentejo	67,3	-4,4	7,3		3,057	2,520	12,5	
	Algarve	67,3	-4,4	7,6		3,476	2,891	16,9	
2000	Norte	67,3	-4,4	8,3	0,75	5,353	3,442	46,0	
	Centro	67,3	-4,4	8,5	0,25	4,686	4,141	11,3	
	LVT	67,3	-4,4	8,2	0,75	12,161	11,040	7,7	
	Alentejo	67,3	-4,4	7,6		3,743	3,299	10,8	
	Algarve	67,3	-4,4	7,9		4,597	3,838	13,3	
5000	Norte	67,3	-4,4	8,4	1,00	8,340	6,623	22,1	
	Centro	67,3	-4,4	8,4	0,75	6,677	6,288	6,8	
	LVT	67,3	-4,4	8,3		16,874	15,685	7,7	
	Alentejo	67,3	-4,4	7,9	4,909	4,319	8,4		
	Algarve	67,3	-4,4	8,5	0,25	5,672	5,027	9,8	
10000	Norte	67,3	-4,4	8,5	1,00	9,740	8,861	7,7	
	Centro	67,3	-4,4	8,4		8,427	7,995	4,7	
	LVT	67,3	-4,4	8,5	0,75	20,940	19,437	7,3	
	Alentejo	67,3	-4,4	8,1		5,759	5,110	7,2	
	Algarve	67,3	-4,4	8,4		6,685	5,921	8,1	

Quadro 7.10 – Cenários de perigosidade sísmica majorantes e perdas humanas para regiões de Portugal Continental.

Período retorno	NUTS II	x [km]	y [km]	M	$\epsilon$	Majorante do nº mortos [#]	Média nº mortos [#]	Coef. variação
10	Norte	285,2	471,3	3,6	1,00	0	0	-
	Centro	156,5	382,1	3,7	1,25			
	LVT	146,5	213,6	3,7	2,25			
	Alentejo	225,8	183,9	3,6	1,75			
	Algarve	67,3	-4,4	4,9	0,75			
15	Norte	285,2	471,3	3,6	1,25	0	0	-
	Centro	156,5	382,1	3,7	1,50			
	LVT	146,5	213,6	3,7	2,50			
	Alentejo	225,8	183,9	3,6	2,00			
	Algarve	67,3	-4,4	5,6	0,75	2	0	231
25	Norte	285,2	471,3	3,6	1,50	0	0	-
	Centro	156,5	382,1	3,7	1,75			
	LVT	146,5	213,6	3,5	3,00	6	0	538
	Alentejo	67,3	-4,4	6,1	0,75			
	Algarve			5,8				
50	Norte	285,2	471,3	3,8	1,75	0	0	-
	Centro	156,5	382,1	3,5	2,25			
	LVT	146,5	213,6	4,3	3,00	2	0	123
	Alentejo	67,3	-4,4	6,4	0,75	28	3	234
	Algarve			6,2		61	21	96
95	Norte	176,3	481,2	4,8	1,75	1	0	367
	Centro	156,5	382,1	3,9	2,25	0	0	-
	LVT	67,3	-4,4	6,7	0,75	36	4	151
	Alentejo			6,8		226	60	124
	Algarve			6,5		239	113	75
Norte	176,3			481,2		5,4	1,75	8
200	Centro	67,3	-4,4	7,4	0,75	12	2	163
	LVT			7,2		461	164	106
	Alentejo			7,2		984	478	56
	Algarve			6,9		992	548	57
	Norte			176,3		481,2	5,8	1,75
475	Centro	67,3	-4,4	7,7	0,75	99	45	67
	LVT			7,9	0,25	3042	1971	35
	Alentejo			7,5	0,75	2470	1663	35
	Algarve			7,3	3242	2059	44	
	Norte			67,3	-4,4	8,1	0,75	231
Centro	8,1	0,50	302			200	39	
LVT	7,8	0,75	7668			5984	27	
Alentejo	7,8		5441			3571	27	
Algarve	7,6		6694			4591	36	
2000	Norte	67,3	-4,4	8,3	0,75	548	258	67
	Centro			8,5	0,25	953	673	21
	LVT			8,2	0,50	17503	13647	19
	Alentejo			8,0	0,75	8500	6525	23
	Algarve			7,9		12578	8575	29
5000	Norte	67,3	-4,4	8,4	1,00	2378	1065	38
	Centro			8,4	0,75	2999	2510	21
	LVT			8,3		41605	34949	19
	Alentejo			8,3		15419	11740	18
	Algarve			8,5	0,25	20169	15569	21
10000	Norte	67,3	-4,4	8,5	1,00	3987	2977	26
	Centro			8,4		5426	4803	11
	LVT			8,5	0,75	72013	60180	18
	Alentejo			8,5		21770	16934	15
	Algarve			8,4		29395	22457	18

## 7.6. Comparação com outras avaliações de risco sísmico

### 7.6.1. Risco de perdas económicas

Nesta secção efectua-se a análise comparativa de alguns valores de perdas económicas anuais publicados na literatura internacional com os resultados do presente estudo, que se encontram reunidos no quadro 7.6.

A publicação FEMA 336 [FEMA, 2001] reúne estimativas do risco sísmico anual para todas as regiões dos EUA, recorrendo a dois indicadores de risco, *AEL* e *AELR*, estimados para vários níveis de resolução geográfica: municípios, áreas metropolitanas, estados e País.

Para auxiliar as comparações a efectuar expõem-se, lado a lado, na figura 7.15 os mapas de perigosidade sísmica, em aceleração de pico do movimento (*PGA*), para os EUA e Portugal e para os períodos de retorno de 1000 e de 975 anos, respectivamente. O mapa elaborado para Portugal resultou da conversão do mapa de perigosidade em intensidades macrossísmicas (figura 3.5) em aceleração de pico do movimento, com recurso ao modelo de Trifunac & Brady [1975]. Observa-se que os valores da perigosidade de Portugal Continental se situam na mesma gama de valores da perigosidade dos estados localizados mais a norte na costa oeste dos EUA, nomeadamente os estados de Washington (WA) e Oregon (OR).

As abreviaturas que identificam os 51 estados dos EUA são especificadas nos mapas das figuras 7.16 a 7.18. Estas figuras ilustram as distribuições dos vários indicadores de risco sísmico, *AEL*, *AELR* e *AELC*, nesses 51 estados dos EUA, tendo sido elaboradas a partir dos valores publicados em FEMA 336 [FEMA, 2001].

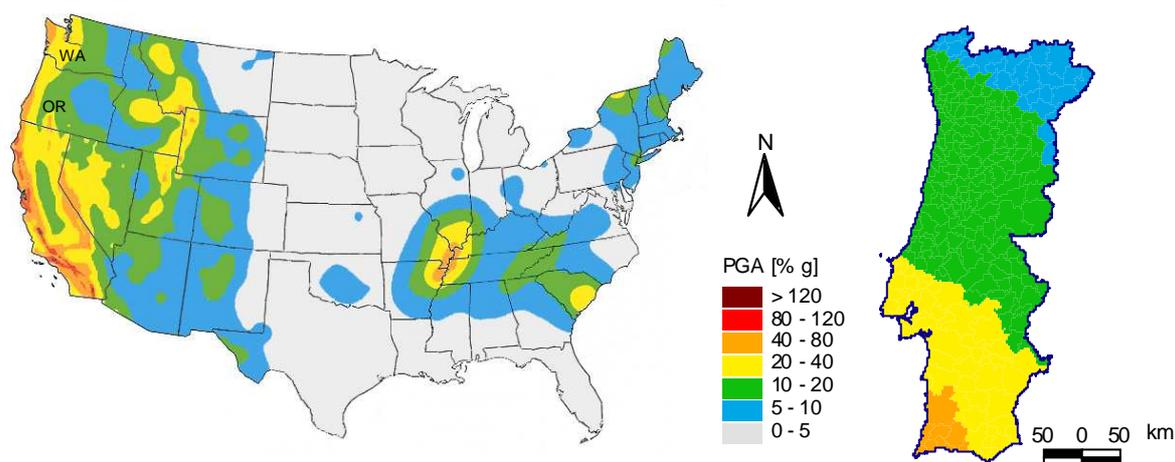


Figura 7.15 – Mapas de perigosidade sísmica em aceleração para os Estados Unidos da América [FEMA, 2001] e para Portugal Continental; 1000 e 975 anos de período de retorno.

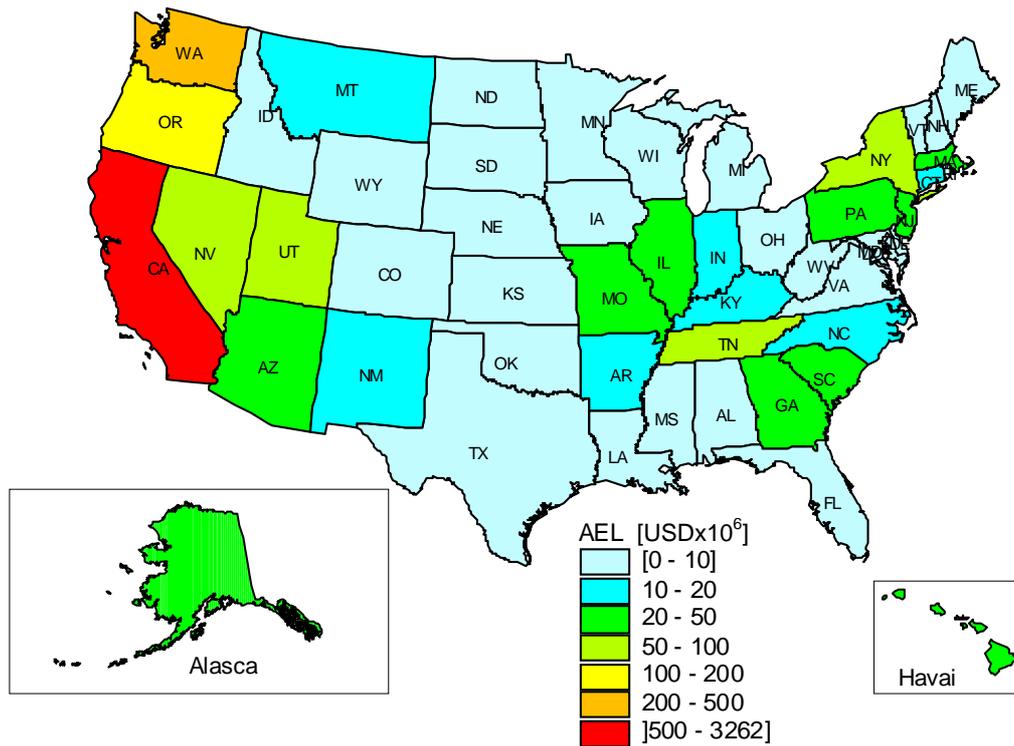


Figura 7.16 – AEL [USD × 10<sup>6</sup>] avaliadas para unidades geográficas de nível estadual dos EUA; adaptado de FEMA [2001].

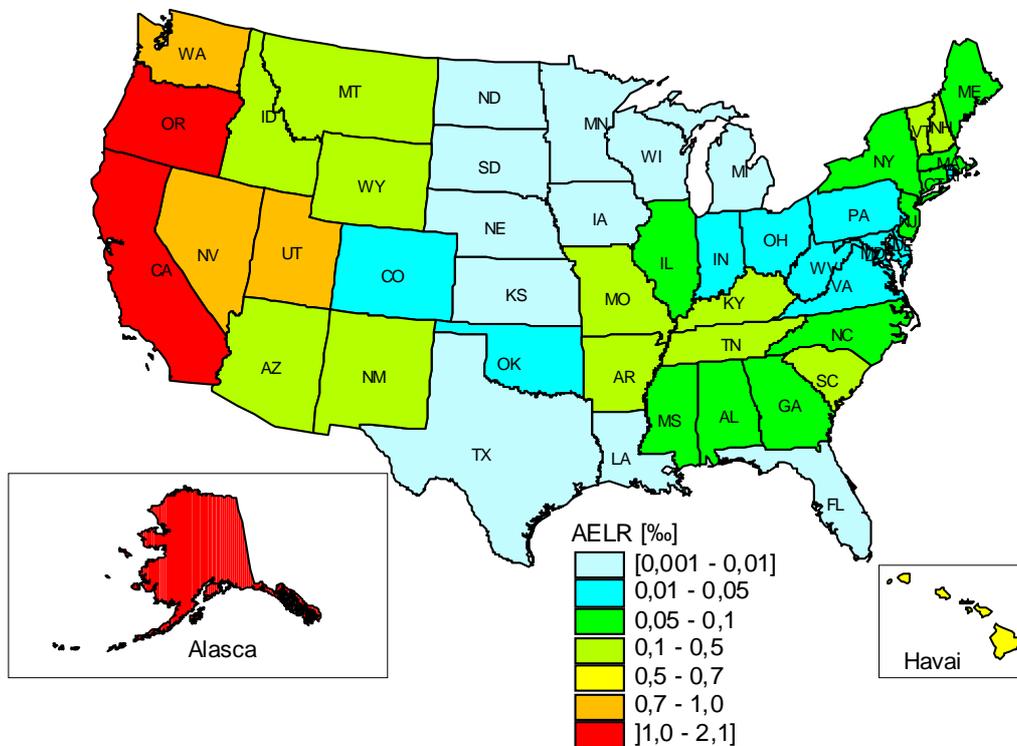


Figura 7.17 – AELR [%] avaliadas para unidades geográficas de nível estadual dos EUA; adaptado de FEMA [2001].

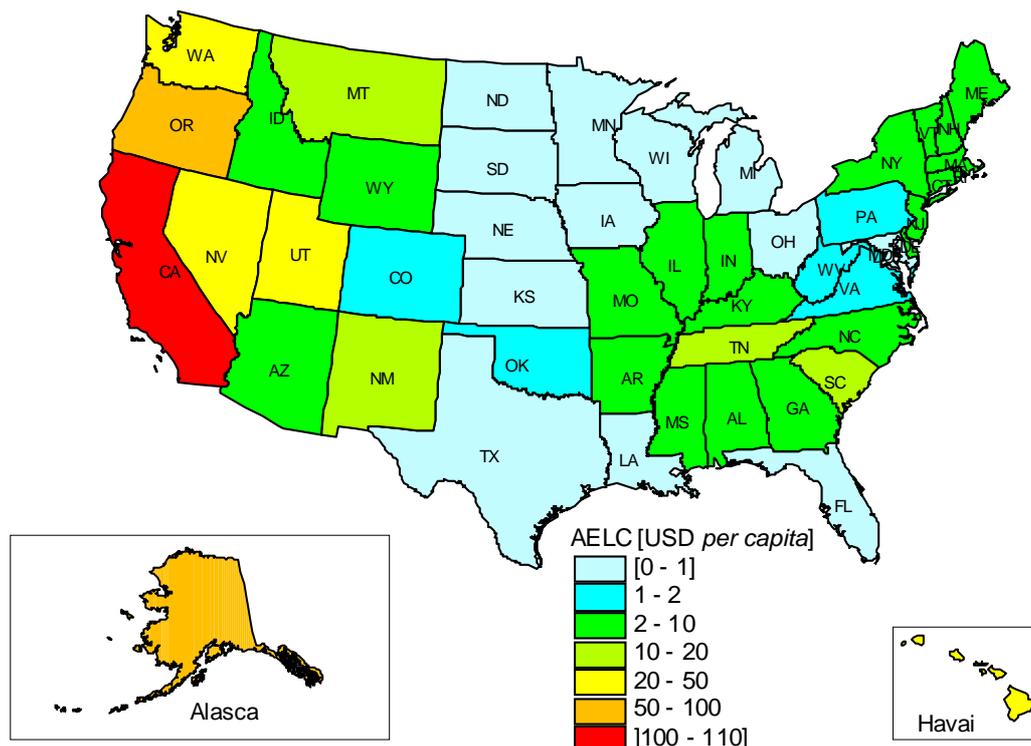


Figura 7.18 – AELC [USD per capita] avaliadas para unidades geográficas de nível estadual dos EUA; adaptado de FEMA [2001].

As perdas avaliadas em FEMA 336 não são directamente comparáveis com as da presente pesquisa, pois as primeiras são muito mais abrangentes, sendo classificadas em duas categorias: (i) as perdas de capital e (ii) as motivadas pela paragem de produção decorrentes de um sismo. As perdas de capital englobam os custos de reposição do parque habitacional dos EUA, recenseado em 1990, o custo de reparação de edifícios não habitacionais, as perdas dos recheios dos edifícios e as perdas de materiais armazenados. As segundas incluem os custos de interrupção de actividades económicas, os custos de reinstalação dessas actividades, as perdas de salários e as perdas de arrendamentos.

A avaliação do risco sísmico efectuada na publicação FEMA 336 estima, globalmente para os EUA, um valor anual de perdas de capital de  $3,5 \times 10^9$  USD e de perdas de rendimento de  $0,9 \times 10^9$  USD. O estudo também conclui que o estado da Califórnia é responsável por 84% do total das perdas anuais dos EUA ( $3,3 \times 10^9$  USD / ano), seguido pelo estado de Washington, localizado no noroeste dos EUA, com  $AEL = 228 \times 10^6$  USD / ano (ver figura 7.16).

Os valores esperados anuais das perdas económicas para Portugal Continental ( $AEL = 135 \times 10^6$  Euro / ano) seriam incluídos na classe correspondente ao referido estado de Oregon ( $AEL = 168 \times 10^6$  USD / ano), podendo concluir-se que o risco sísmico absoluto em Portugal Continental deverá ser superior ao deste estado, pois as únicas perdas contabilizadas neste estudo decorrem dos danos nos edifícios do parque habitacional.

Mais fiáveis serão as comparações com indicadores de risco específico, apesar de deverem ser encaradas com as devidas reservas, devido às diferenças entre as categorias de

perdas avaliadas nos dois estudos. Portugal com um valor de *AELR* estimado em 0,44 ‰, seria classificado, de acordo com a figura 7.17, na categoria mediana da grelha de sete classes deste indicador de risco. Nesta classe intermédia foram classificados desde o estado de New Hampshire (NH), com *AELR* = 0,11 ‰, até ao estado de Montana (MT) com *AELR* = 0,37 ‰.

Sobre o risco sísmico *per capita*, o Continente Português, com *AELC* avaliada em 14 Euro *per capita*, seria mais uma vez classificado na categoria intermédia deste indicador de risco, em que foram classificados os estados de Montana (MT), New Mexico (NM), Tennessee (TN) e South Carolina (SC), com *AELC* avaliadas entre 10 e 20 USD *per capita*. Relembre-se mais uma vez as diferenças entre as categorias de perdas avaliadas nos dois estudos.

### 7.6.2. Risco de perdas humanas

A informação relativa ao risco sísmico que constava do quadro 7.1 é de novo reunida no quadro 7.11 para efeitos comparativos com os resultados do presente capítulo. Deste modo, neste quadro listam-se os valores esperados do risco sísmico específico, medido em termos de vítimas mortais normalizadas pela população média no período analisado, em Portugal Continental e noutras regiões do globo.

*Quadro 7.11 – Probabilidade anual de um indivíduo morrer em consequência de sismos.*

Morte em consequência de sismos	Probabilidade anual
Irão <sup>1</sup>	1 : 23 000
Itália	1 : 68 000
Portugal Continental – mortes ocorridas entre 1755 e 2000	1 : 105 000
Sismo no Arquipélago dos Açores (século XX)	1 : 252 000
Portugal Continental – avaliação de risco $G \times C$	1 : 694 000
Portugal Continental – catálogo sísmico $G \times C$	1 : 1 483 000
Califórnia <sup>1</sup>	1 : 2 000 000
Portugal Continental – mortes ocorridas no século XX	1 : 13 400 000

<sup>1</sup> Coburn & Spence [1994] (ver quadro 7.1)

O valor do risco em Itália, indicado na segunda linha do quadro, fundamenta-se num valor esperado anual de 850 mortos em consequência de sismos [Sabetta, 2000] e numa população de cerca de 58 000 000 indivíduos em 2001.

As estimativas assinaladas a branco sobre fundo cinzento constituem alguns dos valores esperados anuais decorrentes da avaliação probabilística de risco sísmico agora efectuada e da simulação de todos os sismos do catálogo. Analisando estes resultados constata-se que o risco específico de morte (1 : 694 000), em consequência de sismos, em Portugal Continental tem valores médios anuais cerca de 3 vezes superiores ao da Califórnia, sendo cerca de 10 vezes menor que o mesmo risco anual em Itália e atingindo valores 30 vezes inferiores aos de um risco semelhante no Irão.

Adverta-se, por fim, que a avaliação do risco de morte a partir de um intervalo de observação de sismos confinado ao século XX é consideravelmente inferior às avaliações obtidas com a informação relativa a períodos de tempo mais vastos, ou com as metodologias probabilísticas. Em concreto, o risco específico de morte aumenta perto de 130 vezes quando se compara o risco decorrente de um intervalo de observação limitado ao século XX com o risco decorrente de um intervalo de observação mais vasto e que inclua eventos extraordinariamente severos como o sismo de 1755. Por outro lado, o risco específico de morte anual obtido por métodos probabilísticos é cerca de 20 vezes superior ao valor médio obtido com as observações do século XX.

O valor reduzido do risco de morte no século XX em Portugal Continental poderá explicar a baixa percepção do risco destes fenómenos naturais pela população em geral.

## **7.7. Conclusões**

Neste capítulo cumpriu-se o principal objectivo da presente pesquisa que consistiu na avaliação do risco sísmico de Portugal Continental, na situação actual do seu parque habitacional. Esta avaliação constituiu o culminar de todo o trabalho desenvolvido nos capítulos precedentes, nomeadamente da formulação teórica do tema do risco sísmico, da avaliação probabilística da perigosidade sísmica e sua desagregação, da inventariação dos elementos em risco, da classificação e caracterização da sua vulnerabilidade sísmica, da selecção e calibração de modelos de danos e do desenvolvimento de ferramentas automáticas, integradas num Sistema de Informação Geográfica, para a simulação de cenários sísmicos.

### ***Limitações do estudo***

Nunca é demais sublinhar que a análise efectuada conduziu a uma estimativa por defeito do risco sísmico no território do Continente. Efectivamente, apenas foram contabilizadas as perdas directas, económicas e humanas, decorrentes dos danos em edifícios do parque habitacional de 2001.

Assim, por um lado, não foram considerados, de forma exaustiva, todos os sistemas construídos que se encontram sujeitos ao risco sísmico em Portugal Continental, e por outro, não foram considerados todos os tipos possíveis de perdas directas, nem as decorrentes de efeitos colaterais, nem as perdas indirectas, etc.

Por exemplo, Di Pasquale *et al.*, [1999] avançam que no sismo Umbria-Marche de 26 de Setembro de 1997, de magnitude 6,0, que destruiu ou danificou 80 000 habitações no centro de Itália, a estimativa oficial das perdas económicas para edifícios civis situava-se em cerca de 70 a 80% das perdas totais, sendo a diferença devida a necessidades de reparação das estruturas públicas, monumentos e infra-estruturas. Os mesmos autores referem ainda que para sismos menos severos, e numa região com elevada densidade de infra-estruturas, o diferencial pode ser bem superior.

Além disso, as perdas económicas podem ser muito mais extensas do que as resultantes de impactos directos nos edifícios. As perdas dos recheios e materiais armazenados nos edifícios, as perdas indirectas e os efeitos colaterais induzidos pelos sismos também não foram contemplados nesta análise. Note-se que estes valores são muito difíceis de quantificar, devido à dificuldade na obtenção de dados, como o comprova a grande variabilidade das estimativas empíricas avançadas por diferentes autores.

Por exemplo, Tiedemann estima que as perdas nos recheios nos edifícios podem atingir valores superiores a 10% do valor total dos respectivos danos médios, enquanto McGuire [2004] menciona que uma aproximação muito grosseira para as perdas de recheio dos edifícios corresponderá a cerca de metade dos seus danos estruturais.

Sobre as perdas das componentes estruturais e não estruturais dos edifícios, Kircher *et al.*, [1996] afirmam que, tipicamente, o sistema estrutural representa cerca de 25% do valor do edifício.

Quanto aos efeitos colaterais induzidos por sismos, como a liquefacção, tsunamis e incêndios, além contribuírem para um acréscimo das perdas económicas, também contribuem para um aumento das vítimas mortais. De facto, as estatísticas sobre os efeitos dos sismos no século XX mostram que cerca de 25% das vítimas mortais não tiveram origem no colapso de estruturas, sendo antes uma consequência de causas não estruturais ou de efeitos colaterais induzidos pelos sismos [Coburn & Spence, 2002] (ver figura 2.11). Como foi referido no capítulo 2 as perdas humanas resultantes de efeitos colaterais são raras, porém, quando ocorrem, dominam as perdas totais, sendo ainda mais difíceis de prever do que as resultantes dos perigos primários. Veja-se o exemplo do tsunami que afectou o sudeste Asiático em 2004.

Existe, porém, um padrão comum nas avaliações das perdas que não decorrem de danos físicos directos nos sistemas construídos, que é a ausência de estatísticas sobre o tema e a consequente dificuldade em desenvolver modelos de avaliação dessas perdas. Assim, as estimativas produzidas pelos poucos modelos publicados deverão ser encaradas como preliminares, até que funções de perda mais precisas sejam desenvolvidas.

### ***Avaliação do risco sísmico para os concelhos de Portugal Continental***

A avaliação do risco para a unidade geográfica do concelho baseou-se nas distribuições probabilísticas das perdas económicas e humanas presentes na secção 7.3.

As distribuições probabilísticas de perdas fornecem a probabilidade de excedência de um nível de perdas especificado, para um período de tempo de exposição. Este tipo de abordagem é de importância fundamental em programas de mitigação de risco sísmico, em que se estabelece, à partida, um nível de risco aceitável e se estudam as alternativas mais eficazes para o atingir.

Fixando-se dois valores para a probabilidade de excedência das perdas, 10 e 5% em 50 anos, procedeu-se à análise geográfica das perdas por concelho (figuras 7.3 e 7.5). Estes mapas evidenciam que o risco sísmico não se distribui uniformemente no território do

Continente, reconhecendo-se, no que toca aos indicadores de risco económicos, que o risco específico tem maior incidência nos distritos de Faro, Beja e no concelho de Lisboa e que o risco absoluto atinge valores mais elevados na Área Metropolitana de Lisboa, na zona central do Algarve e no sul do Litoral Alentejano. A distribuição geográfica do risco absoluto de perdas humanas é semelhante à do risco absoluto de perdas económicas, ressalvando-se que nas regiões Norte, Centro e nas zonas a norte das regiões de Lisboa e Vale do Tejo e Alentejo o risco de morte apresentado na figura 7.5 apresenta um padrão uniforme e valores reduzidos.

A análise probabilística das perdas complementa a avaliação do risco com base em perdas esperadas anuais (secção 7.4). As perdas esperadas anuais possuem o inconveniente de serem, por vezes, associadas incorrectamente às perdas derivadas de um único evento, transmitindo a percepção de um nível de risco inferior ao real FEMA [2001].

A desagregação das perdas esperadas anuais em função da intensidade macrossísmica permitiu concluir que as perdas económicas são dominadas por níveis de perigosidade mais baixos que as perdas humanas.

Tendo presente o objectivo de compreender a influência sobre o risco sísmico das variáveis perigosidade, vulnerabilidade e exposição, construíram-se, na secção 7.4 descritores, ou índices médios dessas variáveis e obtiveram-se, por regressão linear múltipla, modelos de previsão do risco sísmico, em termos económicos e humanos, dados os valores concretos das variáveis explicativas envolvidas. Verificou-se que as variáveis perigosidade e exposição têm maior capacidade de explicar o risco do que a vulnerabilidade sísmica.

O modelo obtido para as perdas económicas anuais permite realizar avaliações expeditas, se bem que por defeito, do risco sísmico e poderá ser utilizado na optimização de estratégias que visem a sua mitigação. Apenas para dar um exemplo, imagine-se que o parque habitacional do concelho de Lisboa era globalmente reforçado de forma a apresentar um desempenho sísmico concordante com o preconizado na norma sismo-resistente actualmente em vigor. Nesse pressuposto, o risco económico seria reduzido em 88% comparativamente com o seu valor actual, ou seja, passaria de um valor anual de cerca de  $8,1 \times 10^6$  Euro para  $1,0 \times 10^6$  Euro.

Os mapas dos valores esperados anuais do risco sísmico absoluto (figura 7.7 em baixo) evidenciaram que a Área Metropolitana de Lisboa, o sul do Alentejo Litoral e o Algarve são os responsáveis pelos maiores valores de risco. Por outro lado, os traços mais salientes nas cartas de risco específico (figura 7.7 em cima) são os seus valores elevados no Alentejo e Algarve, destacando-se dentro destas regiões o sul do Alentejo Litoral, o Baixo Alentejo e o Barlavento Algarvio.

Da análise efectuada aos 18 concelhos do Continente que incluem as sedes de distrito de Portugal Continental (secção 7.4.4) ressaltam os concelhos de Beja, Faro, Lisboa, Santarém e Setúbal, uma vez que em todos os cinco indicadores de risco constam dos seis primeiros lugares das listas respectivas. Em particular, o concelho de Lisboa destaca-se por possuir valores de risco absoluto muito superiores aos dos restantes concelhos.

### ***Avaliação do risco sísmico acumulado***

Sobre a acumulação das perdas esperadas anuais (secção 7.5.1), conclui-se que:

1. O valor esperado anual das perdas económicas, em consequência de sismos, no parque habitacional de Portugal Continental foi estimado em 0,11% do PIB de 2001. As perdas anuais relativas atingem valores próximos de 0,04% da área habitacional dos edifícios recenseados em 2001. Estes valores foram obtidos com o modelo de Giovinazzi & Lagomarsino truncado abaixo do grau V de intensidade macrossísmica, justificando-se esta truncatura pelos valores do risco pouco realistas obtidos nas regiões de perigosidade mais baixa do Continente.
2. O valor esperado anual das vítimas mortais em Portugal Continental foi estimado em cerca de 14 morto / ano. Este valor preconiza um risco específico de morte cerca de 20 vezes superior ao observado em Portugal Continental no século XX, que se cifrou em 59 mortes, enquanto que o risco observado neste território nos últimos 250 anos é cerca de 7 vezes superior ao agora estimado.
3. Comparando as perdas sísmicas entre regiões de Portugal Continental constata-se que Lisboa e Vale do Tejo é a região onde se esperam os maiores valores anuais das perdas absolutas, económicas e humanas. A Área Metropolitana de Lisboa tem por sua vez um peso significativo dentro da referida região. Esta constatação decorre, principalmente, dos valores elevados da exposição na região de Lisboa e Vale do Tejo, aliados a valores moderadamente elevados da sua perigosidade e da vulnerabilidade sísmica dos seus elementos.
4. Os valores esperados anuais do risco específico, ou seja, de *AELR*, *AELC* e *AEDR* são consideravelmente superiores na região do Algarve do que nas restantes NUTS II.
5. No Continente Português o risco sísmico específico cresce sempre do norte para o sul, independentemente das perdas analisadas serem económicas ou humanas.

Na tentativa de se obter uma distribuição empírica das perdas globais do Continente Português, simularam-se, na secção 7.5.2, os efeitos de todos os sismos existentes no catálogo. Esta via de modelação não se revelou conclusiva, pois o catálogo sísmico não é exaustivo.

Na secção 7.5.3 expôs-se uma metodologia inovadora para determinar as médias, desvios padrão e limiares inferiores e superiores das curvas de risco acumulado de uma dada região, baseada nos cenários de ocorrência modais obtidos pela análise de desagregação da perigosidade sísmica do capítulo 3.

### ***Comparação com outras avaliações de risco***

Comparando o risco avaliado para Portugal Continental com valores obtidos para outros países (secção 7.6), apresentam-se as seguintes conclusões válidas, obviamente, no domínio dos pressupostos e limitações deste trabalho:

1. O risco sísmico específico estimado numa perspectiva económica para Portugal Continental situa-se entre os estados de Montana e de New Hampshire, também dos EUA.
2. As perdas humanas relativas anuais em Portugal Continental reflectem valores cerca de 3 vezes superiores aos da Califórnia, sendo cerca de 10 vezes inferiores às perdas humanas relativas anuais de Itália e atingindo valores cerca de 30 vezes inferiores aos do Irão.

### ***Síntese das conclusões***

Sintetizando as conclusões obtidas refira-se que a perigosidade elevada da região do Barlavento Algarvio e a coexistência de dois factores adversos, perigosidade e vulnerabilidade elevadas, nas regiões do Baixo Alentejo e sul do Litoral Alentejano, faz com que estas sejam as regiões de maior risco específico do Continente. No que toca ao risco absoluto, a estes dois factores há que adicionar a exposição elevada, em particular na Área Metropolitana de Lisboa.

Como conclusão final refira-se que as avaliações agora efectuadas, caracterizando o risco sísmico da situação actual ou de referência, estão longe de esgotar as potencialidades das ferramentas desenvolvidas.

### ***Trabalho futuro***

Com efeito, a exploração destes instrumentos fomentará um vasto leque de futuras pesquisas, nomeadamente a análise dos efeitos de estratégias de intervenção sobre o parque habitacional actual e a identificação da combinação óptima, numa perspectiva de custo-benefício, do tipo de construção e áreas geográficas a serem intervencionadas. A eficácia dos planos de mitigação de risco sísmico poderá ser analisada por recurso a técnicas de optimização, viabilizadas pelos modelos expeditos de risco sísmico da secção 7.4.3. Análises de maior pormenor com recurso ao Simulador são condicionadas pela reclassificação da vulnerabilidade do parque pós-intervenção.

Na continuidade deste trabalho, e antecedendo a delineação de qualquer estratégia de mitigação do risco, seria de inegável interesse analisar a evolução do risco sísmico ocorrida na década de 90 do século XX em Portugal Continental, como consequência da substituição natural do parque habitacional. Para concretizar este objectivo bastará classificar a vulnerabilidade do parque habitacional apurado nos Censos 91 de acordo com as classes de vulnerabilidade constantes do capítulo 5.

Outras metodologias de avaliação de risco sísmico merecem investigação futura. Refira-se, nomeadamente, os métodos de simulação de possíveis histórias sísmicas futuras, como os de Monte Carlo, que se revelam promissores na sua aplicação para a avaliação de perdas acumuladas em regiões em que os elementos em risco se encontram distribuídos espacialmente.

## 8. CONCLUSÕES

### 8.1. Introdução

No final deste estudo recapitula-se o trabalho desenvolvido e sintetizam-se as principais conclusões retiradas dos resultados alcançados.

A revisão do trabalho desenvolvido incide sobre os principais resultados obtidos, encontrando-se organizada, na secção 8.2, segundo os capítulos da dissertação. Por seu lado, a síntese das conclusões é organizada, na secção 8.3, de acordo com as várias etapas do estudo, ou seja, a perigosidade, o inventário, a vulnerabilidade e o risco sísmico. Acrescentam-se ainda outras conclusões de índole mais geral. Para encerrar a dissertação, perspectiva-se a investigação futura (secção 8.4), visando dar continuidade a necessidades de desenvolvimento identificadas ao longo do trabalho e a desafios que daí decorrem. Refere-se ainda a necessidade de conduzir um processo global de gestão do risco sísmico em Portugal, para o qual o presente estudo de avaliação de risco fornece uma primeira contribuição.

Aproveita-se esta introdução para realçar duas características que marcam o presente trabalho. A primeira refere-se à sua natureza integradora, pois sendo um tema de investigação de índole multidisciplinar obrigou à articulação de valências complementares de vários ramos do conhecimento, nomeadamente da engenharia sísmica, das ciências da terra, das probabilidades e estatística, de ferramentas de cálculo automático e de informação geográfica. A segunda refere-se às dificuldades inerentes aos estudos de perigosidade e de risco sísmico, nomeadamente a insuficiência das observações, a natureza aleatória das várias etapas do processo, mas também o carácter subjectivo de algumas hipóteses e interpretações adoptadas.

Salvaguarda-se contudo, que este é o padrão geral dos trabalhos de avaliação de perdas em consequência de sismos, que integram a informação de todas as valências referidas recorrendo a procedimentos de análise comuns, ou seja, os da análise de probabilidades. Por outro lado, é essa própria linguagem comum de trabalho que, dada a sua complexidade, levanta algumas dificuldades à disseminação dos resultados de estudos de risco sísmico.

### 8.2. Trabalho desenvolvido

#### *Sistematização dos modelos adoptados*

Iniciou-se o capítulo 2, *Metodologias para a avaliação do risco sísmico*, com o levantamento das publicações de autores nacionais sobre o tema do risco sísmico, encarado em sentido lato, ou incidindo sobre as suas etapas parcelares. Seguiu-se a sistematização dos principais conceitos no domínio geral do risco de fenómenos naturais e do risco sísmico em particular.

Nas restantes secções, reuniu-se a recolha bibliográfica efectuada, apresentando-se a formulação teórica do tema do risco sísmico e de todas as suas etapas parcelares, ou seja, a avaliação probabilística da perigosidade sísmica e a análise de desagregação, a caracterização da vulnerabilidade sísmica, a avaliação dos danos e perdas no edificado e a avaliação de perdas humanas. Nas últimas secções apresentaram-se os temas da gestão do risco, da avaliação probabilística do risco sísmico, da acumulação das perdas e da avaliação das incertezas.

### ***Perigosidade sísmica***

No capítulo 3, *Perigosidade sísmica e análise de desagregação*, procedeu-se à reavaliação da perigosidade sísmica de Portugal Continental, especificando-se os modelos utilizados e os parâmetros respectivos. Determinaram-se as curvas de perigosidade sísmica de cada sede de concelho do Continente, às quais se ajustaram funções de distribuição do tipo beta. Foi graças a esta descrição compacta e analítica da perigosidade sísmica de cada concelho que a posterior aplicação dos modelos de risco sísmico se tornou um processo expedito. A perigosidade sísmica das 278 sedes de concelho de Portugal Continental foi generalizada para o resto do território através de mapas de perigosidade sísmica, traçados para períodos de retorno seleccionados.

Exemplificou-se a análise de desagregação a várias dimensões para os concelhos de Faro, Porto e Lisboa. Efectuou-se a análise de desagregação a quatro dimensões, englobando as variáveis magnitude, coordenadas *X* e *Y* de localização do cenário e desvio, para os 278 concelhos de Portugal Continental. Esta análise permitiu, por um lado, compreender a influência das variáveis envolvidas sobre a perigosidade e, por outro, identificar cenários de ocorrência dominantes para cada um dos 278 concelhos do Continente. Estes cenários de ocorrência específicos são condicionados pelos níveis de perigosidade sísmica seleccionados para análise, associados aos períodos de retorno escolhidos.

Desenvolveu-se uma metodologia para aplicação dos cenários assim identificados à avaliação do risco sísmico acumulado em regiões extensas de Portugal Continental, que constitui um compromisso entre a opção pela definição da acção sísmica de forma determinística e a opção pela caracterização da acção com base nos resultados da análise probabilística da perigosidade sísmica.

### ***Inventário dos elementos em risco***

O *Inventário dos elementos em risco* de Portugal Continental, que consta do capítulo 4, foi realizado a partir de informação apurada nos Censos 2001. Para o efeito, seleccionaram-se dos Questionários destes Censos as unidades estatísticas e as variáveis pertinentes para apurar os quantitativos dos elementos em risco que, no presente caso, se restringiram aos edifícios residenciais, alojamentos e indivíduos neles residentes.

Procedeu-se à análise estatística desses quantitativos, segundo os factores de vulnerabilidade identificados, de forma a identificar as tipologias construtivas mais representativas e frequentes de Portugal Continental, visando a posterior caracterização da sua vulnerabilidade à acção sísmica. Traçou-se e analisou-se a respectiva distribuição geográfica ao nível das freguesias do território de Portugal Continental.

### ***Vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco***

O tema da *Vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco* é abordado no capítulo 5. Tendo em consideração o panorama construtivo de Portugal Continental e o inventário atrás referido, enquadraram-se os principais tipos de construção deste território nas classificações subjacentes aos métodos de avaliação de danos adoptados na análise do risco sísmico.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica e danos foi dividida em dois tipos de abordagens, a mecanicista e a estatística. Em ambas as abordagens, a fragilidade sísmica das tipologias construtivas é caracterizada por distribuições de probabilidade de dano, condicionadas por um dado nível de perigosidade sísmica. Procedeu-se à análise crítica das metodologias de avaliação de danos do edificado.

O capítulo 5 termina com algumas considerações sobre os modelos de avaliação de perdas humanas e com a apresentação das opções tomadas para a sua implementação.

### ***Simulação de cenários de risco sísmico***

Uma parte importante deste trabalho foi devotada ao desenvolvimento e actualização do programa automático de *Simulação de cenários sísmicos* (capítulo 6), bem como à sua aferição.

Investigaram-se os quantitativos de danos e perdas ocorridos em alguns sismos históricos que afectaram Portugal Continental a fim de os comparar com as estimativas produzidas pelo Simulador, após se ter adequado a vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco à época em análise.

Simularam-se as perdas resultantes de cenários sísmicos, com acção semelhante à de sismos que no passado, afectaram Portugal Continental, mas actuando sobre os elementos em risco inventariados em 2001.

### ***Avaliação do risco sísmico***

A *Avaliação do risco sísmico* do capítulo 7 constituiu o culminar do trabalho desenvolvido em todas as etapas precedentes. Esta avaliação foi feita em termos de perdas económicas e humanas, no território do Continente Português, para a situação do seu parque habitacional apurada em 2001.

Neste capítulo utilizaram-se três abordagens para avaliar o risco sísmico: (i) a análise probabilística do risco sísmico e a avaliação das perdas esperadas, (ii) a simulação de perdas a partir de todos os eventos registados no catálogo sísmico, e (iii) a simulação de perdas com base na desagregação da perigosidade sísmica. A primeira abordagem foi aplicada a todos os concelhos de Portugal Continental e à avaliação do risco esperado anual acumulado para regiões (NUTS II) e para o território Continental, enquanto que a segunda foi aplicada exclusivamente ao Continente Português e a terceira na avaliação regional (NUTS II) do risco sísmico acumulado.

Realizaram-se as comparações possíveis com outras avaliações de risco recolhidas na literatura internacional e encerrou-se o capítulo 7 com a síntese das principais conclusões sobre o risco sísmico a que o território de Portugal Continental se encontra exposto.

### **8.3. Conclusões principais**

#### ***Perigosidade sísmica***

As conclusões mais relevantes a retirar da etapa da avaliação da perigosidade sísmica decorrem dos resultados da análise de desagregação.

Em termos gerais, conclui-se que a análise de desagregação auxilia a compreensão da influência da informação de base, das etapas metodológicas e das opções tomadas sobre os resultados da perigosidade sísmica e, por inerência, a interpretação desses resultados bem como a comunicação e exposição dos mesmos.

Os resultados da aplicação da análise de desagregação a Portugal Continental permitiram concluir que a perigosidade sísmica da maioria dos seus concelhos é dominada por cenários localizados a menos de 100 km a WSW do Cabo de S. Vicente e com magnitude tanto maior quanto mais a norte se situar o concelho analisado. Em particular, esta é a localização do único cenário dominante de todos os concelhos do sul de Portugal e de muitos cenários dominantes de outros concelhos, principalmente para os períodos de retorno elevados. Em contrapartida, quanto mais baixo for o período de retorno maior o número de cenários modais localizados na proximidade dos concelhos analisados. Ainda no caso dos períodos de retorno baixos, a zona de sismogénese que engloba o vale inferior do Tejo revelou ser de alguma importância para a perigosidade de alguns concelhos dos distritos de Lisboa, Leiria, Santarém, Évora e Portalegre.

Os níveis de perigosidade sísmica de cada concelho podem ser substituídos, numa muito boa aproximação, pelo movimento previsto pelas leis de atenuação aplicadas aos cenários de ocorrência identificados pela análise de desagregação para cada período de retorno, aqui designados de cenários de perigosidade sísmica. Foi este resultado que permitiu delinear a referida metodologia, de base probabilística, para a avaliação do risco sísmico em regiões extensas de Portugal Continental.

### ***Inventário dos elementos em risco***

As principais conclusões a retirar sobre o inventário dos elementos em risco, decorrem da caracterização do parque habitacional e seus habitantes recenseados em 2001. Para se visualizar de forma sintética essas características considerem-se os seguintes números:

1. Os quantitativos apurados, em 2001, relativos aos edifícios, alojamentos e indivíduos foram de  $2\,998 \times 10^3$ ,  $4\,840 \times 10^3$  e  $9\,789 \times 10^3$ , respectivamente.
2. Os edifícios recenseados foram construídos maioritariamente (70%) após a introdução da primeira regulamentação Portuguesa sísmo-resistente [RSCCS, 1958], constatando-se que 28% foram construídos após a entrada em vigor da regulamentação actual [RSA, 1983]. Os edifícios possuem maioritariamente 1 e 2 pavimentos (85%), sobressaindo a estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, com placa (41%), seguida da estrutura de Betão armado (30%). Ressalve-se que a data de introdução dos regulamentos não garante a aplicação das normas mencionadas.
3. Quando, em lugar dos edifícios, os elementos em risco são os alojamentos e os indivíduos residentes, então as existências em edifícios construídos após a introdução da primeira regulamentação Portuguesa sísmo-resistente crescem para 76 e 80%, respectivamente, e após a entrada em vigor da regulamentação actual crescem para 33% e 34%, respectivamente. As percentagens de alojamentos e indivíduos, em edifícios de 1 e de 2 pavimentos, decrescem para cerca de 58%, relativamente ao número de edifícios com esse número de pavimentos. A maioria dos alojamentos e indivíduos residem em edifícios com estrutura de Betão armado (48% e 49%, respectivamente) ou em edifícios com estrutura do tipo Paredes de alvenaria argamassada, com placa (32% e 35%, respectivamente), invertendo assim a ordem do primeiro e segundo lugares relativamente aos tipos de estrutura que sobressaem nos edifícios.
4. As freguesias com maior densidade de edifícios de habitação, alojamentos e ocupantes situam-se nas principais cidades do País, bem como em toda a faixa costeira a norte do Cabo Espichel e do Algarve, destacando-se as zonas da Grande Lisboa e Grande Porto.

Relativamente à capacidade do inventário do parque habitacional traduzir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios, conclui-se que a utilização das novas modalidades da variável tipo de estrutura, combinadas com o conhecimento da época de construção dos edifícios, do seu número de pavimentos e dos novos factores de vulnerabilidade, como o estado de conservação dos edifícios, conferem aos apuramentos efectuados nos Censos 2001 a virtude de fornecerem, pela primeira vez, um panorama quantitativo global do qual se podem inferir as características da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do País.

### ***Vulnerabilidade sísmica, modelos de danos no edificado e de perdas humanas***

O inventário dos edifícios do parque habitacional de Portugal Continental e o levantamento bibliográfico sobre o panorama construtivo deste território, permitiram concluir

que o emprego do betão armado alterou definitivamente os processos construtivos do País, não só pela sua utilização como sistema estrutural, mas também pelas suas implicações nos sistemas construtivos de alvenaria. Actualmente, verifica-se que os edifícios com Paredes de alvenaria argamassada, sem placa e com Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta têm um peso diminuto, nos tipos de estrutura do parque habitacional de Portugal Continental.

Analisando as abordagens estatísticas e mecanicista de avaliação de vulnerabilidade sísmica e danos verifica-se que as primeiras têm as vantagens de terem sido validadas pelos danos ocorridos em sismos na Europa e de serem muito menos dispendiosas, em termos de tempo de processamento, quando comparadas com a alternativa mecanicista. Em particular, o método baseado na escala EMS-98, tem a vantagem de ser de fácil aplicação a qualquer região da Europa e de possibilitar uma discriminação fina da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional, que decorre dos próprios factores de vulnerabilidade identificados nos Censos 2001. Estes factores podem penalizar ou despenalizar a vulnerabilidade sísmica das tipologias construtivas, embora se reconheça que ainda necessitam de alguma calibração.

Em contrapartida, o método mecanicista possui maior detalhe na modelação do comportamento estrutural dos edifícios, envolvendo no entanto um grande número de parâmetros de difícil calibração, especialmente para estruturas sem projecto de engenharia.

Importa sublinhar que, para os cenários ensaiados, os resultados das simulações efectuadas com o modelo mecanicista estiveram muito próximos dos resultados das simulações realizadas com a maioria dos modelos estatísticos.

Sobre os modelos de avaliação de perdas humanas pode concluir-se que as estimativas de mortos e feridos se encontram afectadas de incerteza elevada, que decorre da existência de uma grande heterogeneidade no número de vítimas, mesmo para acções sísmicas semelhantes, e da pouca fiabilidade das estatísticas de perdas humanas após um sismo.

Nesta etapa do estudo, as principais conclusões a retirar são que (i) a falta de precisão das estatísticas existentes sobre os sismos que afectaram Portugal Continental impede que elas comprovem a veracidade dos resultados do Simulador de Cenários Sísmicos e que, (ii) em contrapartida, os resultados do Simulador têm a virtude de não serem negados pela história dos efeitos dos sismos em Portugal Continental e no mundo.

### ***Risco sísmico***

Antes de se exporem as principais conclusões sobre o risco sísmico a que o território de Portugal Continental se encontra exposto, sublinhem-se, mais uma vez, as duas principais limitações do trabalho, ligadas ao seu domínio de aplicação. A primeira reside no facto do risco sísmico do território Continental, quando analisado numa perspectiva económica, ter sido estimado por defeito, uma vez que apenas foram consideradas as perdas decorrentes dos danos físicos directos no parque habitacional de 2001. A segunda está ligada à restrição das avaliações de perdas humanas a cenários em que a população se encontra maioritariamente

nas suas habitações. De facto, embora o inventário dos elementos humanos em risco tenha sido exaustivo, a modelação da mobilidade espacial da população não foi efectuada, pois está para além dos objectivos deste estudo.

Outra hipótese de trabalho simplificadora está relacionada com o pressuposto, assumido ao longo da modelação dos danos em edifícios do parque habitacional de Portugal Continental, de que se verificou uma aplicação sistemática das regulamentações sismo-resistentes, quer ao nível do projecto estrutural quer na execução das obras dos edifícios.

Desta forma, no domínio dos pressupostos e limitações deste trabalho salientam-se as seguintes conclusões:

1. O número reduzido de mortes ocorridas em Portugal Continental no século XX poderá explicar a baixa percepção do risco destes fenómenos naturais pela população em geral. Alerta-se, no entanto, para o facto de se ter concluído neste estudo que o valor esperado anual de vítimas mortais em Portugal Continental é cerca de 20 vezes superior ao que foi observado neste território no século XX.
2. Analisou-se o risco esperado anual de 18 concelhos do Continente que incluem as sedes de distrito de Portugal Continental, com o objectivo de os ordenar em termos de risco sísmico e também de compreender a influência das variáveis envolvidas, perigosidade, vulnerabilidade e exposição, sobre o respectivo risco. Da análise efectuada concluiu-se que os concelhos de Beja, Faro, Lisboa, Santarém e Setúbal, são aqueles que, entre os 18 analisados, se situam de forma sistemática nas posições cimeiras da hierarquia do risco sísmico. Entre estes, o concelho de Lisboa destaca-se por possuir valores de risco absoluto muito superiores aos dos restantes concelhos.
3. Nestes 18 concelhos também se efectuou uma análise de desagregação das perdas esperadas anuais em função da intensidade macrossísmica, tendo-se concluído que os sismos que dominam as perdas económicas são de menor intensidade do que aqueles que têm maior relevância para as perdas humanas.
4. A aplicação ao concelho de Lisboa dos modelos de previsão de risco sísmico, em termos económicos, no cenário hipotético de que todos os edifícios do seu parque habitacional teriam um desempenho consentâneo com o regulamento actualmente em vigor, permitiu concluir que o risco económico esperado anual seria reduzido em 88% relativamente ao valor de referência da situação actual. Este é um exemplo de uma possível exploração dos modelos desenvolvidos para a compreensão da influência sobre o risco sísmico das variáveis perigosidade, vulnerabilidade e exposição.
5. A análise da distribuição geográfica das perdas relativas contraria, de alguma forma, a ideia corrente de que o risco em Portugal Continental se situa exclusivamente na região de Lisboa e no Algarve. Assim, constatou-se que a perigosidade elevada da região do Barlavento Algarvio e a coexistência de dois factores adversos, perigosidade e

- vulnerabilidade elevadas, nas regiões do Baixo Alentejo e sul do Litoral Alentejano, faz com que estas sejam as regiões de maior risco específico do Continente.
6. O risco sísmico específico cresce sempre do norte para o sul do território Continental, independentemente das perdas analisadas serem económicas ou humanas, salientando-se a região do Algarve com valores destacados de *AELR*, *AELC* e *AEDR*, relativamente às restantes NUTS II.
  7. A região de Lisboa e Vale do Tejo é, entre as NUT II, aquela em que se esperam os maiores valores anuais das perdas absolutas, económicas e humanas. Em particular, a Área Metropolitana de Lisboa é responsável por uma percentagem elevada de perdas anuais económicas e humanas dentro da região de Lisboa e Vale do Tejo em consequência dos seus valores de exposição serem muito elevados e dos valores da sua perigosidade e vulnerabilidade sísmicas serem moderadamente elevados.
  8. O risco anual específico de perdas económicas esperadas para Portugal Continental, situa-se entre os riscos dos estados de Montana e de New Hampshire, dos EUA. Na grelha de sete classes de perdas relativas em que se classifica o risco deste País, os estados mencionados situam-se numa posição mediana. As perdas humanas anuais esperadas em Portugal Continental reflectem valores cerca de 3 vezes superiores aos da Califórnia, sendo 10 a 30 vezes inferiores às perdas anuais de Itália e atingindo valores 30 a 90 vezes inferiores às perdas anuais do Irão.

### ***Conclusões de índole geral***

Apreciando globalmente o trabalho desenvolvido conclui-se que este cumpriu o principal objectivo proposto, que foi o de avaliar o risco sísmico de Portugal Continental. Evidentemente, os resultados e conclusões obtidos encontram-se condicionados pelos pressupostos assumidos e pelo domínio de aplicação do trabalho.

Não cabe ao analista de risco exprimir opiniões subjectivas sobre a severidade dos níveis de risco sísmico estimados para a região, mormente sobre o seu risco absoluto, pois sabe-se, à partida, que os valores apresentados poderão sofrer leituras variadas, condicionadas por entendimentos diversos sobre o nível de risco sísmico aceitável a que, num dado contexto, Portugal deverá ser sujeito.

No entanto, pode afirmar-se que as regiões de Portugal a que se deve devotar maior atenção em termos de necessidades de mitigação do risco serão a grande Lisboa, o Algarve, o Alentejo Litoral e o Baixo Alentejo.

As principais críticas a apontar aos resultados obtidos incidem, por um lado, sobre o domínio estreito de avaliação de perdas, que seria desejável alargar para além das sofridas pelo parque habitacional e seus ocupantes e, por outro, sobre a necessidade de levar a cabo algumas tarefas que confirmam maior confiança aos resultados alcançados, nomeadamente a análise da sua sensibilidade a alguns dos parâmetros intervenientes nas estimativas. Com

efeito, foi estudada a sensibilidade dos resultados, para cenários específicos, a variações nos modelos de danos no edificado e nos modelos de perdas humanas, mas o mesmo não foi feito para os parâmetros do modelo de perigosidade e de perdas económicas. Neste último caso, a análise de sensibilidade revela-se ainda mais necessária, pois constatou-se que os modelos de perdas económicas conduzem a valores de perdas relativamente elevados para sismos pouco intensos.

Afigura-se, no entanto, fundamental ter sido construída uma metodologia para a avaliação de perdas em consequência de sismos, capaz de fornecer aos seus utilizadores potenciais o instrumento em falta para despoletar a implementação prática de um processo de gestão do risco sísmico aplicado ao território do Continente Português.

Para o desenvolvimento dessa metodologia muito contribuiu o Simulador de Cenários Sísmicos ao (i) integrar diversas competências inter-disciplinares, (ii) englobar desde modelos estatísticos simples a um modelo mecanicista mais sofisticado e, (iii) possuir uma estrutura modular que lhe permite ser um instrumento computacional bastante flexível no que toca a actualizações de modelos e dados.

Como conclusão final refira-se que as avaliações agora efectuadas, caracterizando o risco sísmico da situação actual ou de referência, estão longe de esgotar as potencialidades das ferramentas desenvolvidas. A exploração destes instrumentos fomentará um vasto leque de futuras pesquisas, algumas das quais se mencionarão na secção seguinte.

## **8.4. Trabalho futuro**

### *Perigosidade sísmica*

O maior desafio de desenvolvimento que actualmente se coloca aos estudos de perigosidade sísmica em Portugal Continental decorre da necessidade de se obterem leis de atenuação espectrais compatíveis com sismos afastados de grande magnitude.

A verificação de que o cenário de ocorrência que domina a perigosidade sísmica da maioria dos concelhos de Portugal Continental se localizou na zona de sismogénese situada a sudoeste do Cabo de S. Vicente, fundamenta a relevância da investigação sobre a localização da fonte do sismo de 1755, sobre a localização das fontes de outros sismos históricos severos e sobre o desenvolvimento das leis de atenuação referidas.

Entre outras pistas levantadas pela análise de desagregação, que se pretendem concretizar no futuro, tem-se a revisão das magnitudes máximas das zonas de geração e o próprio traçado dessas zonas, por forma a ser possível contemplar propostas recentes sobre os modelos de rotura do sismo de 1755, que certamente terão implicações relevantes nas estimativas da perigosidade.

Verificou-se também que os resultados obtidos pela análise de desagregação são muito dependentes da distribuição geográfica da sismicidade, pelo que se sugere a realização de um estudo de sensibilidade sobre os catálogos utilizados.

A constatação de que os cenários de perigosidade sísmica que resultaram da análise de desagregação, quando substituídos nas respectivas leis de atenuação, são capazes de refazer o mapa de perigosidade associada ao respectivo período de retorno, permite alargar a aplicação destes cenários a outros domínios.

Para o efeito, propõe-se o desenvolvimento de uma página interactiva na *Internet* para a simulação da ameaça sísmica em locais e períodos de retorno seleccionados. Ao aceder a esta página o utilizador poderia escolher um concelho do Continente, recebendo em troca os resultados da análise de desagregação para esse concelho, acessíveis sob a forma de gráficos e ficheiros de texto, compatíveis com o nível de perigosidade regulamentar de um período de retorno também escolhido, podendo ainda obter os sismogramas sintéticos associados.

### ***Inventário dos elementos em risco***

No que toca ao inventário dos elementos em risco, seria obviamente desejável alargar o universo de elementos considerados na análise do risco, visando colmatar algumas das limitações do presente estudo.

Enunciam-se aqui alguns elementos em risco para os quais seria de muito interesse avaliar as perdas directas ao nível nacional: as redes de infra-estruturas, o parque construído não habitacional (comercial, industrial, etc.), os elementos vitais para a gestão da emergência como os hospitais, etc., e também outros elementos críticos como escolas. Não existindo levantamentos estatísticos dos elementos mencionados, terá que se recorrer a outro tipo de informação, nomeadamente a ficheiros administrativos e a imagens de satélite.

### ***Vulnerabilidade sísmica e os modelos de danos***

Ao nível dos modelos de danos propõe-se a concretização de uma tarefa realizável num prazo relativamente curto, pois já se encontra parcialmente adiantada. Esta tarefa tem por objectivo calibrar os métodos mecanicistas com base na informação providenciada pelos métodos estatísticos, ou seja, os parâmetros que definem os modelos de capacidade e fragilidade dos métodos mecanicistas poderão ser ajustados minimizando o erro entre as curvas de fragilidade de ambos os métodos.

Uma vez calibrado o modelo mecanicista, ele deverá ser a escolha preferencial relativamente aos modelos estatísticos, uma vez que os constrangimentos associados ao tempo de processamento terão naturalmente tendência para serem superados. Efectivamente, os modelos mecanicistas para além de admitirem uma acção sísmica espectral, estão bem mais próximos do comportamento físico dos edifícios do que os modelos empíricos ou estatísticos. Estudos analíticos e experimentais de análise sísmica de edifícios poderão incidir sobre a

inclusão explícita de alguns factores de vulnerabilidade, tais como os novos factores apurados nos Censos 2001, nos modelos de capacidade e fragilidade sísmica dos edifícios. Estes modelos poderão também ser modificados de forma a reflectirem estratégias alternativas de reforço das estruturas, a serem analisadas em processos de mitigação do risco sísmico.

### ***Risco sísmico***

No que concerne ao Simulador de Cenários Sísmicos identificam-se as seguintes necessidades de desenvolvimento:

1. Actualizar o Simulador para versões mais recentes de SIG, por exemplo, o ArcGIS, o que obriga a uma recodificação das rotinas de *Avenue*.
2. Incluir procedimentos adicionais no Simulador, como por exemplo (i) a caracterização da acção sísmica no local, sob a forma espectral, considerando um modelo de propagação da rotura em falha finita e de propagação no meio, que aliás já está a ser actualmente implementado por Carvalho & Campos Costa [2004], (ii) a inclusão dos estados de dano relativos às componentes não estruturais dos edifícios para a metodologia mecanicista, (iii) a introdução de um modelo para a avaliação das necessidades de alojamentos temporários e realojamentos em consequência de um sismo, ou ainda (iv) o aperfeiçoamento e calibração do actual modelo de perdas económicas e o desenvolvimento de modelos mais rigorosos do que os actualmente implementados.
3. Disponibilizar na *Internet* versões específicas do Simulador, com âmbito de aplicação municipal, que contemplem actualizações com informação local relativas às características do terreno e ao inventário dos elementos em risco.

Em relação à continuação do trabalho de avaliação do risco sísmico efectuado seria de inegável interesse:

1. Conduzir um estudo de sensibilidade para averiguar a forma como parâmetros e modelos afectam os resultados da análise. A construção de uma árvore lógica permite uma caracterização formal da incerteza na análise, incluindo explicitamente modelos, parâmetros e interpretações alternativas, ponderados pela respectiva probabilidade (subjectiva) de se encontrarem correctos [Chen & Scawthorn, 2003]. O trabalho deverá incidir principalmente sobre variações paramétricas no modelo de perigosidade sísmica, no modelo de danos mecanicista, e no modelo de perdas económicas. Alterações à classificação da vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco também deverão ser contempladas. Os modelos estatísticos de danos, para os quais já existem ferramentas informáticas desenvolvidas, também poderão contribuir para construir ramos alternativos da árvore lógica. Neste caso, as decisões subjectivas sobre os factores de ponderação a atribuir aos diferentes ramos da árvore, poder-se-ão apoiar no trabalho de aferição do Simulador.

2. Estimar a distribuição de probabilidade das perdas agregadas para Portugal Continental, tarefa para a qual se sugerem várias abordagens, embora não se perspetive à partida o grau de dificuldade das mesmas: (i) considerar o efeito da correlação espacial do movimento sísmico e das perdas, (ii) gerar um catálogo artificial de sismos, ou (iii) aplicar métodos numéricos de simulação de Monte Carlo.

Sobre as acções a desenvolver no domínio geral do risco sísmico em Portugal entende-se ser prioritário realizar um trabalho semelhante ao actual, mas aplicado ao arquipélago dos Açores. Felizmente, algumas etapas do processo já se encontram adiantadas, tais como as da avaliação da perigosidade sísmica [Carvalho *et al.*, 2001a e b e Oliveira *et al.*, 1990] e a do inventário dos elementos em risco.

Sugerem-se ainda algumas pistas para a exploração mais aprofundada das ferramentas desenvolvidas:

1. Analisar a evolução do risco sísmico ocorrida na década de 90 do século XX em Portugal Continental, comparando o risco sísmico avaliado a partir do parque habitacional apurado nos Censos 2001 com o obtido a partir do parque apurado nos Censos 91. Com esta tarefa pretende-se investigar se a substituição natural do parque habitacional, envolvendo demolições e a construção de novos edifícios, é suficiente, por si só, para conduzir a uma mitigação apreciável do risco.
2. Avaliar os efeitos de estratégias alternativas de mitigação do risco sísmico, tais como intervenções sobre a vulnerabilidade do parque habitacional em regiões específicas, como já foi atrás referido.

Porém, os maiores desafios que se colocam actualmente são (i) o de enquadrar a metodologia de avaliação de risco sísmico desenvolvida num projecto eficaz de gestão do risco aplicado a Portugal Continental e (ii) o de assegurar a divulgação dos resultados alcançados.

No final deste estudo, reconhece-se que talvez não seja possível dar uma resposta cabal ao problema de avaliação do risco sísmico, pois estudos desta natureza estão em permanente evolução, exigindo sempre a pesquisa de mais e melhores dados, bem como de modelos mais rigorosos, aguardando-se, em paralelo, o surgimento de novas fontes de informação, resultantes da ocorrência inevitável de novos sismos.

## REFERÊNCIAS

- Abe, K., 1979.  
**Size of great earthquakes of 1837 – 1974 inferred from tsunami data.** *J. Geophys. Res.*, **84**: 1561-1568.
- Aguiar, J., Oliveira, C.S., Cabrita, A.R. & Duarte, V., 1992.  
**Análise do parque habitacional de Lisboa. Levantamento da zona Ribeirinha – sector Ocidental. Doc. 2- Apresentação de resultados.** Relatório DED/ NA. LNEC, Lisboa.
- Alexandra, N., Azevedo, V. & Tércio, D., 2005.  
**250 anos do terramoto de 1755.** *Revista Actual - Expresso*. 22 de Outubro.
- Almeida, A.B., 2005.  
**The 1755 Lisbon earthquake and the genesis of the risk management concept.** *Conferência Internacional, 250<sup>th</sup> Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake*. Lisboa. pp. 57-64.
- Amaral, F.S. & Aguilar, J.A.M., 2005.  
**Avaliação sumária do estado estrutural e construtivo do prédio nº 102-104 da R. da Bainharia no Porto.** Tese de Mestrado em Metodologias de Intervenção no Património Arquitectónico. Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto. Porto.
- Ambraseys, N.N. & Bommer, J.J., 1991.  
**Attenuation of ground accelerations in Europe.** *EESD*, **20**: 1179-1202.
- Ambraseys, N.N. & Simpson, K.A., 1996.  
**Prediction of vertical response spectra in Europe.** *EESD*, **25**: 401-412.
- Ambraseys, N.N, Simpson, K.A. & Bommer, J.J., 1996.  
**Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe.** *EESD*, **45**: 371-400.
- Anderson, M., Serrano, S. & Oliveira, C.S., 2004.  
**Potencialidades do simulador de risco sísmico da Área Metropolitana de Lisboa no apoio à decisão.** *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 503-507.
- Appleton, J., 1991.  
**Edifícios antigos. Contribuição para o estudo do seu comportamento e das acções de reabilitação a empreender.** Programa de Investigação Edifícios. LNEC, Lisboa.
- Appleton, J., 1994.  
**Passado, presente e futuro da Lisboa Pombalina.** *2º ENCORE*. LNEC, Lisboa. pp. 517-527.
- Appleton, J., 2001.  
**O megassismo de Lisboa no século XXI ou vulnerabilidade sísmica do parque edificado de Lisboa.** *Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado*. Edição SPES e GECORPA. Ordem dos Engenheiros, Lisboa. pp. 95-104.
- Araya, R., & Der Kiureghian, A., 1988.  
**Seismic hazard analysis improved models. Uncertainties and sensitivities.** Rep. UCB/EERC 90/11. Universidade da Califórnia, Berkeley.
- Arroyo, A.L. & Udias, A., 1972.  
**Aftershock sequence and focal parameter of the February 28, 1969 earthquake of the Azores Gibraltar fracture zone.** *BSSA*, **62**: 699-720.
- ATC, 1985.  
**Earthquake damage evaluation data for California.** Applied Technology Council, ATC 13. Redwood City, Califórnia.

- ATC, 1996.  
**Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings.** Relatório nº SSC 96-01, Applied Technology Council, ATC 40. Redwood City, Califórnia.
- Baptista, M.A., 1998.  
**Génese, propagação e impacte de tsunamis na costa portuguesa.** Tese de Doutoramento em Física, na especialidade de Geofísica. Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Baptista, M.A. & Miranda, J.M., 2001.  
**Atenuação da intensidade sísmica na Península Ibérica.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 49-56.
- Baptista, M.A. & Miranda, J.M., 2005.  
**Evaluation of the 1755 earthquake source using tsunami modeling.** *Conferência Internacional, 250<sup>th</sup> Anniversary of the Lisbon Earthquake*. Lisboa. pp. 574-577.
- Baptista, M.A., Miranda, J.M., Chierici, F. & Zitellini, N., 2003.  
**New study of the 1755 earthquake based on multi-channel seismic survey data and tsunami modeling.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **3**: 333-340.
- Baptista, M.A., Miranda, P.M.A., Miranda, J.M. & Mendes Vitor, L., 1998.  
**Constrains on the source of the 1755 Lisbon tsunami inferred from numerical modelling of historical data on the source of the 1755 Lisbon tsunami.** *J. Geodynamics*, **25**, nº 2.
- Barata, M.T., Braga, M.L., Wagner, M.N., Guerra, B., Félix, J.A. & Neto, J., 1989.  
**Sismicidade de Portugal. Estudo da documentação dos séculos XVII e XVIII.** Volume II, Apêndice Documental. Ministério do Planeamento e da Administração do Território. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais. Gabinete de Protecção e Segurança Nuclear. Portugal.
- Barbat, A.H. & Pujades, L., 2004.  
**Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona.** *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 229-252.
- Bazzurro, P., 1998.  
**Probabilistic seismic demand analysis.** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Stanford.
- Bazzurro, P. & Cornell, C.A., 1999.  
**Disaggregation of seismic hazard.** *BSSA*, **89**: 501-520.
- Benjamin, J.R. & Cornell C., 1970.  
**Probability, statistics, and decision for civil engineers.** McGraw-Hill. New York.
- Bento, R., 1996.  
**Avaliação do comportamento sísmico de estruturas porticadas de betão armado – uma abordagem baseada em índices de danos.** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. IST, UTL. Lisboa.
- Bernreuter, D.L., 1992.  
**Determining the controlling earthquake from probabilistic hazards for the proposed appendix B.** Lawrence Livermore National Laboratory. Rep. UCRL-JC-111964, Livermore.
- Bommer, J.J. & Elnashai, A.S., 1999.  
**Displacement spectra for seismic design.** *Journal of Earthquake Engineering*, **3**, nº1, Imperial College Press. Londres.
- Bommer, J.J., Elnashai, A.S., Chlimintzas, G.O. & Lee, D., 1998.  
**Review and development of response spectra for displacement - based seismic design.** ESEE Research Report, nº 98-3, March 1998. Civil Engineering Department, Imperial College. Londres.

- Bonett, R., Barbat, A.H. & Pujades, L., 2004.  
**Curvas de fragilidade sísmica para edifícios tradicionais de mamposteria no reforçada de Barcelona, Espanha.** *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 429-444.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. & Fumal, T.E., 1994.  
**Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North America earthquakes: an Interim report.** Open-file report 94-127. United States Geological Survey, Menlo Park, Califórnia.
- Borges, F. & Castanheta, M., 1985.  
**Structural safety.** Curso 101, 3ª Edição. LNEC, Lisboa.
- Braga, F., Dolce, M. & Liberatore, D., 1982.  
**A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale.** *7ECEE*. Atenas. pp. 431-450.
- Brennet, G. & Badoux, M., 2002.  
**Seismic inventory of the city of Aigle (Switzerland).** *12ECEE*. Londres. Elsevier Science Ltd. Artigo nº 621.
- Cabral, J., 1993.  
**Neotectónica de Portugal Continental.** Tese de Doutoramento em Geologia. Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Cabral, J. & Ribeiro, A., 1989.  
**Carta neotectónica de Portugal. Nota explicativa.** Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Caicedo, C., Barbat, A.H., Canas, J.A. & Aguiar, R., 1994.  
**Vulnerabilidade sísmica de edifícios.** Monografia CIMNE IS-6. Barcelona.
- Caldeira, L., Bilé Serra, J.P., Campos Costa, A. & Sousa, M.L., 1999.  
**Novo aeroporto. Estudo da adequabilidade dos locais de Rio Frio e da Ota do ponto de vista sísmico.** Relatório 219/99 - NF. LNEC, Lisboa.
- Calvi, G.M., Magenes, G. & Pinho, R., 2005.  
**Displacement based methods to predict earthquake damage at variable geographical scales.** *Conferência Internacional, 250<sup>th</sup> Anniversary of 1755 Lisbon Earthquake*. Lisboa. pp. 147-159.
- Calvi, G.M. & Pinho, R., 2004.  
**LESSLOSS – A European Integrated Project on Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides.** IUSS Press, Pavia.
- Campbell, K.W., 1985.  
**Strong motion attenuation relations: a ten years perspective.** *Earthquake Spectra*, Vol. 1, 4: 759-804.
- Campos Costa, A., 1993.  
**A acção dos sismos e o comportamento das estruturas.** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Porto, Porto.
- Campos Costa, A., 2004.  
**O comportamento sísmico de estruturas e análise de risco sísmico.** Comunicação no Seminário *Novos Materiais e Novas Técnicas Construtivas*, promovido pela Associação Portuguesa de Seguradores, Lisboa.
- Campos Costa, A., Oliveira, C.S. & Sousa, M.L., 1992.  
**Seismic hazard-consistent studies for Portugal.** *10WCEE*. Madrid. pp. 477-482.

- Campos Costa, A. & Pinto, A.V., 1997.  
**Definition of European seismic hazard scenarios for reliability assessment of civil engineering structures.** JRC special publication. Ispra.
- Campos Costa, A. & Sousa, M.L., 1998a.  
**Comportamento sísmico de condutas enterradas.** Relatório 190/98 – C3ES. LNEC, Lisboa.
- Campos Costa, A. & Sousa, M.L., 1998b.  
**Probabilistic seismic hazard analysis for Macau region.** Relatório 277/98 – C3ES. LNEC, Lisboa.
- Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, A., Bilé Serra, J. & Carvalho, E.C., 2002.  
**Regional seismic risk scenarios based on hazard deaggregation.** *12ECEE*. Londres, Elsevier Science Ltd. Artigo nº 470.
- Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A. & Carvalho, E.C., 2004.  
**Simulador de cenários sísmicos integrado num sistema de informação geográfica.** *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 455- 464.
- Campos Costa, A., Sousa, M.L. & Coelho, E., 2005.  
**Building stock inventory and vulnerability data for Lisbon Metropolitan Area.** Relatório DE-NESDE. LNEC, Lisboa. (em publicação).
- Campos Costa, A., Sousa, M.L. & Martins, A., 1997.  
**Ensaios dinâmicos *in situ* da portaria de S. Vicente de Fora.** Relatório 90/97 – C3ES. LNEC, Lisboa.
- Campos Costa, A., Sousa, M.L. & Oliveira, C.S., 1999.  
**Seismic risk: methods and application to Portugal.** *11ECEE*. Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Candeias, P., 2000.  
**Avaliação sísmica de edifícios existentes. Contribuição para a avaliação da vulnerabilidade em Portugal.** Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas. IST, UTL. Lisboa.
- Candeias, P., Campos Costa, A., Massena, B. & Coelho, E., 2004.  
**Shake table tests of reduced 1:3 scale models of four-storey unreinforced masonry buildings.** *13WCEE*. Vancouver.
- Candeias, P. & Coelho, E., 2001.  
**Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios existentes. Contribuição para a sua aplicação ao parque habitacional.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 261-274.
- Cao, T., Petersen, M. D., Cramer, C. H., Tousson, R., Topozada, M.S.R. & Davis, J.F., 1999.  
**The calculation of expected loss using probabilistic seismic hazard.** *BSSA*, **89**: 867-876.
- Cardoso, R., 2002.  
**Vulnerabilidade sísmica de estruturas antigas de alvenaria – Aplicação a um edifício Pombalino.** Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas. IST, UTL, Lisboa.
- Cardoso, R., Lopes, M. & Bento, R., 2001.  
**Avaliação sísmica de edifícios antigos de alvenaria.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 691-703.
- Carrilho, F. & Oliveira, C.S., 1997.  
**Preliminary analysis of the first digital recordings obtained in the Portuguese seismographic network – Attenuation studies.** *Natural Hazards*, **14**: 241-261.
- Carvalho, A. & Campos Costa, A., 2004.  
**Modelos estocásticos com ruptura progressiva de falhas para a caracterização da acção sísmica em Portugal.** Relatório 240/2004, DE/NESDE. LNEC, Lisboa.

- Carvalho, A., Campos Costa, A. & Oliveira, C.S., 2004.  
**A stochastic finite-fault modelling for the 1755 Lisbon earthquake.** (CD-ROM). *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 2194.
- Carvalho, E.C., Campos Costa, A. & Sousa, M.L., 2003.  
**Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Contribuição para uma simulação simplificada de danos. Relatório complementar.** Relatório 53/03, DE/NESDE. LNEC, Lisboa.
- Carvalho, A. & Sousa, M.L., 2001.  
**Análise estatística do catálogo sísmico de Portugal Continental.** Nota Técnica nº2/2001 – G3ES. LNEC, Lisboa.
- Carvalho, A., Sousa, M.L., Oliveira, C.S., Campos Costa, A., Nunes, J.C. & Forjaz, V.H., 2001a.  
**Seismic hazard for the Central Group of Azores Islands.** *Bolletino di Geofisica teorica ed applicata*, **42**: 89-105.
- Carvalho, A., Sousa, M.L., Oliveira, C.S., Nunes, J.C. & Campos Costa, A., 2001b.  
**Casualidade sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 171-184.
- Carvalho, E.C., 1980.  
**Comportamento sísmico de edifícios com estruturas em pórtico ou mistas (resposta não-linear e exigências de ductilidade).** LNEC, Lisboa.
- Carvalho, E.C., Campos Costa, A., Sousa, M.L., Martins, A., Serra, J.B., Caldeira, L. & Coelho, A.G., 2002a.  
**Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Relatório final.** Relatório 280/02 – G3ES. LNEC, Lisboa.
- Carvalho, E.C., Coelho, E., Campos Costa, A., Sousa, M.L. & Candeias, P., 2001c.  
**Classificação tipológica do parque habitacional de Portugal Continental para o estudo da sua vulnerabilidade sísmica.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 199-212.
- Carvalho, E.C., Coelho, E., Campos Costa, A., Sousa, M.L. & Candeias, P., 2002b.  
**Vulnerability evaluation of residential buildings in Portugal.** *12ECEE*. Londres. Elsevier Science Ltd. Artigo nº 696.
- Carvalho, E.C., Coelho, E., Campos Costa, A., Sousa, M.L., Candeias, P., Carvalho, A., Massena, B. & Castro, S., 2000.  
**Seismic risk mitigation in Portugal.** *Workshop sobre Mitigation of Seismic Risk Support to Recently Affected European Countries*. Joint Research Centre. Institute for Systems, Informatics and Safety European Commission, Belgrade.
- Carvalho, E.C. & Oliveira, C.S., 1999.  
**Construção anti-sísmica. Edifícios de pequeno porte.** ICT. Informação Técnica. Estruturas. DIT 13. LNEC, Lisboa.
- CEN, 2004.  
**EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.** Comité Européen de Normalisation. Bruxelas.
- Chapman, M.C., 1995.  
**A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design.** *BSSA*, **85**: 937-942.

- Chávez, J., Goula, X., Roca, A., Mañà, F., Presmanes, J. & López-Arroyo, A., 1999.  
**Preliminary Seismic Risk Assessment for Catalonia (Spain).** *IIECEE*. Paris. Ed. Balkema, Roterdão.
- Chen, W.F. & Scawthorn, C., 2003.  
**Earthquake Engineering Handbook.** CRC Press.
- Choffat, P., 1912.  
**Le tremblement de terre du 23 Avril 1909 dans le Ribatejo.** Revista de Obras Públicas e Minas, Tomo XLIII, Imprensa Nacional. Lisboa.
- Choffat, P. & Bensaúde, A., 1913.  
**Estudos sobre o sismo do Ribatejo de 23 de Abril de 1909.** Comissão do Serviço Geológico de Portugal. Imprensa Nacional. Lisboa.
- Coburn, A.W. & Spence, R., 2002.  
**Earthquake protection.** John Wiley & Sons, LTD. Reino Unido.
- Coburn, A.W., Spence, R. & Pomodis, A., 1992.  
**Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse.** *IOWCEE*. Madrid. pp. 5989-5994.
- Coburn, A.W., Spence, R. & Pomonis, A., 1994.  
**Vulnerability and risk assesment.** 2ª Ed. Disaster Management Training Programme (DMTP). Department of Humanitarian Affairs (DHA). United Nations Development Programme (UNDP). Cambridge.
- Coelho, A.G., 2005a.  
**O problema das falhas activas na engenharia civil.** XXII Lição Manuel Rocha. Lisboa.
- Coelho, A.G., Correia, R.M., Sêco Pinto, P.S., Bilé Serra, J., Jorge, C., Oliveira, C.S., Campos Costa, A., Sousa, M.L., Pecker, A., Guigon, F. & Rocher, C., 1992.  
**Setúbal LNG Terminal (Portugal). Seismic risk and dynamic response of superficial soils.** Relatório LNEC. *Geodynamique et Structure*, **21**. Lisboa.
- Coelho, A.G. & Marcelino, J., 1997.  
**Avaliação probabilística da perigosidade de rotura sísmica superficial da falha de Alqueva no local da barragem de Alqueva.** Relatório 160/97 - NP. LNEC, Lisboa.
- Coelho, E., 1992.  
**Comportamento sísmico de estruturas em pórtico de betão armado (avaliação da resposta não-linear histerética).** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. IST, UTL. Lisboa.
- Coelho, E., 2003.  
**Reabilitação sísmica de estruturas de edifícios.** *3ºENCORE*. LNEC, Lisboa. pp. 1119-1128.
- Coelho, E., 2005b.  
**Relatório final do projecto «Mitigação do risco sísmico em Portugal».** Relatório DE. LNEC. Lisboa.
- Coelho, E. & Campos Costa, A., 2004.  
**Seismic testing and vulnerability assesment.** Invited paper. *Portuguese and North-American Workshop on Seismic Behavior of Masonry Structures*, Guimarães.
- Coelho, E., Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, E.C., 1999.  
**Avaliação da Vulnerabilidade de Estruturas e Ensaio Sísmicos.** Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, Faro, pp. 95-106.
- Coelho, E., Candeias, P., Anamateros, G., Pinto, A.V., Taucer, F. & Zaharia, R., 2004a.  
**Comportamento sísmico experimental de edifícios de betão armado com lajes fungiformes.** *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 661-670.

- Coelho, E., Candeias, P., Anamateros, G., Zaharia, R., Taucer, F. & Pinto, A.V., 2004b.  
**Assessment of the seismic behaviour of RC flat slab building structures.** *13WCEE*.  
Vancouver. Artigo nº 2630.
- Coelho, M.N., Oliveira, C.S., Rocha, F., Vicêncio, H. & Vicente, G., 1999.  
**O risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa.** *4ESES*. Escola Superior de Tecnologia da  
Universidade do Algarve, Faro. pp. 143-152.
- Cornell, C.A., 1968.  
**Engineering seismic risk analysis.** *BSSA*, **8**: 1503-1606.
- Cornell, C.A., 1971.  
**Probabilistic analysis of damage to structures under seismic load.** Howell, D.A. Haigh, I. P.  
e Taylor, C., *Dynamic Waves in Civil Engineering*. Londres, Interscience. pp. 473-488.
- Correia, R., 1996.  
**Avaliação probabilística da perigosidade sísmica.** Relatório 28/96 - NEGE. LNEC, Lisboa.
- Costa, A., 1990.  
**Análise sísmica de estruturas irregulares.** Informação Científica. Estruturas. INCES 8.  
LNEC, Lisboa.
- Costa, A., 2000.  
**Caracterização das propriedades mecânicas das paredes de alvenaria tradicional das casas  
da ilha do Faial, Açores.** *REPAR*. LNEC, Lisboa.
- Costa, A., 2001.  
**Reabilitação do edifício da Rua Santana, nº 25, Porto.** Relatório do Instituto da Construção  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Costa, R., 1989.  
**Modelação do processo estocástico sísmico na Península Ibérica.** Tese de Doutoramento em  
Engenharia de Sistemas. IST, UTL. Lisboa.
- Cramer, C.H. & Petersen, M.D., 1996.  
**Predominant seismic source distance and magnitude maps for Los Angeles, Orange and  
Ventura countries, California.** *BSSA*, **86**: 1645-1649.
- Crouse, C.B. & McGuire, J.W., 1996.  
**Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions.** *Earthquake  
Spectra*, **12**: 407-439.
- D' Ayala, D., Spence, R. & Oliveira, C.S., 1997.  
**Earthquake loss estimation for Europe's historic town centers.** *Earthquake Spectra*, Vol. 13,  
**4**: 773 - 793.
- Davidson, R.A., 1997.  
**An urban earthquake disaster index.** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.  
Universidade de Stanford.
- Decanini, I., De Sortis, A., Liberatore, L. & Mollaioli, F., 2002.  
**Damage characterisation of the 1999 Athens earthquake.** *12ECEE*. Londres. Elsevier  
Science Ltd. Artigo nº 287.
- Der Kiureghian, A. & Ang, A. H.-S., 1977.  
**A fault rupture model for seismic risk analysis.** *BSSA*, **67**, nº 4: 1173-1194.
- DGV, 2003.  
**Sinistralidade rodoviária 2003. Elementos estatísticos.** Observatório de Segurança  
Rodoviária. Direcção-Geral de Viação. Ministério da Administração Interna. Lisboa.  
<http://www.pt/dgv/index.asp>.

- Di Pasquale, G. & Orsini, G., 1997.  
**Poposta per la valutazione di scenari di danno conseguenti as un evento sísmico a partire dai dati ISTAT.** 8 *Convegno Nazionale L'Ingegneria Sísmica in Italia*. Palermo.
- Di Pasquale, G., Orsini, G., Pugliese, A. & Romeo, R.W., 1999.  
**Damage scenario from future earthquakes.** *11ECEE*. Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Dias, C.S., Ferreira, M.A., Oliveira, M., Pestana, P. & Oliveira, C.S., 2001.  
**Planeamento em zonas de risco sísmico – Cidade de Faro.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 185–197.
- Dolce, M., Zuccaro, G., Kappos, A. & Coburn, A.W., 1995.  
**Report of the EAEE Working Group 3: vulnerability and risk analysis.** *10ECEE*. Balkema, Roterdão. pp. 3049-3077.
- Duarte, R.T., 1978.  
**Uma teoria linear do comportamento dinâmico das estruturas sujeitas a acções sísmicas.** Relatório integrado nos estudos do domínio do PIAP, DE/LNEC. LNEC, Lisboa.
- EERI Committe on Seismic Risk, Editor, 1989.  
**The basics of seismic risk analysis.** *Earthquake Spectra*, Vol. 5, 4: 675-702.
- EERI, 2000.  
**Financial management of earthquake risk.** EERI Endowment Subcommittee on Financial Risk Management.
- Eguchi, R.T., Goltz, J.D., Seligson, H., Flores, P.J., Blais, N., Heaton, T. & Bortugno, E., 1997.  
**Real-time loss estimation as an emergency response decision support system: The Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool (EPEDAT).** *Earthquake Spectra*, Vol. 13, 4: 815–832.
- Emmi, P.C. & Horton, C.A., 1993.  
**A GIS-based assessment of earthquake property damage and casualty risk: Salt Lake County, Utah.** *Earthquake Spectra*, Vol. 9, 1: 11-33.
- Erdik, M., 1996.  
**Seismic risk analysis for urban systems.** *11WCEE*. Mexico. Elsevier Science Ltd. Artigo n° 2017.
- ESD, 2003.  
**The European strong-motion database.** <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/esd/frameset.htm>.
- Estêvão, J., 1998.  
**Modelo computacional de avaliação do risco sísmico de edifícios.** Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas. IST, UTL, Lisboa.
- Falcão, S. & Bento, R., 2001.  
**Dimensionamento sísmico de estruturas – análises estáticas não-lineares.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 563–576.
- Farinha, J.S.B., 1955.  
**Acção dos sismos sobre as construções.** *Simpósio sobre a acção dos sismos e a sua consideração no cálculo das construções*. Memória n.º 112. Boletim da Ordem dos Engenheiros, n° 22. Lisboa.
- Farinha, J.S.B., 1997.  
**Construção da Baixa Pombalina.** Cadernos do Metropolitano, Caderno n° 6. Metropolitano de Lisboa. Lisboa.
- FEMA, 1992.  
**NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings.** Federal Emergency Management Agency, FEMA 178, Washington DC.

- FEMA, 1996.  
**NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings.** Federal Emergency Management Agency, FEMA 273, Washington DC.
- FEMA, 2001.  
**HAZUS® 99 Estimated annualized earthquake losses for the United States.** FEMA 366, Federal Emergency Management Agency Mitigation Directorate. Washington DC.
- FEMA & NIBS, 1999.  
**Earthquake loss estimation methodology – HAZUS 99.** Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC.
- Fernandes, J., 2005.  
**Lisboa – Novembro de 1755.** Documentário. RTP. Lisboa.
- Fernandes, J.M., 1985.  
**Tipologias construtivas na arquitectura doméstica em Portugal – resumo histórico. 1ª ENCORE.** LNEC, Lisboa.
- Ferreira, C.A., 1989.  
**Betão a idade da descoberta.** Passado Presente. Lisboa.
- Ferreira, C.A., 1991.  
**As origens do betão armado em Portugal e o registo de patente de François Hennebique.** Comunicação apresentada à Academia Nacional de Belas-Artes. Lisboa.
- FLAD & Público, 2005.  
**O grande terramoto de Lisboa. Descrições.** Vol. 1. FLAD e Público.
- Fonseca, J.D., 2004.  
**O terramoto de Lisboa.** Argumentum.
- Fonseca, J.D., Vilanova, S.P., Bosi, V. & Megrahoui A., 2000.  
**Paleoseismological investigations unveil Holocene thrusting onshore Portugal.** *EOS*, **81**: 412-413.
- França, J.A., 1977.  
**Lisboa Pombalina e o Iluminismo.** Livraria Bertrand. Lisboa.
- França, J.A., 1989.  
**Lisboa: urbanismo e arquitectura.** Biblioteca Breve. Instituto de Cultura e Língua Portuguesa. Lisboa.
- Frankel, A., 1995.  
**Mapping seismic hazard in the central and eastern United States.** *Seismological Research Letters*, **66**: 8-21.
- Frankel, A., Mueller, C., Barnhard, T., Leyendecker, E., Wesson, R.L., Harmsen, S.C., Klein, F.W., Perkins, D.M., Dickman, N., Hanson, S.L. & Hopper, M.G., 2000.  
**USGS national seismic hazard maps.** *Earthquake Spectra*, Vol. 16, **1**: 1-19.
- Frankel, A., Mueller, C., Barnhard, T., Perkins, D., Leyendecker, E., Dickman, N., Hanson, S. & Hopper, M., 1996.  
**National seismic-hazard maps: June 1996 documentation.** U.S. Geological Survey Open-file report 96-532 e página da rede <http://geohazards.cr.usgs.gov/eq/>.
- Freeman, S.A., 1999.  
**The capacity spectrum method as a tool for seismic design.** *IIECEE*. Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Gastão, A.M., Galopim, N., Lobo, P., Lucas, I., Céu e Silva, J. & Santos, S.M., 2005.  
**Suplemento DN.** *Diário de Notícias*. 28 de Outubro.

- Geirinhas, J., 2001.  
**Conceitos e metodologias. BGRI – Base Geográfica de Referenciação de Informação.** Revista de Estudos Regionais. Região de Lisboa e Vale do Tejo. 2º Semestre de 2001 67-73. [www.ine.pt](http://www.ine.pt) acedida a 2005-06-14.
- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, S., 2003.  
**Seismic risk analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas.** *European Safety and Reliability Conference*. Maastricht.
- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, S., 2004.  
**A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings.** *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 896.
- Gomes, A. & Brito, J., 1996.  
**Influência da cintagem dos pilares na ductilidade e aplicação das regras de pormenorização do Eurocódigo 8.** *Betão Estrutural, 6º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas*. LNEC, Lisboa.
- Grünthal, G., Editor, 1998.  
**European Macroseismic Scale.** Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15. Luxemburgo.
- Gulkan, P., Sucouglu, H. & Ergunay, O., 1992.  
**Earthquake vulnerability, loss and risk assessment in Turkey.** *10WCEE*. Madrid. Vol. 1, pp. 539 – 543.
- Gupta, A., 1997.  
**Performance-based strategy evaluation methodology for earthquake risk management.** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Stanford.
- Gutenberg, B. & Richter, C.F., 1942.  
**Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration.** *BSSA*, 3: 163-191.
- Gutscher, M.A., 2005.  
**Whodunnit in 1755? New clues from Sumatra, from the seafloor off SW Iberia and from GPS.** *Conferência Internacional, 250<sup>th</sup> Anniversary of the Lisbon Earthquake*. Lisboa. pp. 568-573.
- Harmsen, S. & Frankel, A., 2001.  
**Geographic deaggregation of seismic hazard in the United States.** *BSSA*, 1: 13-26.
- Harmsen, S., Perkins, D. & Frankel, A., 1999.  
**Deaggregation of probabilistic ground motions in the Central and Eastern United States.** *BSSA*, 89: 1-13.
- Henriques, M.C., Mouzinho, M.T. & Ferrão, N.M., 1988.  
**Sismicidade de Portugal. O sismo de 26 de Janeiro de 1531.** Comissão para o Catálogo Sísmico Nacional. Lisboa.
- Hillier, F.S. & Lieberman, J.G., 1990.  
**Introduction to operation research.** 5ª Edição. McGraw-Hill, New York.
- Holmes, W.T., 1996.  
**Seismic evaluation of existing buildings state of the practice.** *11WCEE*. Mexico. Elsevier Science. Artigo nº 2008.
- IGN, 2000.  
Instituto Geográfico Nacional. Madrid. <http://www.geo.ign.es/>.
- IM, 2004.  
Instituto de Meteorologia. Lisboa. <http://www.meteo.pt/Sismologia/default.htm/>.

- Indirli, M., Clemente, P. & Spadoni, B., 2004.  
**The reconstruction of San Giuliano di Puglia after the October 31<sup>st</sup> 2002 earthquake.** *13WCEE*. Vancouver. Artigo n° 1805.
- INE, 1994.  
**Censos 91. Resultados definitivos. Portugal.** Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.
- INE, 1998.  
**Nomenclaturas territoriais. Designações e códigos.** Série Normas n° 22. Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- INE, 2001a.  
**Estatísticas da construção de edifícios.** Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- INE, 2001b.  
**Censos 2001. XIV recenseamento geral da população. IV recenseamento geral da habitação. Manual do recenseador.** Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- INE, 2002a.  
**Recenseamento da população e da habitação (Portugal) - Censos 2001.** Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- INE, 2002b.  
**Infoline. Serviço de informação online do INE.** Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.  
<http://www.ine.pt>.
- INE, 2003.  
**Censos 2001.** Programa Global. Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.  
<http://www.ine.pt/censos2001/censos.asp>.
- Ishikawa, Y. & Kameda, H., 1988.  
**Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis.** *9WCEE*. Tóquio. Vol. II. pp. 95-100.
- IST, 1996.  
**Rede portuguesa de acelerógrafos IST / LNEC.** Folheto de divulgação da Rede. IST, Lisboa.
- Johnston, A.C., 1996.  
**Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions – III. New Madrid 1811-1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755.** *Geophys. J. Int.*, **126**: 314-344.
- Johnson, R.A., 1973.  
**An earthquake spectrum prediction technique.** *BSSA*, **6**: 1255-1274.
- Joyner, W.B. & Boore D.M., 1982.  
**Prediction of earthquake response spectra.** Open-file report 82-977. United States Geological Survey.
- Kawashima, K., Aizawa, K. & Takahashi, K., 1984.  
**Attenuation of peak ground motion and absolute acceleration response spectra.** *8WCEE*. San Francisco. Vol. II. pp. 257-264.
- King, S.A., Kiremidjian, A., Basöz, N., Law, K., Vucetic, M., Doroudian, M., Olson, R., Eiding, J., Goettel, K. & Horner, G., 1997.  
**Methodologies for evaluating the socio-economic consequences of large earthquakes.** *Earthquake Spectra*, Vol. 13, **4**: 565-584.
- Kircher, C.A., Nassar, A. A., Kustu, O. & Holmes, W.T., 1996.  
**Development of building damage functions for earthquake loss estimation.** *Earthquake Spectra*, Vol. 13, **4**: 663-682.

- Kramer, S.L., 1996.  
**Geotechnical earthquake engineering.** Prentice-Hall series in Civil Eng. and Eng. Mechanics, New Jersey.
- Lapin, L.L., 1973.  
**Statistics for modern business decisions.** Harcourt Brace Jovanovich, Inc. New York.
- Lee, V.W. & Trifunac, M.D., 1992.  
**Frequency dependent attenuation of strong earthquake ground motion in Yugoslavia.** *European Earthquake Engineering*, VI, 1: 3-13.
- Levret, A., 1991.  
**The effects of the November 1, 1755 Lisbon earthquake in Morocco.** *Tectonophysics*, 193: 83-94.
- LNEC, 1993.  
**A arquitectura e os processos construtivos entre os séculos XVI e meados de XVIII.** Nota Técnica nº 1/93-NDA. LNEC, Lisboa.
- Loh, C.H., Lawson, R.S. & Dong, W., 2000.  
**Development of a national earthquake risk assessment model for Taiwan.** *12WCEE*. Auckland.
- Lopes, M. & Azevedo, J., 1997.  
**Avaliação do comportamento de um edifício de alvenaria em Lisboa.** *3ESES*, IST, Lisboa. pp. 385-394.
- Lucantoni, A., Bramerini, F. & Sabetta, F., 2002.  
**Last achievements in seismic risk assessment of Italy.** *12ECEE*. Londres. Elsevier Science Ltd. Artigo nº 464.
- Lucas, A., Oliveira, C.S. & Guedes, J.H.C., 1992.  
**Análise de alguns dados apresentados nos relatórios do GAR e de dados da SRHOP sobre a reconstrução.** *Monografia - 10 Anos Após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980.* LNEC, Lisboa. Vol. 2, pp. 633-666.
- Luso, E., Lourenço, P.B. & Almeida, M., 2003.  
**Tratamento de paredes de alvenaria antiga com problemas de humidade ascensional.** *3º ENCORE*. LNEC, Lisboa. pp. 813-821.
- Mahdi, T., 2004.  
**Performance of traditional arches and domes in recent Iranian earthquakes.** *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 2871.
- Marécos, J.E. & Castanheta, M.N., 1970.  
**Estudo do comportamento de estruturas sob a acção do sismo de 28 de Fevereiro de 1969.** Memória nº 357. LNEC, Lisboa.
- Martinez Solares, J.M., Arroyo, L. & Mezcua, J., 1979.  
**Isoseismal map of the 1755 Lisbon earthquake obtained from Spanish data.** *Tectonophysics*, 56, 3: 301-313.
- Martins, I. & Mendes Victor, L.A., 1990.  
**Contribuição para o estudo da sismicidade de Portugal Continental.** Pub. 18. Instituto Geofísico do Infante D. Luís. Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Mascarenhas, J.M.D., 1994.  
**Baixa Pombalina, algumas inovações técnicas.** *2º ENCORE*. LNEC, Lisboa. pp. 713-721.

- Mascarenhas, J., 1997.  
**Evolução do sistema construtivo dos edifícios de rendimento da Baixa Pombalina em Lisboa, relacionada com as condições sísmicas do local.** *3ESES*. IST, Lisboa. pp. 555-562.
- Mascarenhas, A.J.M., 2005.  
**O terramoto de 1755. Os engenheiros militares e a reconstrução de Lisboa".** *Ingenium*. II Série, **89**, Lisboa. pp. 34-38.
- Mateus, J.M., 2002.  
**Técnicas tradicionais de construção de alvenarias. A literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos.** Livros Horizonte. Lisboa.
- McCormack, T.C. & Rad, F.N., 1997.  
**An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21.** *Earthquake Spectra*, Vol. 13, **4**: 605 – 621.
- MCEER, 2004.  
Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. Buffalo.  
<http://mceer.buffalo.edu/research/Bam/>
- McGuire, R.K., 1976.  
**EQRISK, Evaluation of earthquake risk to site.** Open file report 76-67. United States Department of the Interior Geological Survey.
- McGuire, R.K., 1995.  
**Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop.** *BSSA*, **85**: 1275-1284.
- McGuire, R.K., 2004.  
**Seismic hazard and risk analysis.** *EERI Monograph*, Earthquake Engineering Research Institute.
- McGuire, R.K. & Shedlock, K.M., 1981.  
**Statistical uncertainties in seismic hazard evaluation in the United States.** *BSSA*, **71**: 1287-1308.
- Melchers, R.E., 1999.  
**Structural reliability analysis and prediction.** 2ª Edição. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Mendes Victor, L.A., Oliveira, C.S., Pais, I. & Teves-Costa, P., 1993.  
**Earthquake damage scenarios in Lisbon for disaster preparedness.** *NATO Advanced Research Workshop on An Evaluation of Guidelines for Developing Earthquake Damage Scenarios for Urban Areas*. M. Erdik e B. Tucker (editores). Instambul.
- Mézcua, J. & Martinez Solares, J.M., 1983.  
**Sismicidad del area Ibero-Mogrebi.** Publicação 203. Instituto Geografico Nacional. Madrid.
- MF-DGEP, 2002.  
Ministério das Finanças e da Administração Pública. Direcção-Geral de Estudos e Previsão.  
<http://www.dgep.pt>.
- Mihailov, V. & Siderovski, K., 1999.  
**Seismic hazard analysis of urban area through geographic information systems – Case study.** *IIECEE*. Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Milutinovic, Z.V. & Trendafiloski, G.S., 2003.  
**RISK-UE. Na advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns.** WP4 Handbook: Vulnerability of current buildings.
- Montilla, J.A., 2000.  
**Agregación y desagregación de aceleraciones esperadas en la Península Ibérica utilizando sismicidad de fondo.** Tese de Doutoramento. Universidade de Granada.

- Montilla, J.A. & Casado, C.L., 2002.  
**Seismic hazard estimate at Iberian Peninsula.** *Pure and Applied Geophysics*, **159**: 2699-2713.
- Montilla, J.A., Casado, C.L. & Romero, J.H., 2002.  
**Deaggregation in magnitude, distance, and azimuth in the South and West of the Iberian Peninsula.** *BSSA*, **6**: 2177-2185.
- Monumentos, 2004.  
**Dossiê: Baixa Pombalina.** Revista Monumentos nº 21. DGEMN, Lisboa
- Moreira, J.G. & Cabrita, A.M.R., 1985.  
**Proposta de ficha de inquérito para aplicar a uma amostra representativa do parque habitacional de Lisboa.** *1º ENCORE*. LNEC, Lisboa
- Moreira, V.S., 1984.  
**Sismicidade histórica de Portugal Continental.** Separata da Revista do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. Lisboa.
- Moreira, V.S., 1985.  
**Seismotectonics of Portugal and its adjacent area in the Atlantic.** *Tectonophysics*, **117**, pp.85-96. Elsevier Science Publisher.
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P. & RISK-UE team, 2004.  
**The European Risk-Eu project: An advanced approach to earthquake risk scenarios.** *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 3329.
- Moya, Y.F., Barbat, A.H. & Canas, J.A., 1996.  
**Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación.** Monografía CIMNE IS-20. Barcelona.
- Murakami, H.O., 1992.  
**A simulation model to estimate human loss for occupants of collapsed buildings in an earthquake.** *10WCEE*. Madrid. Vol. 10, pp. 5969 - 5974.
- Musson, R., 2003.  
**A short history of intensity and intensity scales.** British Geological Survey, <http://www.earthquakes.bgs.ac.uk/hazard/histint.htm>, acedido a 2003-08-12.
- Naves, F., 2005.  
**Terramoto de 1755.** *Diário de Notícias*, 1 de Novembro. pp. 2-9.
- Neves, F., 2005.  
**Lisboa, 1 de Novembro de 1755. 9 minutos que abalaram o mundo.** *Público*, 30 de Outubro. pp 3-11.
- Newmark, N.M. & Rosenblueth, E., 1971.  
**Fundamentals of earthquake engineering.** Prentice-Hall.
- NGDC & NEIC, 1996.  
**Seismicity catalogs.** Global and Regional, 2150 B.C.-1996 A.D. Vol. 2.
- NISEE, 2004.  
Colecção de imagens de sismos históricos de Jan T. Kozak. National Information Service for Earthquake Engineering. Universidade da Califórnia, Berkeley. <http://nisee.berkeley.edu/images/servlet/KozakBrowse?eq=5234>.
- Nunes, J.C. & Ribeiro, E., 2001.  
**Caracterização da sismicidade instrumental dos Açores no período 1950-1980.** *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 17-28.

- Oliveira, C.S., 1974.  
**Seismic risk analysis.** Relatório nº EERC 74-1. Universidade da Califórnia, Berkeley.
- Oliveira, C.S., 1977.  
**Sismologia, sismicidade e risco sísmico. Aplicações em Portugal.** Relatório, Proc. 36/11/4394. LNEC, Lisboa.
- Oliveira, C.S., 1983.  
**Programa de ações para minimização do risco sísmico – Fase I.** 1º Relatório final. LNEC, Lisboa.
- Oliveira, C.S., 1986.  
**A sismicidade histórica e a revisão do catálogo sísmico.** Relatório 99/86 – NDA. LNEC, Lisboa.
- Oliveira, C.S., 1988.  
**Distribuição dos danos ocorridos em Lisboa aquando dos principais sismos históricos.** *Protecção Civil*, Vol. 1, nº 4, Setembro, Serviço Nacional de Protecção Civil. Lisboa.
- Oliveira, C.S., 1989a.  
**Efeitos dos sismos sobre as construções – Parte I – Danos mais frequentes.** *Revista Engenharia e Arquitectura*, Ano 3, nº 13, Fev / Março. Lisboa. pp. 34-52.
- Oliveira, C.S., 1989b.  
**Efeitos dos sismos sobre as construções - Parte II – Concepção estrutural e redução de danos.** *Revista Engenharia e Arquitectura*, Ano 3, nº 14, Abril/Maio. Lisboa. pp. 108-126.
- Oliveira, C.S., 1998.  
**Impacto sísmico sobre a Área Metropolitana de Lisboa. Elementos para a sua discussão.** *Protecção Civil*, ano X, II Série, nº 14, pp. 2-11, Serviço Nacional de Protecção Civil. Lisboa.
- Oliveira, C.S., 2005.  
**Description of the 1755 Lisbon earthquake, its extension, causes and effects. The tremblor. The tsunami. The fire.** IABSE Symposium. Structures and Extreme Events. Lisboa.
- Oliveira, C.S., Campos Costa, A., Forjaz, V.H. & Nunes, J.C., 1990.  
**Seismic hazard analysis in zones of time and space interdependence: An application to São Miguel Island, Azores.** *Natural Hazards*, Vol. III: 15-29.
- Oliveira, C.S., Campos Costa, A. & Sousa, M.L., 1995.  
**Estimativa dos danos causados por sismos no parque habitacional do Continente Português. Contribuição para a definição de uma política de seguros.** Associação Portuguesa de Seguradores. Lisboa.
- Oliveira, C.S., Campos Costa, A. & Sousa, M.L., 2000.  
**Definition of seismic action in the context of EC-8. Topics for discussion.** *12WCEE*. Auckland.
- Oliveira, C.S., Gaspar, J. & Correia, F., 1985.  
**Levantamento do parque habitacional de Lisboa. Vol. 1 – Ficha-inquérito. Apuramento de resultados na zona da Alameda D. Afonso Henriques, freguesias de Alto do Pina, S. João de Deus e S. Jorge de Arroios.** Nota técnica. LNEC, Lisboa.
- Oliveira, C.S. & Guedes, J.H.C., 1996.  
**Contribuição para o estudo do comportamento sísmico da rede hospitalar.** Projecto HOPE, CT EV5V93 0297. Relatório LNEC /IST. Lisboa.
- Oliveira, C.S., Lucas, A.R.A. & Guedes, J.H.C., 1992.  
**Monografia – 10 anos após o sismo de 1 de Janeiro de 1980.** Vols. 1 e 2, LNEC. Lisboa.

- Oliveira, C.S., Martins, A., Aguiar, J. & V. Duarte, 1994.  
**Análise do parque habitacional de Lisboa. Levantamento do anel Campolide-Beato. Apresentação dos resultados.** Relatório 129/94 - NA. LNEC, Lisboa
- Oliveira, C.S., Pais, I. & Cabral, J.C., 1993.  
**Estudos de microzonagem sísmica para a cidade de Lisboa: Definição de cenários de danos.** *Seminário sobre Catástrofes Naturais*. Ordem dos Engenheiros / LNEC.
- Oliveira, C.S. & Pinto, A.V., 1995.  
**Comportamento sísmico de monumentos. Estudo da portaria de São Vicente de Fora. Monumentos.** *Revista Semestral de Edifícios e Monumentos*, 2. DGEMN. MOPTC. Lisboa.
- Oliveira, C.S. & Sousa, M.L., 1991.  
**A contribution to reduce subjectivity in treatment of historical data. Application to 1531 and 1909 earthquakes in Portugal.** *Symposium on Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region*, Monografia NUM. 8, Instituto Geografico Nacional. Madrid. pp. 97 – 104.
- Oliveira, C.S, Sousa, M.L. & Campos Costa, A., 1999.  
**Contribuição para a revisão da acção sísmica em Portugal Continental no contexto do Eurocódigo 8.** *4ESES*. Faro. pp. 153-164.
- Pai, C.H., Tien, Y.M., Juang, D.S. & Wang, Y.L., 2004.  
**A Study on near-fault mortality from the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake.** *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 2542.
- Pais, I., Costa, P.T. & Cabral, J., 1996a.  
**Emergency management of urban systems under earthquake damage scenarios.** *11WCEE*. México.
- Pais, I. & Ribeiro, M.J., 1994.  
**Plano de emergência para o risco sísmico da cidade de Lisboa.** *III Encontro de Técnicos da Câmara Municipal de Lisboa*. Edição CML, Imprensa Municipal. Lisboa.
- Pais, I., Ribeiro, M.J., Oliveira, C.S. & Costa, P.T.; 1997.  
**Sistema de informação de avaliação de vulnerabilidades sísmicas. Estudos na área crítica da Colina do Castelo.** *3ESES*. IST, Lisboa. pp. 579-587.
- Pais, I., Ribeiro, M.J., Oliveira, C.S., Costa, P.T. & Cabral, J., 1996b.  
**Planeamento e gestão de emergência sísmica na cidade de Lisboa.** *Revista Protecção Civil*, Ano VIII, II Série, 9: 28-35.
- Paiva, J.V., Carvalho, E.C. & Silva, A.C., 1985.  
**Patologia da construção.** Documento introdutório do Tema 3 do *1º ENCORE*. LNEC, Lisboa.
- Paula, A., 1994.  
**Avaliação de informação macrossísmica dos sismos sentidos em Portugal Continental no período 1947-1993. Estudos de atenuação.** Relatório de Estágio Profissionalizante da Licenciatura em Ciências Geofísicas. Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Paula, A., 1996.  
**Base de dados de informação macrossísmica.** Relatório realizado no âmbito do projecto Environment *Estudos de Risco Sísmico*. LNEC, Lisboa.
- Paula, A. & Oliveira, C.S., 1996.  
**Evaluation of 1947-1993 macroseismic information in Portugal using EMS-92 scale.** *Annali di Geofisica*.
- Pereira de Sousa, F.L., 1919-1932.  
**O Terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um estudo demográfico.** Serviços Geológicos. Lisboa.

- Pereira, G., 2005.  
**Lisboa 01.11.1755. O dia em que tudo ruiu.** *National Geographic Portugal*. Novembro. pp. 83-99.
- Pinho, A., 2000a.  
**Paredes de edifícios antigos em Portugal.** LNEC, Lisboa.
- Pinho, A., 2000b.  
**Soluções construtivas de paredes de edifícios antigos em Portugal.** REPAR. LNEC, Lisboa.
- Pinto, A.V., 1997.  
**Earthquake performance of structures. Behavioural, safety and economical aspects.** Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. IST, UTL. Lisboa
- Pinto, A.V., Verzeletti, G., Molina, J., Varum, H. & Coelho, E., 2002.  
**Pseudo-dynamic tests on non-seismic resisting RC frames (infill strengthened frame tests).** EUR Report. ELSA, IPSC, EC, Joint Research Center. Ispra.
- Pinto, P.E., Giannini, R. & Franchin, P., 2004.  
**Seismic reliability analysis of structures.** IUSS Press. Pavia.
- Quintino, J., 1970.  
**O sismo de 28 de Fevereiro de 1969. Algumas informações geofísicas deduzidas do seu estudo.** Separata do «Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências». Vol. 11º - fasc. 2º. Universidade de Lisboa, Lisboa. pp. 265-292.
- Ramos, L., 2002.  
**Análise experimental e numérica de estruturas históricas de alvenaria.** Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Ramos, L. & Lourenço, P.B., 2000.  
**Análise das técnicas de construção pombalina e apreciação do estado de conservação estrutural do quarteirão do Martinho da Arcada.** Engenharia Civil, nº 7. Universidade do Minho, Guimarães. pp. 35-46.
- Ravara, A., 1968.  
**Comportamento de estruturas de betão armado sob a acção dos sismos.** Tese submetida para obtenção do grau de Especialista. LNEC, Lisboa.
- Ravara, A. & Jervis Pereira, J.M., 1970.  
**Análise do acelerograma do sismo de 28/2/69 registado no macrosismógrafo da ponte sobre o Tejo em Lisboa.** Relatório. Proc. 37/5/3750, Obra 39/53/203. Serviço de Edifícios e Pontes, Divisão de Dinâmica Aplicada. LNEC, Lisboa.
- Reitherman, R., 1985.  
**A review of earthquake damage estimation methods.** *Earthquake Spectra*, Vol. 1, 4: 805-847.
- Ribeiro, A., 2002.  
**Soft Plate and impact tectonics.** Springer Eds.
- Ribeiro, F., 2005.  
**250 anos do terramoto de Lisboa.** *Público*. 1 de Novembro. pp. 2-6.
- Richter, C.F., 1958.  
**Elementary Seismology.** W.H. Freeman and Co., S. Francisco.
- Rojahn, C., King, S.A, Scholl, R.E, Kiremidjian, A.S., Reaveley, L.D. & Wilson, R.R., 1997.  
**Earthquake damage and loss estimation methodology and data for Salt Lake County.** *Earthquake Spectra*, Vol. 13, 4: 623-642.

Roque, J.C.A & Lourenço, P.B., 2003.

**Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria.** 3º *ENCORE*. LNEC, Lisboa. pp. 907-916.

RSA, 1983.

**Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes.** Decreto-Lei nº 235/83 de 31 de Maio e Decreto-Lei nº 357/85 de 2 de Setembro. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1986. Lisboa.

RSCCS, 1958.

**Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos.** Decreto nº 41 658. Imprensa Nacional. Lisboa.

RSEP, 1961.

**Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes.** Decreto nº 44 041. Imprensa Nacional, Lisboa.

Runa, L. & Freire, A.G., 1989.

**O sismo de 1755 em Portugal: Contribuição para o estudo das suas características e consequências.** *Workshop on historical earthquakes on Ibero-Maghrebian region. Methodological approach and case studies.* Lisboa.

Sabetta, F., 2000.

**Prevention and mitigation of seismic risk in Italy.** *Workshop Mitigation of seismic risk. Support to recently affected European countries.* Belgirate.

Sabetta, F., Goretti, A. & Lucantoni, A., 1999.

**Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion.** *11ECEE.* Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.

Sabetta, F. & Pugliese, A., 1987.

**Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italy strong-motion records.** *BSSA*, 77, nº 5: 1491-1511.

Sandi, H., 1986.

**Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems.** *8ECEE.* LNEC, Lisboa. pp. 11-69

Sandi, H., 1999.

**A format for vulnerability characteristics of damaged structures.** *11ECEE.* Paris. Ed. Balkema, Roterdão.

Senos, M.L., Ramalhe, D. & Taquelim, M.J., 1994.

**Estudo dos principais sismos que atingiram o território de Portugal Continental.** *2ESES.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. pp. I.75-I.84.

Shah, H.C. & Dong, W., 2005.

**Role of insurance and reinsurance in managing financial risks due to natural catastrophic events.** *Prevenção e Protecção das Construções contra Riscos Sísmicos.* Fundação Luso-Americana, Lisboa. pp. 111-124.

Sigbjörnsson, R., Bessason, B., Sigfússon, Th. I., Sigfússon, Th. & Thorvaldsdóttir, S., 1999.

**Earthquake risk mitigation in South Iceland.** *11ECEE.* Paris. Ed. Balkema, Roterdão.

Silva, D.S., 2002.

**À espera da cheia? Paradoxos da modificação do ambiente por via da tecnologia.** Tese de Mestrado em Cidade, Território e Requalificação Urbana do Instituto Superior das Ciências do Trabalho e da Empresa. Lisboa.

- Silva, V.C., 2001.  
**Viabilidade técnica de execução do “Programa Nacional de Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado”**. Edição da Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) e do Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico (GECORPA). Ordem dos Engenheiros. Lisboa. pp. 15-56.
- Silva, V.C. & Soares, I., 1996.  
**Utilização do betão armado no reforço sísmico de edifícios de alvenaria. Caso dos edifícios “de placa”**. *Betão Estrutural, 6º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas*. LNEC, Lisboa. pp. 2-127-2-146.
- Silva, V.C. & Soares, I., 1997.  
**Vulnerabilidade sísmica dos edifícios “Gaioleiros” de Lisboa e medidas possíveis para a reduzir**. *3ESES*. IST, Lisboa. pp. 563-572.
- Silveira, P.M., Veiga, R. & Brito, J., 2003.  
**Paredes estucadas em edifícios antigos**. *3º ENCORE*. LNEC, Lisboa. pp. 519-527.
- SNPC, 1983.  
**Programa de acções para minimização do risco sísmico. Fase I**. Primeiro Relatório final Plano Nacional de Emergência. Presidência do Conselho de Ministros. Serviço Nacional de Protecção Civil. Lisboa.
- Solares, J.M., 2001.  
**Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de Noviembre de 1755)**. Monografia nº 19. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. Ministério de Fomento. Madrid.
- Sousa, M.L., 1996.  
**Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental**. Tese de Mestrado em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas. IST, UTL. Lisboa.
- Sousa, M.L. & Campos Costa, A., 1998.  
**Caracterização probabilística da acção sísmica no Carricho. Relatório Final**. Relatório 35/98 - C3ES. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L., Campos Costa, A., Carvalho, A. & Coelho, E., 2004.  
**An automatic seismic scenario loss methodology integrated on a Geographic Information System**. *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 2526.
- Sousa, M.L., Campos Costa, A. & Oliveira, C.S., 1997a.  
**Modelos probabilísticos para a avaliação de perdas causadas por sismos: Aplicação à cidade de Lisboa**. *3ESES*. IST, Lisboa. pp. 109-118.
- Sousa, M.L., Candeias, P., Martins, A., Coelho, E., Campos Costa, A. & Carvalho, E.C., 2000a.  
**Levantamento do parque habitacional de Portugal Continental para o estudo da sua vulnerabilidade sísmica com base nos Censos-91**. Relatório 260/2000 – C3ES. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L. & Carvalho, A., 2001.  
**Estudo de casualidade sísmica no Grupo Central do Arquipélago dos Açores**. Relatório 208/01. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L., Carvalho, A. & Campos Costa, A., 2001.  
**Seismic hazard de-aggregation for the Central Group of Azores Islands**. *5ESES*. LREC, Ponta Delgada. pp. 241-250.
- Sousa, M.L., Carvalho, E.C. & Oliveira, C.S., 2000b.  
**Risco sísmico em Portugal**. Bolsa dos Seguros. Revista de Seguros e Pensões. Ano III, nº 8, Março, Lisboa. pp. 22-26.

- Sousa, M.L., Coelho, E. & Campos Costa, A., 2005.  
**Seismic risk mitigation options and actions to be studied for Lisbon Metropolitan Area.** Relatório 161/05, DE/NESDE. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L., Martins, A. & Campos Costa, A., 2003.  
**Levantamento do parque habitacional de Portugal Continental para o estudo da sua vulnerabilidade sísmica com base nos Censos 2001.** Relatório 205/03, DE/NESDE. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L. & Oliveira, C.S., 1991.  
**Sismicidade histórica: intensidades sísmicas, cartas de isossistas e atenuação.** Relatório – NDA. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L. & Oliveira, C.S., 1997.  
**Hazard assessment based on macroseismic data considering the influence of geological conditions.** *Natural Hazards*. **14**: 207-225, Kluwer Academic Publishers.
- Sousa, M.L., Oliveira, C.S. & Martins, A., 1992.  
**Compilação de catálogos sísmicos da região Ibérica.** Relatório 36/92 – NDA. LNEC, Lisboa.
- Sousa, M.L., Oliveira, R.C. & Oliveira, C.S., 1997b.  
**Análise probabilística da casualidade sísmica em Portugal Continental.** *Investigação Operacional* **17**: 3-21, Lisboa.
- Spence, R., 2005.  
**Summary and planning for further action.** Comunicação no *Workshop on Reduction Earthquake Risk in Europe*, EAEE, LNEC, Lisboa.
- Spence, R., Lopes, M., Bisch, P., Plumier, A. & Dolce, M., 2005.  
**Proposals for European earthquake risk reduction programme – a discussion document.** Comunicação no *Workshop on Reduction Earthquake Risk in Europe*, EAEE, LNEC, Lisboa.
- Spence, R., Oliveira, C.S., D'Ayala, D.F., Papa, F. & Zuccaro, G., 2000.  
**The performance of strengthened masonry buildings in recent European earthquakes.** *12WCEE*. Auckland. Artigo nº 1366.
- SPES & GECORPA, 2001.  
**Contribuição para a elaboração de um programa nacional de redução da vulnerabilidade sísmica do edificado.** Edição da Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) e do Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico (GECORPA). Ordem dos Engenheiros, Lisboa. pp. 9-12.
- SSHAC, 1997.  
**Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts.** Lawrence Livermore Nat. Lab., Report NUREG/CR-6372 – Report UCRL-ID-122160, Vol. I. Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC). Livermore.
- SSN, 1998.  
<http://www.serviziosismico.it/PROG/1998/RISCHIO/start.html>. [acedido em 2002].
- StatSoft, Inc, 2004.  
**STATISTICA** (data analysis software system), versão 6. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Terrinha, P., Pinheiro, L.M., Henriot J-P., Matias, L., Ivanov, M.K., Monteiro, J.H., Akhmetzhanov, A., Volkonskaya, A., Cunha, T., Shaskin, P. & Rovere, M., 2003.  
**Tsunamigenic-seismogenic structures, neotectonics, sedimentary processes and slope instability on the southwest Portuguese margin.** *Marine Geology*, **195**: 55 – 73.
- Teves Costa, P., 2005.  
**Terramotos e tsunamis.** Livro Aberto, Editores Livres Lda. Lisboa.

- Teves Costa, P., Oliveira, C.S. & Viegas, G., 2004.  
**Danos em Angra do Heroísmo provocados pelo sismo de 1980. Correlação com as frequências do solo e edifícios.** *6ESES*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 465-472.
- Teves Costa, P. & Viegas, G., 2004.  
**Estudo da perigosidade sísmica na região do Vale Inferior do Tejo.** *4ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica*. Figueira da Foz.
- Tiedemann, H., 1990.  
**What can be gained from earthquake prediction?** *ECE/UN Seminar on Prediction of Earthquake Occurrence and Ground Motion*. Editado por Carlos S. Oliveira Lisboa. pp. 705–720.
- Tiedemann, H., 1992.  
**Earthquakes and volcanic eruptions: A handbook on risk assessment.** Swiss Reinsurance Company, Zurique, Suíça.
- Trifunac, M.D. & Brady, A.G., 1975.  
**On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion.** *BSSA*, **65**: 139-162.
- Trifunac, M.D. & Lee, V.W., 1989.  
**Empirical models for scaling pseudo relative velocity spectra of strong earthquake accelerations in terms of magnitude, distance, site intensity and recording site conditions.** *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **8**, nº 3. Elsevier Publishers Ltd, Los Angeles.
- Tromans, I.J. & Bommer, J.J., 2002.  
**The attenuation of strong-motion peaks in Europe.** *12ECEE*. Londres. Elsevier Science Ltd. Artigo nº 394.
- USGS, 2004.  
**Largest and deadliest earthquakes by year – 1990-2005.** United States Geological Survey (USGS). [http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/byyear.html](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/byyear.html).
- USGS, 2005.  
**Interactive deaggregations, 2002.** United States Geological Survey (USGS). <http://eqint.cr.usgs.gov/eq/html/deagint2002.html>.
- Vaz, C.T., 1997.  
**Estudo dinâmico linear da portaria de S. Vicente de Fora.** Relatório - C3ES. LNEC, Lisboa.
- Vilanova S.P., 2004.  
**Sismicidade e perigosidade sísmica do vale inferior do Tejo.** Tese de Doutoramento em Engenharia Física Tecnológica. IST, UTL. Lisboa.
- Vilanova, S.P. & Fonseca, J.D., 2004.  
**Seismic hazard impact of the Lower Tagus Valley fault zone (SW Iberia).** *Journal of Seismology*, **8**: 331-345.
- Vilanova, S.P., Nunes, C. & Fonseca, J.D., 2003.  
**Lisbon 1755 - a case of triggered onshore rupture?.** *BSSA*, **93**: 2056-2068.
- Vozzone, M., Bilé Serra, J. & Caldeira, L., 2002.  
**Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Fichas e perfis geotécnicos.** Relatório 376/02 – NF. LNEC, Lisboa.

- Wesson, R.L. & Perkins, D.M., 2001.  
**Spatial correlation of probabilistic earthquake ground motion and loss.** *BSSA*, **91**, nº6: 1498-1515.
- Whitman, R.V., 1973.  
**Damage probability matrices for prototype buildings.** Structures Publication nº 380, Department of Civil Engineering, School of Engineering, MIT.
- Whitman, R.V., 1988.  
**Earthquake loss estimation methodology. Earthquake prognostics.** *2nd International Seminar on Hazard Assessment, Risk Evaluation and Damage Prevention.* Andreas Vogel / Klaus Brandes (Eds.), Vieweg. pp. 259-278.
- Whitman R.V., Anagnos, T., Kircher, C.A., Lagorio, H.J., Lawson, R.S. & Schneider, P., 1997.  
**Development of a national earthquake loss estimation methodology.** *Earthquake Spectra*, Vol. 13, **4**: 643-661.
- Yang, Y., Wang, Z., Yang, Y. & Yang, L., 1992.  
**An expert evaluation system for earthquake damage.** *10WCEE.* Madrid. Vol. 10, pp. 6307-6310.
- Yeh, C.H., Jean, W.Y. & Loh, C.H., 2000.  
**Building damage assessment for earthquake loss estimation in Taiwan.** *12WCEE.* Auckland.
- Yépez, F., Barbat, A.H. & Canas, J.A., 1995.  
**Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería.** Monografía CIMNE IS-12. Barcelona.
- Zitellini, N, Chierci, F., Sartori, R. & Torelli, L., 1999.  
**The tectonic source of the 1755 Lisbon earthquake and tsunami.** *Annali Di Geofisica*, **42**, nº 1: 49-55.
- Zitellini, N., Mendes L. A., Cordoba, L. & Bigsets team, 2001.  
**Source of 1755 Lisbon earthquake and tsunami investigated.** *EOS*, **82**, nº 26: 290-291.
- Zonno, G., Cella, F., Luzi, L., Meroni, F., Ober, G., Pergalini, F., Petrini, V., Tomasoni, R., Carrara, P., Musella, D., Garcia-Fernandez, M., Jimenez, M.J., Canas Torres, J.A., Alfaro, A.J., Barbat, A.H., Mena, U., Pujades, L.G., Soeters, R.T., Terlien, T.J., Cherubini, A., Angeletti, P., Di Benedetto, A., Caleffi, M., Wagner, J.J. & Rosset, P., 1999.  
**Assessing seismic risk at different geographical scales: Concepts, tools, and procedures.** *11ECEE.* Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.
- Zuccaro, G. & Papa, F., 2002.  
**Method of seismic vulnerability and exposure assessment at national scale – the Italian case.** *12ECEE.* Londres, Elsevier Science Ltd. Artigo nº 698.

## **ANEXO A**

### **MAPAS DE UNIDADES TERRITORIAIS DE PORTUGAL CONTINENTAL**



## A. MAPAS DE UNIDADES TERRITORIAIS DE PORTUGAL CONTINENTAL

Para facilitar a localização geográfica das parcelas do território Continental mencionadas ao longo do texto, apresenta-se na figura A.1, à esquerda, a divisão deste território em termos do 2º e 3º nível da Nomenclatura de Unidades Territoriais para fins Estatísticos (NUTS II e NUTS III) e, à direita, a divisão administrativa do mesmo território por distritos [INE, 1998]. Neste último mapa também se destacam os concelhos onde se localizam as sedes dos distritos e ainda alguns outros concelhos referidos especificamente neste trabalho.

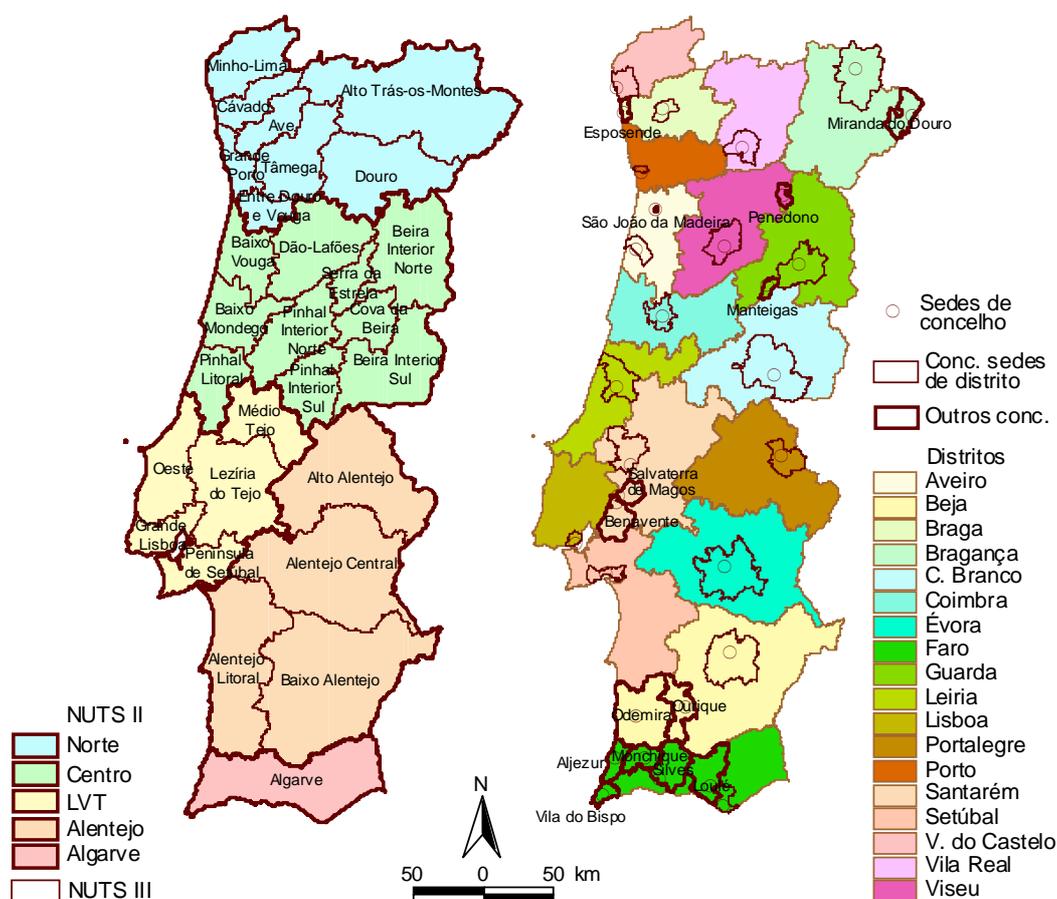


Figura A.1 –Portugal Continental em termos de NUTS II e III (à esquerda), distritos e concelhos mencionados no texto (à direita).

A informação geográfica utilizada neste trabalho teve origem na Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI) do Instituto Nacional de Estatística (INE) [Geirinhas, 2001] tendo sido obtida, juntamente com os apuramentos efectuados nos Censos 2001, por via de um protocolo estabelecido entre esse Instituto e o Observatório das Ciências e do Ensino Superior.

A componente cartográfica foi fornecida em formato digital, em coordenadas militares, com a desagregação espacial máxima da freguesia.



## **ANEXO B**

### **CENÁRIOS DE PERIGOSIDADE SÍSMICA**



## B. CENÁRIOS DE PERIGOSIDADE SÍSMICA

DTCC	Designação	PE = 10% em 10 anos					PE = 10% em 50 anos					PE = 5% em 50 anos				
		$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]
1401	Abrantes	146,5	213,6	4,6	2,75	1,03	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,00	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0101	Águeda	156,5	382,1	3,9	2,25	0,67	67,3	-4,4	8,0	0,25	0,83	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0901	Aguiar da Beira	245,6	421,7	4,1	1,75	3,20	245,6	421,7	5,1	1,75	2,34	245,6	421,7	5,5	1,75	2,22
0701	Alandroal	67,3	-4,4	6,9	0,50	0,62	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0102	Alberg.-a-Velha	156,5	411,8	4,3	1,75	0,61	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0801	Albufeira	67,3	-4,4	6,6	0,25	1,10	67,3	-4,4	7,1	0,75	1,82	67,3	-4,4	7,4	0,75	2,49
1501	Alcácer do Sal	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,6	0,25	1,42	67,3	-4,4	7,7	0,50	2,17
1402	Alcanena	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1001	Alcobaça	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1502	Alcochete	146,5	213,6	4,2	3,00	1,34	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	8,0	0,25	1,70
0802	Alcoutim	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
1101	Alenquer	146,5	213,6	4,2	3,00	1,34	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,9	0,50	1,65
0401	Alfândega da Fé	285,2	471,3	4,1	1,75	2,62	285,2	471,3	4,7	2,00	2,11	285,2	471,3	5,4	1,75	2,17
1701	Alijó	275,3	461,4	4,4	1,75	1,46	275,3	461,4	5,3	1,75	1,28	275,3	461,4	5,7	1,75	1,21
0803	Aljezur	67,3	-4,4	6	0,75	1,62	67,3	-4,4	6,9	0,75	2,39	67,3	-4,4	7,2	0,75	3,27
0201	Aljustrel	67,3	-4,4	6,4	0,75	0,94	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
1503	Almada	67,3	-4,4	6,8	0,50	0,71	67,3	-4,4	7,7	0,25	1,24	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0902	Almeida	245,6	421,7	4,7	1,75	1,01	67,3	-4,4	8,0	0,25	0,83	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1403	Almeirim	146,5	213,6	4,1	3,00	1,67	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
0202	Almodôvar	67,3	-4,4	6,3	0,75	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,25	1,63	67,3	-4,4	7,8	0,25	2,23
1404	Alpiarça	146,5	213,6	4,2	3,00	1,34	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
1201	Alter do Chão	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1002	Alvaiázere	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0203	Alvito	67,3	-4,4	6,7	0,50	0,82	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,9	0,25	1,94
1115	Amadora	106,9	203,7	3,9	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	8,0	0,25	1,70
1301	Amarante	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,4	1,75	1,53	176,3	481,2	5,8	1,75	1,44
0301	Amares	176,3	481,2	4,6	1,75	1,43	176,3	481,2	5,5	1,75	1,26	176,3	481,2	5,9	1,75	1,19
0103	Anadia	176,3	372,2	4,4	1,75	0,99	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1003	Ansião	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1601	Arc. de Valdevez	176,3	481,2	4,5	2,00	0,89	176,3	481,2	5,8	1,75	0,70	67,3	-4,4	8,1	0,75	0,96
0601	Arganil	225,8	372,2	4,6	1,75	0,73	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
1801	Armamar	225,8	471,3	3,9	2,00	1,43	225,8	471,3	4,8	2,00	1,26	225,8	471,3	5,2	2,00	1,19
0104	Arouca	176,3	481,2	4,8	1,75	0,97	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	8,1	0,50	1,26
0702	Arraiolos	215,9	183,9	5,1	1,75	0,81	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	8,0	0,25	1,70
1202	Arronches	67,3	-4,4	6,8	0,75	0,55	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1102	Arr. dos Vinhos	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,8	0,25	1,09	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0105	Aveiro	156,5	411,8	3,5	2,25	0,77	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1203	Avis	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,6	0,50	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1103	Azambuja	146,5	213,6	4,1	3,00	1,67	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,9	0,50	1,65
1302	Baião	176,3	481,2	4,3	2,00	1,32	176,3	481,2	5,6	1,75	1,04	67,3	-4,4	8,0	0,75	1,10
0302	Barcelos	176,3	481,2	4,6	1,75	1,43	176,3	481,2	5,5	1,75	1,26	176,3	481,2	5,5	2,00	1,33
0204	Barrancos	67,3	-4,4	6,7	0,75	0,62	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	8,0	0,25	1,70
1504	Barreiro	67,3	-4,4	6,8	0,50	0,71	67,3	-4,4	7,5	0,50	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
1004	Batalha	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45

DTCC	Designação	PE = 10% em 10 anos					PE = 10% em 50 anos					PE = 5% em 50 anos				
		$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]
0205	Beja	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,4	0,50	1,59	67,3	-4,4	7,7	0,50	2,17
0501	Belmonte	245,6	421,7	4,8	1,75	0,83	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1405	Benavente	146,5	213,6	5,3	1,75	1,30	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,05	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,65
1005	Bombarral	116,8	253,3	3,7	3,00	1,09	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0703	Borba	67,3	-4,4	7,1	0,25	0,56	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1702	Boticas	225,8	520,8	4,1	1,75	2,83	225,8	520,8	5,0	1,75	2,48	225,8	520,8	5,0	2,00	2,63
0303	Braga	176,3	501,0	4,1	1,75	1,89	176,3	481,2	5,4	1,75	1,53	176,3	501,0	5,4	1,75	1,57
0402	Bragança	285,2	510,9	3,9	2,00	1,98	285,2	510,9	5,2	1,75	1,56	285,2	510,9	5,2	2,00	1,65
0304	Cab. de Basto	225,8	520,8	4,3	1,75	1,92	225,8	520,8	5,2	1,75	1,69	225,8	520,8	5,2	2,00	1,78
1104	Cadaval	116,8	253,3	3,7	3,00	1,09	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1006	Caldas da Rainha	116,8	253,3	3,8	3,00	0,88	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1602	Caminha	136,6	540,7	4	1,75	2,29	136,6	540,7	4,9	1,75	2,01	136,6	540,7	5,3	1,75	1,90
1204	Campo Maior	67,3	-4,4	6,8	0,75	0,55	67,3	-4,4	7,8	0,25	1,09	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0602	Cantanhede	156,5	382,1	4	2,00	1,16	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0403	Carr. de Ansiães	275,3	461,4	4,2	1,75	2,15	275,3	461,4	5,1	1,75	1,89	275,3	461,4	5,1	2,00	2,00
1802	Carregal do Sal	215,9	392,0	4,3	1,75	1,29	215,9	392,0	5,3	1,75	0,95	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1406	Cartaxo	146,5	213,6	4,1	3,00	1,67	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
1105	Cascais	67,3	-4,4	6,8	0,50	0,71	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,8	0,50	1,89
1007	Cast. de Pêra	146,5	213,6	4,9	2,75	0,53	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0502	Castelo Branco	67,3	-4,4	6,9	0,75	0,48	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0106	Castelo de Paiva	176,3	481,2	4,6	1,75	1,43	176,3	481,2	5,2	2,00	1,16	67,3	-4,4	8,3	0,25	1,13
1205	Castelo de Vide	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
1803	Castro Daire	245,6	421,7	4,6	1,75	1,22	245,6	421,7	5,6	1,75	0,89	67,3	-4,4	8,1	0,50	1,26
0804	Castro Marim	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0206	Castro Verde	67,3	-4,4	6,7	0,25	0,96	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
0903	Celorico da Beira	245,6	421,7	4	2,00	1,99	245,6	421,7	5,0	2,00	1,46	245,6	421,7	5,4	2,00	1,38
0305	Celorico de Basto	176,3	481,2	4,6	1,75	1,43	176,3	481,2	5,5	1,75	1,26	176,3	481,2	5,9	1,75	1,19
1407	Chamusca	146,5	213,6	4,2	3,00	1,34	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
1703	Chaves	225,8	520,8	4	2,00	1,77	225,8	520,8	4,9	2,00	1,55	225,8	520,8	5,6	1,75	1,60
1804	Cinfães	176,3	481,2	4,7	1,75	1,18	176,3	481,2	5,6	1,75	1,04	67,3	-4,4	8,0	0,75	1,10
0603	Coimbra	176,3	372,2	3,8	2,25	0,83	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
0604	Condeixa-a-Nova	166,4	342,4	4,1	2,00	0,95	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1408	Constância	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1409	Coruche	146,5	213,6	4	3,00	2,08	67,3	-4,4	7,6	0,50	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0503	Covilhã	225,8	372,2	4,2	2,00	0,81	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
1206	Crato	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,9	0,50	1,65
0207	Cuba	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,9	0,25	1,94
1207	Elvas	67,3	-4,4	6,8	0,75	0,55	67,3	-4,4	7,6	0,50	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1410	Entroncamento	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0107	Espinho	176,3	481,2	4,7	1,75	1,18	176,3	481,2	5,7	1,75	0,85	67,3	-4,4	8,3	0,25	1,13
0306	Esposende	176,3	481,2	4,7	1,75	1,18	176,3	481,2	5,6	1,75	1,04	67,3	-4,4	8,2	0,50	1,10
0108	Estarreja	156,5	411,8	3,9	2,00	0,72	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0704	Estremoz	67,3	-4,4	6,8	0,75	0,55	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0705	Évora	215,9	183,9	5	1,75	0,99	67,3	-4,4	7,7	0,25	1,24	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0307	Fafe	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,4	1,75	1,53	176,3	481,2	5,4	2,00	1,61
0805	Faro	67,3	-4,4	6,4	0,75	0,94	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
1303	Felgueiras	176,3	481,2	4	2,00	2,36	176,3	481,2	5,3	1,75	1,85	176,3	481,2	5,3	2,00	1,96

DTCC	Designação	PE = 10% em 10 anos					PE = 10% em 50 anos					PE = 5% em 50 anos				
		$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]
0208	Ferr. do Alentejo	67,3	-4,4	6,6	0,50	0,94	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
1411	Ferreira do Zêzere	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0605	Figueira da Foz	146,5	352,4	3,8	2,25	0,83	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
0904	Fig. de Cast.Rod.	275,3	461,4	4,4	1,75	1,46	275,3	461,4	5,0	2,00	1,18	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1008	Fig. dos Vinhos	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0905	F. de Algodres	245,6	421,7	4,3	1,75	2,17	245,6	421,7	5,3	1,75	1,59	245,6	421,7	5,7	1,75	1,51
0404	F. de Esp. à Cinta	285,2	471,3	3,9	2,00	1,98	285,2	471,3	5,2	1,75	1,56	285,2	471,3	5,6	1,75	1,47
1208	Fronteira	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,8	0,25	1,09	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0504	Fundão	255,5	342,4	3,9	2,00	0,72	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1209	Gavião	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0606	Góis	225,8	372,2	4,8	1,75	0,49	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1412	Golegã	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1304	Gondomar	176,3	481,2	4,4	1,75	2,11	176,3	481,2	5,0	2,00	1,70	176,3	481,2	5,7	1,75	1,75
0906	Gouveia	245,6	421,7	4,6	1,75	1,22	245,6	421,7	5,6	1,75	0,89	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1505	Grândola	67,3	-4,4	6,4	0,75	0,94	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
0907	Guarda	245,6	421,7	4,6	1,75	1,22	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0308	Guimarães	176,3	481,2	4,4	1,75	2,11	176,3	481,2	5,3	1,75	1,85	176,3	481,2	5,6	1,75	2,13
0505	Idanha-a-Nova	67,3	-4,4	6,9	0,75	0,48	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0110	Ílhavo	156,5	382,1	4,5	1,75	0,81	67,3	-4,4	8,0	0,25	0,83	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0806	Lagoa	67,3	-4,4	6,5	0,25	1,26	67,3	-4,4	7,0	0,75	2,09	67,3	-4,4	7,5	0,50	2,85
0807	Lagos	67,3	-4,4	6,2	0,50	1,61	67,3	-4,4	6,9	0,75	2,39	67,3	-4,4	7,6	0,25	2,92
1805	Lamego	225,8	471,3	4,2	1,75	1,55	225,8	471,3	5,1	1,75	1,36	225,8	471,3	5,5	1,75	1,29
1009	Leiria	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1106	Lisboa	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,8	0,50	1,89
0808	Loulé	67,3	-4,4	6,3	0,75	1,08	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
1107	Loures	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1108	Lourinhã	116,8	253,3	3,9	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0607	Lousã	166,4	342,4	4,4	2,00	0,51	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1305	Lousada	176,3	481,2	3,9	2,00	2,86	176,3	481,2	4,8	2,00	2,51	176,3	481,2	5,5	1,75	2,58
1413	Mação	146,5	213,6	5	2,50	0,75	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0405	M. de Cavaleiros	285,2	510,9	3,9	1,75	3,85	285,2	510,9	4,8	1,75	3,38	285,2	510,9	5,2	1,75	3,20
1109	Mafra	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,6	0,50	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1306	Maia	176,3	481,2	4,4	1,75	2,11	176,3	481,2	5,3	1,75	1,85	176,3	481,2	5,7	1,75	1,75
1806	Mangualde	245,6	421,7	4,5	1,75	1,48	245,6	421,7	5,5	1,75	1,08	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0908	Manteigas	225,8	382,1	4,5	1,75	0,88	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1307	M. de Canaveses	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,4	1,75	1,53	176,3	481,2	5,8	1,75	1,44
1010	Marinha Grande	146,5	213,6	5,1	2,50	0,60	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1210	Marvão	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
1308	Matosinhos	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,5	1,75	1,26	176,3	481,2	5,5	2,00	1,33
0111	Mealhada	176,3	372,2	4,3	1,75	1,22	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0909	Meda	275,3	461,4	4,2	1,75	2,15	275,3	461,4	4,8	2,00	1,74	275,3	461,4	5,5	1,75	1,79
1603	Melgaço	196,1	570,4	3,8	1,75	1,12	196,1	570,4	4,7	1,75	0,99	67,3	-4,4	8,1	0,75	0,96
0209	Mértola	67,3	-4,4	6,8	0,25	0,84	67,3	-4,4	7,4	0,50	1,59	67,3	-4,4	7,7	0,50	2,17
1704	Mesão Frio	225,8	471,3	4,1	1,75	1,89	225,8	471,3	5,0	1,75	1,66	225,8	471,3	5,4	1,75	1,57
0608	Mira	156,5	382,1	4,3	1,75	1,22	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0609	Miranda do Corvo	166,4	342,4	4,6	1,75	0,66	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
0406	Miranda do Douro	364,5	530,7	3,9	1,75	1,93	364,5	530,7	4,9	1,75	1,39	364,5	530,7	5,3	1,75	1,32

DTCC	Designação	PE = 10% em 10 anos					PE = 10% em 50 anos					PE = 5% em 50 anos				
		$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]
0407	Mirandela	285,2	510,9	3,6	2,00	3,55	285,2	510,9	4,9	1,75	2,79	285,2	510,9	4,9	2,00	2,95
0408	Mogadouro	315,0	501,0	3,9	1,75	1,93	315,0	501,0	4,5	2,00	1,56	315,0	501,0	5,2	1,75	1,60
1807	M.da Beira	245,6	421,7	4,1	2,00	1,65	245,6	421,7	5,4	1,75	1,31	245,6	421,7	5,8	1,75	1,25
1506	Moita	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,5	0,50	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
1604	Monção	136,6	540,7	4,5	1,75	0,87	136,6	540,7	5,1	2,00	0,70	67,3	-4,4	8,1	0,75	0,96
0809	Monchique	67,3	-4,4	6,1	0,75	1,41	67,3	-4,4	7,0	0,75	2,09	67,3	-4,4	7,3	0,75	2,85
1705	Mondim de Basto	225,8	520,8	4,5	1,75	1,30	225,8	520,8	5,4	1,75	1,14	225,8	520,8	5,4	2,00	1,21
1211	Monforte	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,8	0,25	1,09	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1706	Montalegre	225,8	520,8	3,8	2,00	2,60	225,8	520,8	4,7	2,00	2,29	225,8	520,8	5,4	1,75	2,35
0706	Mont.-o-Novo	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,5	0,50	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0610	Mont.-o-Velho	146,5	352,4	4,1	2,00	0,95	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
1507	Montijo	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0707	Mora	146,5	213,6	4,8	2,50	1,16	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1808	Mortágua	176,3	372,2	4,5	1,75	0,81	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0210	Moura	67,3	-4,4	6,6	0,75	0,72	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0708	Mourão	67,3	-4,4	6,7	0,75	0,62	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,8	0,50	1,89
1707	Murça	255,5	501,0	4	1,75	1,59	255,5	501,0	4,9	1,75	1,39	255,5	501,0	4,9	2,00	1,47
0112	Murtosa	156,5	411,8	3,5	2,25	0,77	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1011	Nazaré	146,5	213,6	4,5	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1809	Nelas	215,9	392,0	4,3	1,75	1,29	215,9	392,0	5,3	1,75	0,95	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1212	Nisa	146,5	213,6	4,8	2,75	0,66	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1012	Óbidos	106,9	263,2	3,6	3,00	0,90	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0211	Odemira	67,3	-4,4	6,5	0,25	1,26	67,3	-4,4	7,0	0,75	2,09	67,3	-4,4	7,3	0,75	2,85
1116	Odivelas	106,9	203,7	3,9	3,00	0,70	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1110	Oeiras	67,3	-4,4	6,8	0,50	0,71	67,3	-4,4	7,7	0,25	1,24	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0506	Oleiros	215,9	332,5	4,4	1,75	0,53	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0810	Olhão	67,3	-4,4	6,4	0,75	0,94	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,7	0,50	2,17
0113	Oliv. de Azeméis	176,3	481,2	4,9	1,75	0,80	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1810	Oliveira de Frades	206,0	421,7	3,9	2,00	0,72	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0114	Oliveira do Bairro	156,5	382,1	3,8	2,25	0,83	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0611	Oliv. do Hospital	225,8	382,1	4,3	1,75	1,29	225,8	382,1	5,3	1,75	0,95	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1421	Ourém	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0212	Ourique	67,3	-4,4	6,3	0,75	1,08	67,3	-4,4	7,1	0,75	1,82	67,3	-4,4	7,4	0,75	2,49
0115	Ovar	176,3	481,2	4,6	2,00	0,74	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1309	Paços de Ferreira	176,3	481,2	3,8	2,00	3,47	176,3	481,2	4,7	2,00	3,05	176,3	481,2	5,4	1,75	3,13
1508	Palmela	67,3	-4,4	6,6	0,75	0,72	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0612	Pampil. da Serra	215,9	332,5	4,4	1,75	0,53	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1310	Paredes	176,3	481,2	3,9	2,00	2,86	176,3	481,2	5,2	1,75	2,25	176,3	481,2	5,2	2,00	2,38
1605	Paredes de Coura	136,6	540,7	4	2,00	1,18	136,6	540,7	5,3	1,75	0,93	136,6	540,7	5,3	2,00	0,98
1013	Pedrógão Grande	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0613	Penacova	176,3	372,2	4,4	1,75	0,99	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
1311	Penafiel	176,3	481,2	4,3	1,75	2,56	176,3	481,2	5,2	1,75	2,25	176,3	481,2	5,6	1,75	2,13
1811	Penalva do Cast.	245,6	421,7	4,3	1,75	2,17	245,6	421,7	5,3	1,75	1,59	245,6	421,7	5,7	1,75	1,51
0507	Penamacor	245,6	421,7	5,1	1,75	0,47	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1812	Penedono	275,3	461,4	4,3	1,75	1,78	275,3	461,4	5,2	1,75	1,56	275,3	461,4	5,6	1,75	1,47
0614	Penela	166,4	342,4	4,2	2,00	0,77	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44
1014	Peniche	106,9	263,2	3,8	3,00	0,58	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45

DTCC	Designação	PE = 10% em 10 anos					PE = 10% em 50 anos					PE = 5% em 50 anos				
		$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%o]
1708	Peso da Régua	225,8	471,3	4,1	1,75	1,89	225,8	471,3	5,0	1,75	1,66	225,8	471,3	5,4	1,75	1,57
0910	Pinhel	245,6	421,7	4,6	1,75	1,22	245,6	421,7	5,6	1,75	0,89	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1015	Pombal	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1606	Ponte da Barca	176,3	481,2	4,8	1,75	0,97	176,3	481,2	5,7	1,75	0,85	67,3	-4,4	8,1	0,75	0,96
1607	Ponte de Lima	136,6	540,7	4,4	1,75	1,05	136,6	540,7	5,3	1,75	0,93	67,3	-4,4	8,1	0,75	0,96
1213	Ponte de Sor	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1214	Portalegre	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,9	0,50	1,65
0709	Portel	67,3	-4,4	6,6	0,75	0,72	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0811	Portimão	67,3	-4,4	6,1	0,75	1,41	67,3	-4,4	7,0	0,75	2,09	67,3	-4,4	7,3	0,75	2,85
1312	Porto	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,4	1,75	1,53	176,3	481,2	5,8	1,75	1,44
1016	Porto de Mós	146,5	213,6	4,7	2,75	0,83	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0309	Póvoa de Lanhoso	176,3	481,2	4,2	2,00	1,60	176,3	481,2	5,1	2,00	1,40	176,3	481,2	5,8	1,75	1,44
1313	Póvoa de Varzim	176,3	481,2	4,2	2,00	1,60	176,3	481,2	5,5	1,75	1,26	176,3	481,2	5,9	1,75	1,19
0508	Proença-a-Nova	206,0	302,8	4,6	1,75	0,73	67,3	-4,4	7,9	0,25	0,95	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0710	Redondo	67,3	-4,4	6,7	0,75	0,62	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0711	Reg. de Monsaraz	67,3	-4,4	7	0,25	0,64	67,3	-4,4	7,7	0,25	1,24	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
1813	Resende	225,8	471,3	4,3	1,75	1,28	225,8	471,3	5,2	1,75	1,12	67,3	-4,4	8,0	0,75	1,10
1709	Ribeira de Pena	225,8	520,8	3,8	2,00	2,60	225,8	520,8	4,7	2,00	2,29	225,8	520,8	5,4	1,75	2,35
1414	Rio Maior	146,5	213,6	4,6	2,75	1,03	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1710	Sabrosa	245,6	471,3	3,7	2,00	1,46	245,6	471,3	4,6	2,00	1,28	245,6	471,3	5,3	1,75	1,32
0911	Sabugal	245,6	421,7	4,9	1,75	0,68	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
1415	Salv. de Magos	146,5	213,6	4	3,00	2,08	146,5	213,6	5,0	3,00	1,18	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1814	Santa Comba Dão	215,9	392,0	4,5	1,75	0,88	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0109	Sta Maria da Feira	176,3	481,2	4,8	1,75	0,97	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	8,1	0,50	1,26
1711	Sta M. de Penag.	225,8	471,3	3,7	2,00	2,11	225,8	471,3	4,6	2,00	1,85	225,8	471,3	5,3	1,75	1,90
1416	Santarém	146,5	213,6	4,2	3,00	1,34	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	8,1	0,25	1,48
1509	Sant. do Cacém	67,3	-4,4	6,3	0,75	1,08	67,3	-4,4	7,1	0,75	1,82	67,3	-4,4	7,4	0,75	2,49
1314	Santo Tirso	176,3	481,2	4,2	1,75	3,11	176,3	481,2	5,1	1,75	2,73	176,3	481,2	5,5	1,75	2,58
0812	S. B. de Alportel	67,3	-4,4	6,4	0,75	0,94	67,3	-4,4	7,2	0,75	1,59	67,3	-4,4	7,5	0,75	2,17
0116	S. J. da Madeira	176,3	481,2	4,8	1,75	0,97	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1815	S. J. da Pesqueira	275,3	461,4	4,2	1,75	2,15	275,3	461,4	5,1	1,75	1,89	275,3	461,4	5,5	1,75	1,79
1816	São Pedro do Sul	206,0	421,7	4,1	1,75	0,92	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1417	Sardoal	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1817	Sátão	245,6	421,7	3,9	2,00	2,42	245,6	421,7	5,2	1,75	1,93	245,6	421,7	5,6	1,75	1,83
0912	Seia	225,8	382,1	4,3	1,75	1,29	225,8	382,1	5,3	1,75	0,95	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1510	Seixal	67,3	-4,4	6,6	0,75	0,72	67,3	-4,4	7,5	0,50	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
1818	Sernancelhe	245,6	421,7	4,3	1,75	2,17	245,6	421,7	5,2	1,75	1,93	245,6	421,7	5,6	1,75	1,83
0213	Serpa	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0509	Sertã	206,0	302,8	4,6	1,75	0,73	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1511	Sesimbra	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,6	0,25	1,42	67,3	-4,4	7,7	0,50	2,17
1512	Setúbal	67,3	-4,4	6,6	0,75	0,72	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0117	Sever do Vouga	176,3	481,2	5,1	1,75	0,54	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0813	Silves	67,3	-4,4	6,2	0,75	1,23	67,3	-4,4	7,0	0,75	2,09	67,3	-4,4	7,5	0,50	2,85
1513	Sines	67,3	-4,4	6,6	0,25	1,10	67,3	-4,4	7,1	0,75	1,82	67,3	-4,4	7,4	0,75	2,49
1111	Sintra	67,3	-4,4	6,7	0,75	0,62	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1112	S. de Mte Agraço	106,9	233,4	3,8	3,00	0,88	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0615	Soure	166,4	342,4	4,5	1,75	0,81	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,0	0,50	1,44

DTCC	Designação	PE = 10% em 10 anos					PE = 10% em 50 anos					PE = 5% em 50 anos				
		$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%]	$\hat{X}$ [km]	$\hat{Y}$ [km]	$\hat{M}$	$\hat{E}$	cont. [%]
1215	Sousel	235,7	223,5	4,7	1,75	0,60	67,3	-4,4	7,6	0,50	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0616	Tábua	225,8	382,1	4,5	1,75	0,88	67,3	-4,4	7,8	0,50	0,92	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1819	Tabuaço	245,6	471,3	4,1	1,75	1,31	275,3	461,4	5,4	1,75	1,06	67,3	-4,4	8,0	0,75	1,10
1820	Tarouca	245,6	421,7	4,6	1,75	1,22	245,6	421,7	5,5	1,75	1,08	67,3	-4,4	8,0	0,75	1,10
0814	Tavira	67,3	-4,4	6,8	0,25	0,84	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0310	Terras de Bouro	176,3	481,2	4,7	1,75	1,18	176,3	481,2	5,6	1,75	1,04	67,3	-4,4	8,4	0,25	0,99
1418	Tomar	146,5	213,6	4,4	3,00	0,87	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1821	Tondela	215,9	392,0	4	2,00	1,19	215,9	392,0	5,0	2,00	0,87	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0409	T. de Moncorvo	285,2	471,3	3,6	2,00	3,55	285,2	471,3	4,9	1,75	2,79	285,2	471,3	4,9	2,00	2,95
1419	Torres Novas	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1113	Torres Vedras	106,9	233,4	3,8	3,00	0,88	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,9	0,50	1,65
0913	Trancoso	245,6	421,7	4,3	1,75	2,17	245,6	421,7	5,3	1,75	1,59	245,6	421,7	5,7	1,75	1,51
1318	Trofa	176,3	481,2	3,9	2,00	2,86	176,3	481,2	5,2	1,75	2,25	176,3	481,2	5,2	2,00	2,38
0118	Vagos	156,5	382,1	4,1	2,00	0,95	67,3	-4,4	8,0	0,25	0,83	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0119	Vale de Cambra	176,3	481,2	4,9	1,75	0,80	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
1608	Valença	136,6	540,7	4,3	1,75	1,28	136,6	540,7	5,3	1,75	0,93	136,6	540,7	5,3	2,00	0,98
1315	Valongo	176,3	481,2	4,3	1,75	2,56	176,3	481,2	5,2	1,75	2,25	176,3	481,2	5,6	1,75	2,13
1712	Valpaços	285,2	510,9	4,1	1,75	2,62	285,2	510,9	5,0	1,75	2,30	285,2	510,9	5,0	2,00	2,43
0712	Vendas Novas	146,5	213,6	4,2	3,00	1,34	67,3	-4,4	7,7	0,25	1,24	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0713	Viana do Alentejo	67,3	-4,4	6,6	0,75	0,72	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
1609	Viana do Castelo	136,6	540,7	4,2	1,75	1,55	136,6	540,7	4,8	2,00	1,26	136,6	540,7	5,5	1,75	1,29
0214	Vidigueira	67,3	-4,4	6,9	0,25	0,73	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0311	Vieira do Minho	225,8	520,8	4,4	1,75	1,58	225,8	520,8	5,3	1,75	1,39	225,8	520,8	5,3	2,00	1,47
0510	Vila de Rei	206,0	302,8	4,6	1,75	0,73	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0815	Vila do Bispo	67,3	-4,4	5,9	0,75	1,85	67,3	-4,4	6,8	0,75	2,74	67,3	-4,4	7,1	0,75	3,74
1316	Vila do Conde	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,5	1,75	1,26	176,3	481,2	5,5	2,00	1,33
0410	Vila Flor	285,2	471,3	3,7	2,00	2,92	285,2	471,3	5,0	1,75	2,30	285,2	471,3	5,0	2,00	2,43
1114	V. Franca de Xira	146,5	213,6	4,4	2,75	1,59	67,3	-4,4	7,8	0,25	1,09	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
1420	V. N. Barquinha	146,5	213,6	4,3	3,00	1,08	67,3	-4,4	7,5	0,75	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
1610	V. N. Cerveira	136,6	540,7	3,8	2,00	1,74	136,6	540,7	5,1	1,75	1,36	136,6	540,7	5,5	1,75	1,29
0312	V. N. Famalicão	176,3	481,2	4,3	1,75	2,56	176,3	481,2	4,9	2,00	2,07	176,3	481,2	5,6	1,75	2,13
0914	V. N. de Foz Côa	275,3	461,4	3,7	2,00	2,92	275,3	461,4	5,0	1,75	2,30	275,3	461,4	5,0	2,00	2,43
1317	V. N. de Gaia	176,3	481,2	4,5	1,75	1,74	176,3	481,2	5,1	2,00	1,40	176,3	481,2	5,5	2,00	1,33
1822	V. N. de Paiva	245,6	421,7	4,3	1,75	2,17	245,6	421,7	4,9	2,00	1,77	245,6	421,7	5,3	2,00	1,68
0617	V. N. de Poiães	176,3	372,2	4,2	2,00	0,77	67,3	-4,4	7,6	0,75	0,92	67,3	-4,4	8,2	0,25	1,29
1713	V. P. de Aguiar	225,8	520,8	4,3	1,75	1,92	225,8	520,8	5,2	1,75	1,69	225,8	520,8	5,2	2,00	1,78
1714	Vila Real	225,8	471,3	3,8	2,00	1,74	225,8	471,3	5,1	1,75	1,36	225,8	471,3	5,1	2,00	1,44
0816	V. R. de Sto Ant.	67,3	-4,4	6,5	0,75	0,82	67,3	-4,4	7,3	0,75	1,39	67,3	-4,4	7,6	0,75	1,90
0511	V. V. de Ródão	146,5	213,6	4,6	3,00	0,56	67,3	-4,4	7,7	0,50	1,06	67,3	-4,4	7,8	0,75	1,45
0313	Vila Verde	176,3	481,2	4,3	2,00	1,32	176,3	481,2	5,2	2,00	1,16	176,3	481,2	5,9	1,75	1,19
0714	Vila Viçosa	67,3	-4,4	7,1	0,25	0,56	67,3	-4,4	7,4	0,75	1,21	67,3	-4,4	7,7	0,75	1,66
0411	Vímioso	315,0	501,0	3,9	1,75	1,93	315,0	501,0	4,9	1,75	1,39	315,0	501,0	5,3	1,75	1,32
0412	Vinhais	285,2	510,9	4,2	1,75	2,15	285,2	510,9	5,1	1,75	1,89	285,2	510,9	5,5	1,75	1,79
1823	Viseu	245,6	421,7	4,3	2,00	1,12	245,6	421,7	5,6	1,75	0,89	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26
0314	Vizela	176,3	481,2	3,9	2,00	2,86	176,3	481,2	4,8	2,00	2,51	176,3	481,2	5,5	1,75	2,58
1824	Vouzela	206,0	421,7	3,5	2,25	0,77	67,3	-4,4	7,7	0,75	0,81	67,3	-4,4	7,9	0,75	1,26

## **ANEXO C**

### **PARÂMETROS DOS MODELOS DE DANOS**



## C. PARÂMETROS DOS MODELOS DE DANOS

### C.1. Modelo de danos FEMA & NIBS aplicado a Portugal Continental

A título meramente informativo, representam-se nas figuras C.1 e C.2 os parâmetros que permitem construir as curvas de capacidade e de fragilidade do modelo de danos FEMA & NIBS [1999] e que foram adaptados por Campos Costa *et al.* [2005] ao parque habitacional de Portugal Continental, apurado nos Censos 2001.

Nestas figuras as tipologias são identificadas pela numeração que consta do quadro 5.3, em que os primeiros quatro conjuntos de sete tipologias (1 a 28) são representativos de estruturas de alvenaria e os três últimos conjuntos de tipologias (29 a 49) são representativos de estruturas de betão armado. As cores exibidas nas figuras identificam conjuntos de sete tipologias pertencentes a classes de vulnerabilidade com parâmetros comuns, ou seja, a cor de um dado conjunto de sete tipologias repete a anterior se os parâmetros forem iguais.

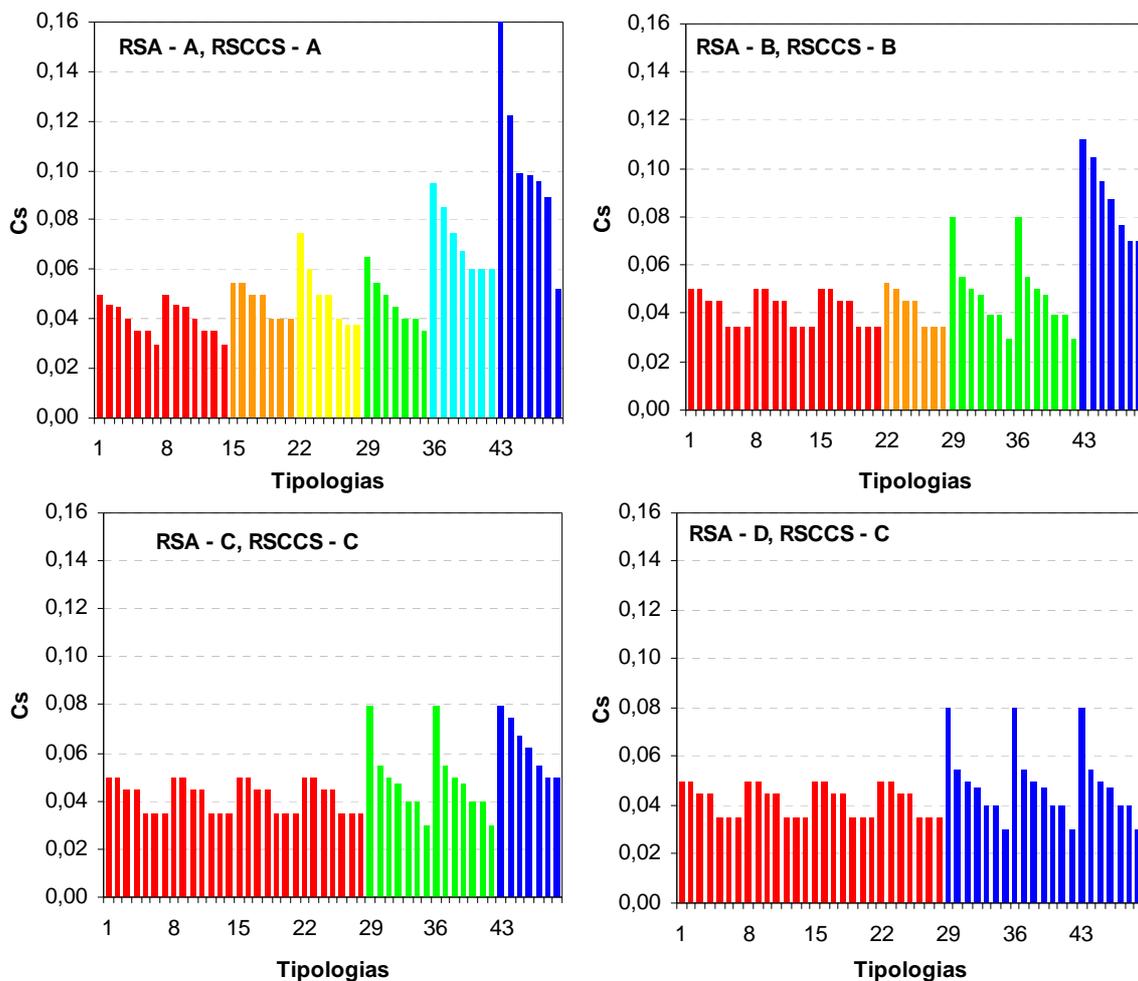


Figura C.1 – Parâmetros das curvas de capacidade do modelo de danos FEMA & NIBS [gráfico do quadrante superior esquerdo em Campos Costa *et al.*, 2005].

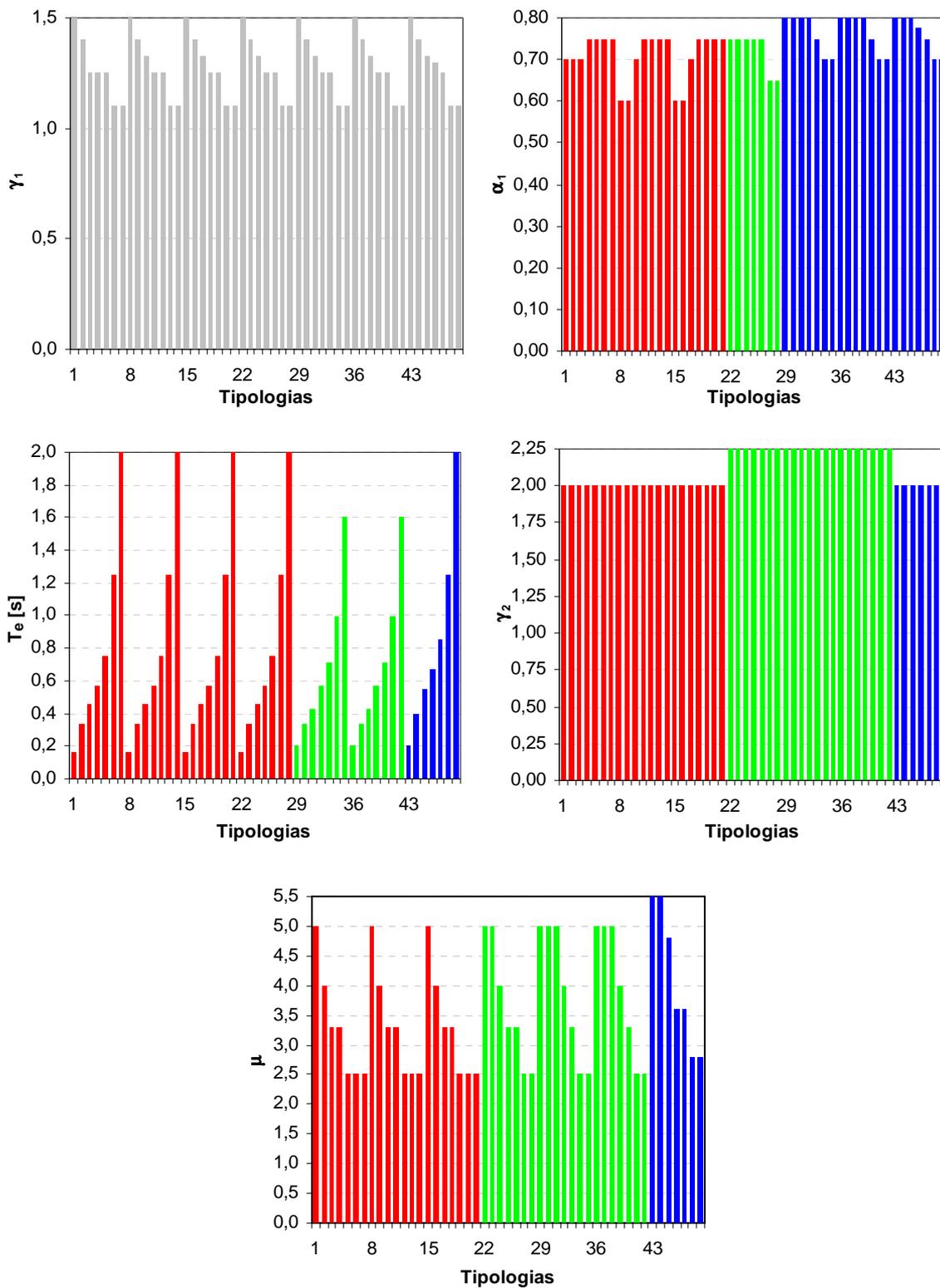


Figura C.1 (cont.) – Parâmetros das curvas de capacidade do modelo de danos FEMA & NIBS [Campos Costa et al., 2005].

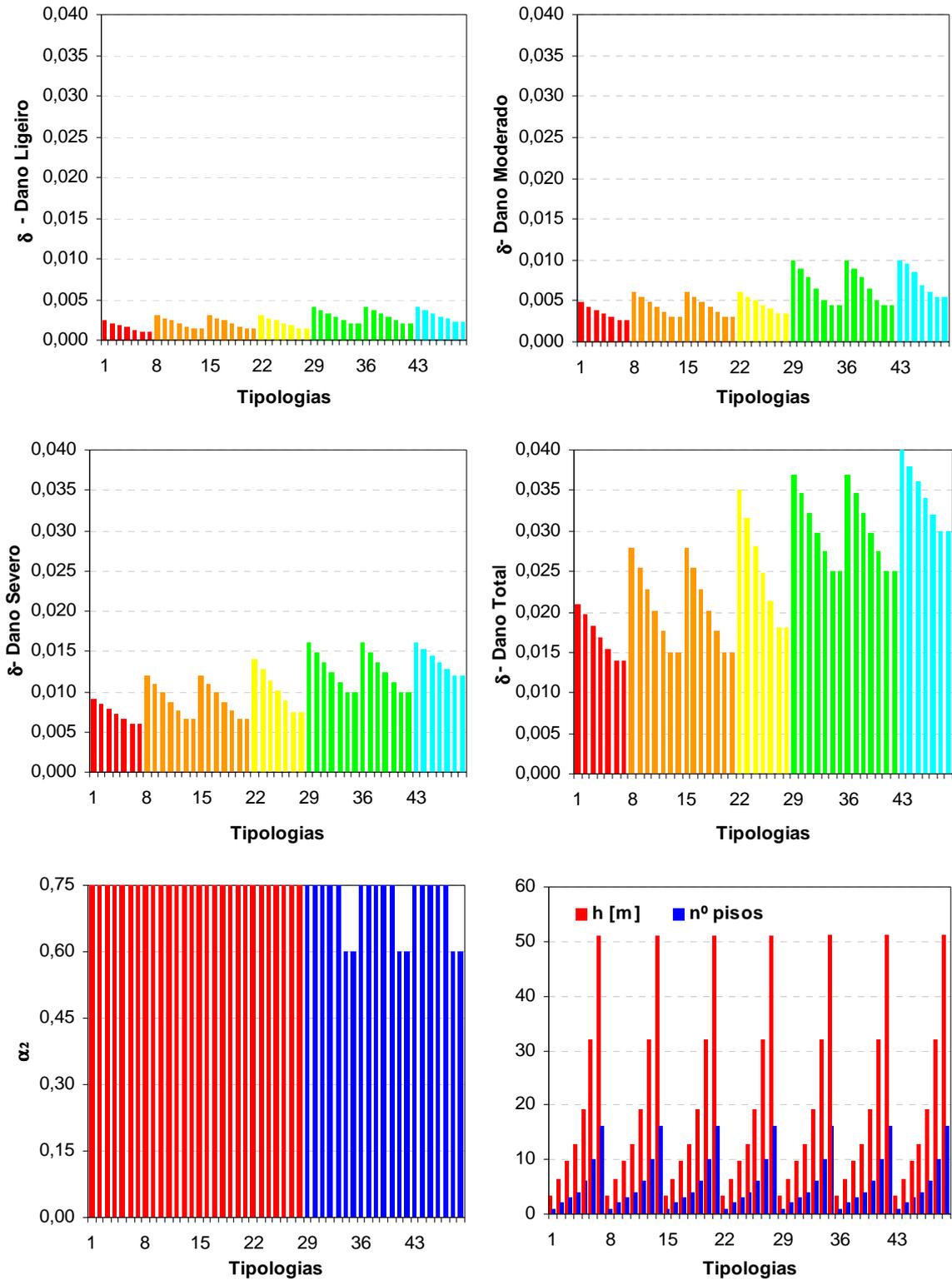


Figura C.2 – Parâmetros das curvas de fragilidade do modelo de danos FEMA & NIBS [Campos Costa et al., 2005].

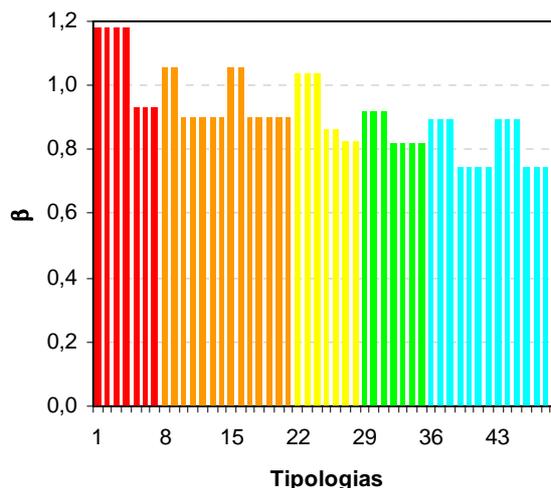


Figura C.2 (cont.) – Parâmetros das curvas de fragilidade do modelo de danos FEMA & NIBS [Campos Costa et al., 2005].

### C.2. Modelo de danos Giovinazzi & Lagomarsino

Quadro C.1 – Classificação das modalidades da variável Necessidade de reparações na estrutura dos edifícios apurada nos Censos 2001 de acordo com o estado de conservação do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004].

Necessidade de reparações na estrutura [INE, 2001b]		Estado de conservação Giovinazzi & Lagomarsino [2003 e 2004].
Nenhumas	--	Bom
Pequenas	Pequenas fissuras ocorrendo apenas em poucos locais; Estruturas de madeira com alguma deterioração em poucos locais.	
Médias	Pequenas fissuras frequentes; Descasque em recobrimento de BA; Ocorrência pontual de sinais de corrosão em elementos de BA ou de estrutura metálica; Pavimentos com deformações notórias; Estruturas de madeira apodrecidas e /ou com ataque biológico (térmitas ou caruncho).	Mau
Grandes	Fendilhação de média espessura em alguns pontos do edifício; Parede deformada ou desaprumada no interior do edifícios; áreas com armaduras à vista e com corrosão; Elementos de estrutura metálica muito corroídos ou em perigo de rotura (escadas de serviço ou marquises com acesso vedado).	
Muito Grandes	Ocorrência de assentamentos diferenciais das fundações (aberturas de portas e janelas distorcidas); Estrutura de fachada desaprumada ou fissuração > 5 mm em mais de um local; Pilares desaprumados ou vigas ou lajes com deformação elevada; Fendilhação grande em elementos de betão armado e em mais de um local.	

Quadro C.2 – Valores dos índices de vulnerabilidade de Giovinazzi & Lagomarsino [2003] para estruturas de alvenaria existentes no parque habitacional de Portugal Continental.

Tipo de estrutura	$V_I^*$	$V_{Imin}$	$V_{Imax}$	Estado conservação	$\Delta V_m$				$\bar{V}_I$			
					1 a 2	3 a 4	+ de 4		1 a 2	3 a 4	5 a 7	+ de 7
Alvenaria de pedra irregular e solta	0,873	0,62	1,02	Bom	-0,04	0,00	0,04		0,833	0,873	0,913	
				Mau	0,04	0,08	0,12	0,913	0,953	0,993		
Adobe	0,840	0,62	1,02	Bom	-0,04	0,00	0,04		0,800	0,840	0,880	
				Mau	0,04	0,08	0,12	0,880	0,920	0,960		
Alvenaria de pedra (aparelhada)	0,740	0,46	1,02	Bom	-0,04	0,00	0,04		0,700	0,740	0,780	
				Mau	0,04	0,08	0,12	0,780	0,820	0,860		
Alvenaria não reforçada de tijolo / blocos de betão	0,740	0,46	1,02	Bom	-0,04	0,00	0,04		0,700	0,740	0,780	
				Mau	0,04	0,08	0,12	0,780	0,820	0,860		
Alvenaria não reforçada com placa	0,616	0,30	0,86	Bom	-0,04	0,00	0,04		0,576	0,616	0,656	
				Mau	0,04	0,08	0,12	0,656	0,696	0,736		
Alvenaria reforçada ou confinada	0,451	0,14	0,70	Bom	-0,04	0,00	--		0,411	0,451	--	
				Mau	0,04	0,08	--	0,491	0,531	--		

Quadro C.3 – Valores do índice de vulnerabilidade adaptados de Giovinazzi & Lagomarsino [2003] para estruturas de betão armado e metálicas existentes no parque habitacional de Portugal Continental.

Tipo de estrutura	$V_I^*$	$V_{Imin}$	$V_{Imax}$	Estado cons.	$\Delta V_m$								$\bar{V}_I$			
					1 a 2	3 a 4	5 a 7	8 a 15	+ 15	1 a 2	3 a 4	5 a 7	8 a 15	+ 15		
Pórtico BA s/ DSR ou DSR mín.	0,644	0,30	1,02	Bom	-0,04	0,00	0,03	0,05	--	0,604	0,644	0,674	0,694	--		
				Mau	0,00	0,04	0,07	0,09	--	0,644	0,684	0,714	0,734	--		
Pórtico BA com DSR moderado	0,447	0,14	0,86	Bom	-0,04	0,00	0,02	--	--	0,407	0,447	0,467	--	--		
				Mau	-0,02	0,02	0,04	--	--	0,427	0,467	0,487	--	--		
Parede BA com DSR moderado	0,384	0,14	0,70	Bom	--	--	--	0,04	0,06	--	--	--	0,424	0,444		
				Mau	--	--	--	0,06	0,08	--	--	--	0,444	0,464		

### C.3. Modelo de danos Di Pasquale & Orsini

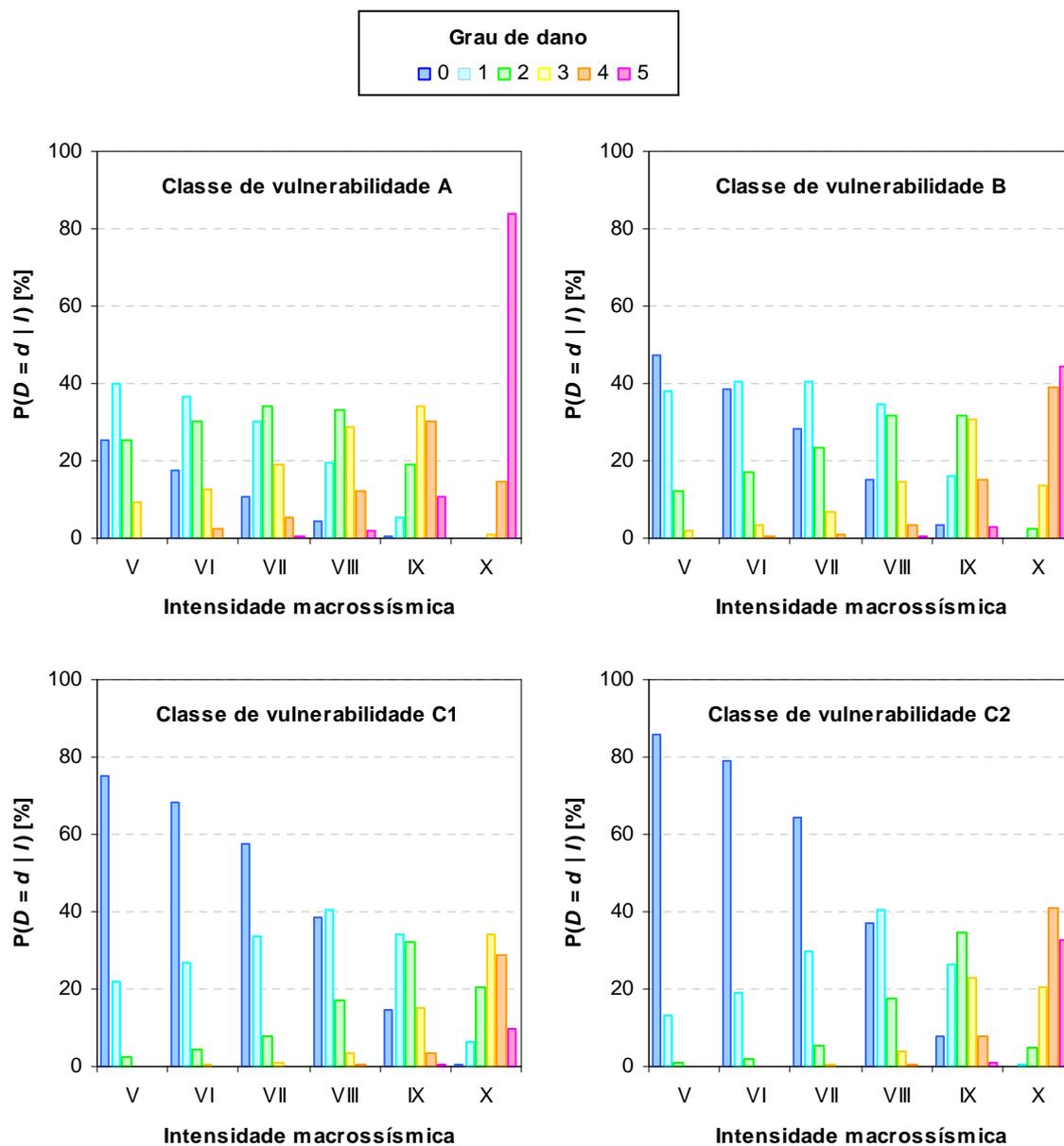


Figura C.3 – Matrizes de probabilidade de danos da metodologia Di Pasquale & Orsini.

### C.4. Modelo de danos Zuccaro & Papa

Quadro C.4 – Parâmetros,  $p(I)$ , da distribuição binomial do modelo de danos Zuccaro & Papa.

$I \backslash V$	A	B	C1	C2
V	0,21	0,15	0,08	0,03
VI	0,29	0,19	0,12	0,06
VII	0,33	0,21	0,14	0,09
VIII	0,37	0,24	0,16	0,13
IX	0,42	0,29	0,19	0,19
X	0,59	0,36	0,21	0,33

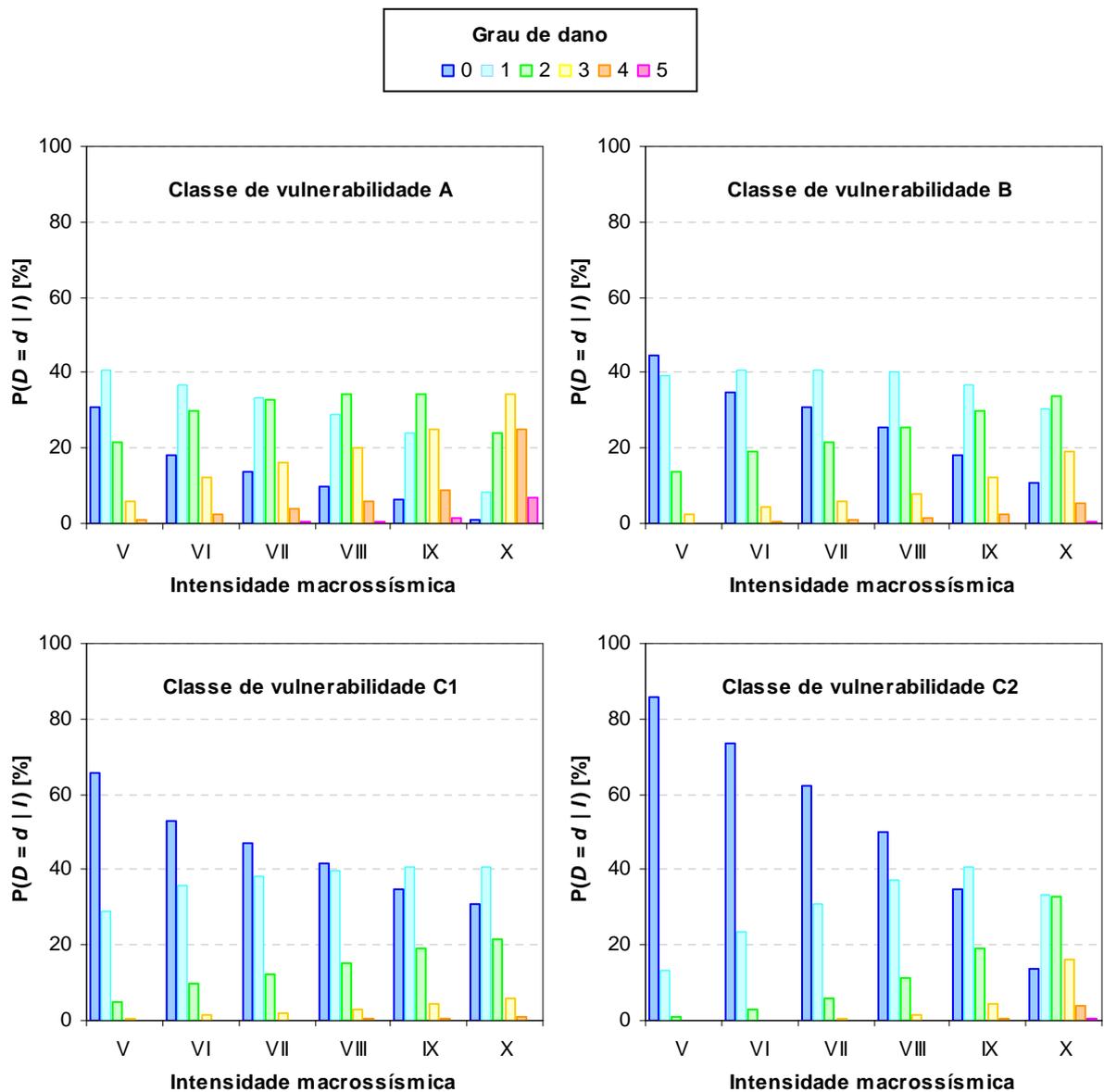


Figura C.4 – Matrizes de probabilidade de danos da metodologia Zuccaro & Papa.

### C.5. Modelo de perdas humanas FEMA & NIBS aplicado a Portugal Continental

Quadro C.5 – Probabilidade de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos, tipologias e estados de dano [adaptado de FEMA & NIBS, 1999].

Estados de dano		Nº de pav.	Classe de vulnerabilidade	Gravidade dos ferimentos [%]			
				Feridos Ligeiros	Cuidados Hospitalares	Feridos Graves	Mortos
Ligeiro		Todos	Todas	0,05	0,005	0,0	0,0
Moderado		Todos	Alv. até 1985 + ATAPS + Outros	0,4	0,04	0,0	0,0
		Todos	Betão + Alv. 1986-01	0,2	0,02	0,0	0,0
Severo		Todos	Alv. até 1985 + ATAPS + Outros	2,0	0,2	0,002	0,002
		Todos	Betão + Alv. 1986-01	1,0	0,1	0,001	0,001
Total	Colapso parcial	Todos	Alv. até 1985 + ATAPS + Outros	10,0	2,0	0,02	0,02
		Todos	Betão + Alv. 1986-01	5,0	1,0	0,01	0,01
	Colapso total	1-2	ATAPS + Outros	50,0	10,0	2,0	4,3
		1-2	Alv. + BA	50,0	10,0	2,0	1,0
		+ de 2	Alv. + BA	50,0	10,0	2,0	2,0

Quadro C.6 – Probabilidade de colapso no estado de Dano Total.

Classe de vulnerabilidade	Nº de pavimentos	[%]
ATAPS + Outros	Todos	25,0
Alvenaria até 1985	Todos	25,0
Alvenaria 1986-01	1-3	25,0
	4-7	20,0
	+ de 7	15,0
BA	1-3	20,0
	4-7	15,0
	+ de 7	10,0

## **ANEXO D**

### **PERDAS ESPERADAS ANUAIS**



## D. PERDAS ESPERADAS ANUAIS

### D.1. Perdas económicas

Nº Ordem	DTCC	Designação	AEL [Eurox10 <sup>6</sup> ]	DTCC	Designação	AELR [%]	DTCC	Designação	AELC [Euro per capita]
1	1106	Lisboa	8,132	0803	Aljezur	3,064	0803	Aljezur	219,27
2	1111	Sintra	4,236	0809	Monchique	2,791	0815	Vila do Bispo	141,23
3	0808	Loulé	3,313	0211	Odemira	2,776	0809	Monchique	139,93
4	0813	Silves	3,161	0212	Ourique	2,557	0209	Mértola	136,35
5	0211	Odemira	3,015	0807	Lagos	2,137	0211	Odemira	116,00
6	1105	Cascais	2,510	0815	Vila do Bispo	2,125	0212	Ourique	106,19
7	1503	Almada	2,225	0813	Silves	2,118	0802	Alcoutim	104,46
8	1113	Torres Vedras	2,170	0209	Mértola	1,928	0813	Silves	94,35
9	0811	Portimão	2,144	0811	Portimão	1,845	0807	Lagos	82,28
10	1416	Santarém	2,115	0201	Aljustrel	1,804	0806	Lagoa	76,53
11	0805	Faro	2,106	0206	Castro Verde	1,801	0202	Almodôvar	70,59
12	1107	Loures	2,074	0214	Vidigueira	1,780	0206	Castro Verde	68,54
13	0807	Lagos	2,072	0202	Almodôvar	1,779	0804	Castro Marim	68,08
14	0801	Albufeira	1,966	1509	Santiago do Cacém	1,632	0214	Vidigueira	66,88
15	1512	Setúbal	1,634	0806	Lagoa	1,631	0801	Albufeira	63,30
16	1510	Seixal	1,582	0213	Serpa	1,583	0201	Aljustrel	60,26
17	0806	Lagoa	1,559	0802	Alcoutim	1,524	0213	Serpa	57,85
18	1509	Santiago do Cacém	1,544	0801	Albufeira	1,438	0808	Loulé	56,83
19	1312	Porto	1,531	0709	Portel	1,406	0814	Tavira	53,59
20	0810	Olhão	1,508	0205	Beja	1,398	0708	Mourão	53,52
21	0205	Beja	1,501	0708	Mourão	1,347	1509	Santiago do Cacém	49,81
22	1109	Mafra	1,473	0207	Cuba	1,338	0709	Portel	49,33
23	1009	Leiria	1,466	0210	Moura	1,306	0811	Portimão	48,48
24	1114	Vila Franca de Xira	1,412	1513	Sines	1,268	0207	Cuba	46,99
25	0814	Tavira	1,331	0805	Faro	1,259	0210	Moura	45,38
26	1110	Oeiras	1,325	0808	Loulé	1,258	0812	São Brás de Alportel	44,50
27	1001	Alcobaça	1,313	0208	Ferreira do Alentejo	1,248	0208	Ferreira do Alentejo	43,91
28	1115	Amadora	1,230	0814	Tavira	1,244	0203	Alvito	43,78
29	1101	Alenquer	1,220	1106	Lisboa	1,216	0205	Beja	42,34
30	0209	Mértola	1,186	0812	São Brás de Alportel	1,174	1412	Golegã	41,43
31	1317	Vila Nova de Gaia	1,184	0203	Alvito	1,164	1104	Cadaval	41,05
32	1006	Caldas da Rainha	1,158	0810	Olhão	1,149	1407	Chamusca	39,84
33	0803	Aljezur	1,154	1505	Grândola	1,080	1409	Coruche	38,98
34	1507	Montijo	1,153	1502	Alcochete	1,076	1012	Óbidos	38,28
35	1508	Palmela	1,107	1414	Rio Maior	0,950	1414	Rio Maior	37,83
36	1401	Abrantes	1,088	1102	Arruda dos Vinhos	0,947	0810	Olhão	37,32
37	1418	Tomar	1,071	0804	Castro Marim	0,945	1005	Bombarral	37,03
38	1504	Barreiro	1,066	1501	Alcácer do Sal	0,943	0805	Faro	36,96
39	1506	Moita	1,053	1103	Azambuja	0,896	0204	Barrancos	35,72
40	0603	Coimbra	1,038	1412	Golegã	0,880	1102	Arruda dos Vinhos	35,15
41	1116	Odivelas	1,037	0713	Viana do Alentejo	0,877	1103	Azambuja	34,65

Nº Ordem	DTCC	Designação	AEL [Eurox10 <sup>6</sup> ]	DTCC	Designação	AELR [%]	DTCC	Designação	AELC [Euro per capita]
42	1421	Ourém	0,985	1005	Bombarral	0,861	1505	Grândola	34,47
43	0809	Monchique	0,973	1406	Cartaxo	0,849	1108	Lourinhã	34,25
44	0213	Serpa	0,962	0711	Reguengos Monsaraz	0,838	1416	Santarém	33,45
45	0705	Évora	0,953	0710	Redondo	0,835	1411	Ferreira do Zêzere	32,65
46	1015	Pombal	0,873	1507	Montijo	0,835	0713	Viana do Alentejo	32,62
47	1419	Torres Novas	0,868	1407	Chamusca	0,827	1406	Cartaxo	32,41
48	1511	Sesimbra	0,823	1504	Barreiro	0,827	1101	Alenquer	31,32
49	1409	Coruche	0,817	1409	Coruche	0,818	1112	Sobral Monte Agraço	31,03
50	1414	Rio Maior	0,793	1112	Sobral Monte Agraço	0,816	1408	Constância	30,92
51	1108	Lourinhã	0,792	1104	Cadaval	0,808	1113	Torres Vedras	30,16
52	0502	Castelo Branco	0,782	0706	Montemor-o-Novo	0,802	0511	Vila Velha de Ródão	29,92
53	1406	Cartaxo	0,752	1101	Alenquer	0,801	0606	Góis	29,90
54	0815	Vila do Bispo	0,749	1506	Moita	0,790	1501	Alcácer do Sal	29,78
55	0210	Moura	0,720	0816	V. Real Sto António	0,788	1507	Montijo	29,67
56	1103	Azambuja	0,717	1416	Santarém	0,773	1502	Alcochete	29,46
57	1304	Gondomar	0,687	1114	Vila Franca de Xira	0,766	1513	Sines	29,33
58	0605	Figueira da Foz	0,671	0204	Barrancos	0,749	0710	Redondo	28,88
59	0212	Ourique	0,658	1115	Amadora	0,731	0816	V. Real Sto António	28,71
60	0201	Aljustrel	0,634	1108	Lourinhã	0,711	1007	Castanheira de Pêra	28,39
61	0308	Guimarães	0,601	1113	Torres Vedras	0,709	0711	Reguengos Monsaraz	28,06
62	1308	Matosinhos	0,576	1012	Óbidos	0,706	1109	Mafra	27,27
63	0202	Almodôvar	0,574	1408	Constância	0,699	1002	Alvaiázere	26,99
64	1104	Cadaval	0,571	0701	Alandroal	0,680	1413	Mação	26,96
65	0105	Aveiro	0,530	1109	Mafra	0,669	0510	Vila de Rei	26,95
66	0109	Santa Maria da Feira	0,527	0704	Estremoz	0,667	0701	Alandroal	26,92
67	0206	Castro Verde	0,517	1110	Oeiras	0,659	1401	Abrantes	25,88
68	1505	Grândola	0,511	1111	Sintra	0,654	1417	Sardoal	25,41
69	1823	Viseu	0,511	1405	Benavente	0,647	1418	Tomar	25,15
70	0816	V. Real Sto António	0,510	1006	Caldas da Rainha	0,639	0506	Oleiros	24,40
71	0303	Braga	0,504	1512	Setúbal	0,625	1006	Caldas da Rainha	23,79
72	1405	Benavente	0,495	0705	Évora	0,616	1419	Torres Novas	23,63
73	0503	Covilhã	0,492	1107	Loures	0,605	0704	Estremoz	23,51
74	1014	Peniche	0,490	0702	Arraiolos	0,596	1415	Salvaterra de Magos	23,41
75	1005	Bombarral	0,488	1503	Almada	0,592	0706	Montemor-o-Novo	23,34
76	1415	Salvaterra de Magos	0,469	1116	Odivelas	0,587	1001	Alcobaça	23,24
77	1407	Chamusca	0,456	1508	Palmela	0,578	0505	Idanha-a-Nova	22,58
78	0812	São Brás de Alportel	0,443	1001	Alcobaça	0,556	0612	Pampilhosa da Serra	22,12
79	0804	Castro Marim	0,441	1105	Cascais	0,547	1511	Sesimbra	22,00
80	0706	Montemor-o-Novo	0,431	1415	Salvaterra de Magos	0,539	1013	Pedrógão Grande	21,79
81	1501	Alcácer do Sal	0,422	1401	Abrantes	0,536	1405	Benavente	21,44
82	0602	Cantanhede	0,418	1419	Torres Novas	0,532	1402	Alcanena	21,38
83	1012	Óbidos	0,414	0707	Mora	0,526	1421	Ourém	21,38
84	1016	Porto de Mós	0,413	1418	Tomar	0,513	0601	Arganil	21,30
85	0214	Vidigueira	0,409	1402	Alcanena	0,511	0614	Penela	21,27
86	0208	Ferreira do Alentejo	0,395	1510	Seixal	0,502	1508	Palmela	20,84
87	1306	Maia	0,394	1002	Alvaiázere	0,501	0702	Arraiolos	20,33
88	0802	Alcoutim	0,392	1007	Castanheira de Pêra	0,499	0707	Mora	20,20
89	1513	Sines	0,390	1404	Alpiarça	0,498	1404	Alpiarça	20,11
90	0312	V. Nova Famalicão	0,386	1016	Porto de Mós	0,488	1209	Gavião	19,95

Nº Ordem	DTCC	Designação	AEL [Eurox10 <sup>6</sup> ]	DTCC	Designação	AELR [%]	DTCC	Designação	AELC [Euro per capita]
91	1609	Viana do Castelo	0,384	1411	Ferreira do Zêzere	0,485	1206	Crato	19,59
92	1502	Alcochete	0,382	1202	Arronches	0,480	1211	Monforte	19,51
93	0704	Estremoz	0,365	1511	Sesimbra	0,477	1202	Arronches	18,98
94	1102	Arruda dos Vinhos	0,363	0703	Borba	0,474	1203	Avis	18,09
95	0907	Guarda	0,351	0712	Vendas Novas	0,465	1014	Peniche	18,07
96	0103	Anadia	0,350	1421	Ourém	0,453	1212	Nisa	17,55
97	0709	Portel	0,349	0614	Penela	0,443	1016	Porto de Mós	17,06
98	0615	Soure	0,345	1014	Peniche	0,441	1008	Figueiró dos Vinhos	16,97
99	0101	Águeda	0,340	1213	Ponte de Sor	0,435	0705	Évora	16,93
100	1315	Valongo	0,338	1209	Gavião	0,432	0616	Tábua	16,72
101	0302	Barcelos	0,336	1211	Monforte	0,432	0615	Soure	16,49
102	1403	Almeirim	0,335	1413	Mação	0,429	0509	Sertã	15,74
103	0110	Ílhavo	0,335	0510	Vila de Rei	0,426	1506	Moita	15,67
104	0113	Oliveira de Azeméis	0,332	0511	Vila Velha de Ródão	0,421	1015	Pombal	15,57
105	0504	Fundão	0,332	0714	Vila Viçosa	0,420	1011	Nazaré	15,47
106	0912	Seia	0,331	0615	Soure	0,416	1403	Almeirim	15,37
107	1010	Marinha Grande	0,319	1403	Almeirim	0,414	1105	Cascais	14,91
108	0711	Reguengos Monsaraz	0,316	1417	Sardoal	0,409	1106	Lisboa	14,70
109	1714	Vila Real	0,311	0506	Oleiros	0,406	0403	Carrazeda Ansiães	14,69
110	1402	Alcanena	0,311	1206	Crato	0,400	1215	Sousel	14,69
111	1316	Vila do Conde	0,310	0606	Góis	0,399	0409	Torre de Moncorvo	14,61
112	1411	Ferreira do Zêzere	0,307	1410	Entroncamento	0,396	1208	Fronteira	14,50
113	1311	Penafiel	0,301	1203	Avis	0,394	1512	Setúbal	14,44
114	1301	Amarante	0,295	1011	Nazaré	0,386	1003	Ansião	14,39
115	0601	Arganil	0,289	1004	Batalha	0,382	1213	Ponte de Sor	14,17
116	1821	Tondela	0,284	1013	Pedrógão Grande	0,382	1503	Almada	14,17
117	0115	Ovar	0,281	1015	Pombal	0,378	0502	Castelo Branco	14,12
118	1112	Sobral Monte Agraço	0,276	1215	Sousel	0,372	0508	Proença-a-Nova	13,81
119	1703	Chaves	0,274	0609	Miranda do Corvo	0,372	1201	Alter do Chão	13,77
120	0610	Montemor-o-Velho	0,270	0601	Arganil	0,368	1420	V. Nova Barquinha	13,75
121	0509	Sertã	0,263	1008	Figueiró dos Vinhos	0,365	0617	V. Nova de Poiares	13,65
122	0505	Idanha-a-Nova	0,262	1208	Fronteira	0,358	1504	Barreiro	13,59
123	1213	Ponte de Sor	0,255	0103	Anadia	0,348	1004	Batalha	13,59
124	1310	Paredes	0,254	0607	Lousã	0,338	1807	Moimenta da Beira	13,08
125	1214	Portalegre	0,251	0604	Condeixa-a-Nova	0,338	0609	Miranda do Corvo	13,02
126	1804	Cinfães	0,239	1009	Leiria	0,337	0712	Vendas Novas	12,96
127	1412	Golegã	0,236	0616	TBbua	0,336	1706	Montalegre	12,87
128	0611	Oliveira do Hospital	0,236	0509	Sertã	0,335	0608	Mira	12,65
129	1601	Arcos de Valdevez	0,235	1214	Portalegre	0,335	1820	Tarouca	12,56
130	1314	Santo Tirso	0,234	1212	Nisa	0,334	1205	Castelo de Vide	12,55
131	0207	Cuba	0,232	1420	V. Nova Barquinha	0,328	0914	V. Nova de Foz Côa	12,44
132	1011	Nazaré	0,231	0617	V. Nova de Poiares	0,326	1801	Armamar	12,43
133	1002	Alvaiázere	0,227	1003	Ansião	0,324	1009	Leiria	12,27
134	1413	Mação	0,227	0610	Montemor-o-Velho	0,313	0911	Sabugal	12,11
135	0313	Vila Verde	0,223	0605	Figueira da Foz	0,312	1812	Penedono	12,07
136	1307	Marco de Canaveses	0,217	0608	Mira	0,308	1813	Resende	11,91
137	1805	Lamego	0,213	0502	Castelo Branco	0,308	1815	S. João da Pesqueira	11,90
138	0307	Fafe	0,211	1207	Elvas	0,307	0703	Borba	11,89
139	0710	Redondo	0,210	0508	Proença-a-Nova	0,293	0912	Seia	11,85

Nº Ordem	DTCC	Designação	AEL [Eurox10 <sup>6</sup> ]	DTCC	Designação	AELR [%]	DTCC	Designação	AELC [Euro per capita]
140	1207	Elvas	0,209	0602	Cantanhede	0,291	1702	Boticas	11,82
141	0616	Tábua	0,208	1010	Marinha Grande	0,288	1710	Sabrosa	11,78
142	1806	Mangualde	0,206	0912	Seia	0,286	1210	Marvão	11,75
143	1607	Ponte de Lima	0,205	1210	Marvão	0,285	1111	Sintra	11,72
144	1004	Batalha	0,203	1201	Alter do Chão	0,283	1114	Vila Franca de Xira	11,59
145	1003	Ansião	0,197	1205	Castelo de Vide	0,277	0507	Penamacor	11,58
146	1313	Póvoa de Varzim	0,192	0505	Idanha-a-Nova	0,274	1819	Tabuaço	11,56
147	0108	Estarreja	0,186	0603	Coimbra	0,268	1818	Sernancelhe	11,54
148	0118	Vagos	0,186	0110	Ílhavo	0,262	0607	Lousã	11,43
149	0402	Bragança	0,185	0503	Covilhã	0,260	0905	Fornos de Algodres	11,14
150	0407	Mirandela	0,184	0612	Pampilhosa da Serra	0,259	0103	Anadia	11,14
151	0713	Viana do Alentejo	0,183	0114	Oliveira do Bairro	0,258	0404	Freixo Espada à Cinta	11,12
152	1302	Baião	0,181	0611	Oliveira do Hospital	0,254	0602	Cantanhede	11,06
153	0911	Sabugal	0,180	1312	Porto	0,251	0714	Vila Viçosa	11,03
154	0607	Lousã	0,179	0613	Penacova	0,250	0310	Terras de Bouro	10,98
155	0701	Alandroal	0,177	1806	Mangualde	0,244	0605	Figueira da Foz	10,81
156	0609	Miranda do Corvo	0,170	0105	Aveiro	0,244	0611	Oliveira do Hospital	10,69
157	0114	Oliveira do Bairro	0,169	0118	Vagos	0,243	1804	Cinfães	10,67
158	1706	Montalegre	0,164	0101	Águeda	0,238	0610	Montemor-o-Velho	10,64
159	0506	Oleiros	0,163	1804	Cinfães	0,234	1107	Loures	10,63
160	0608	Mira	0,163	0504	Fundão	0,224	1510	Seixal	10,61
161	0604	Condeixa-a-Nova	0,162	1824	Vouzela	0,222	0504	Fundão	10,57
162	1303	Felgueiras	0,161	0403	Carrazeda Ansiães	0,221	0604	Condeixa-a-Nova	10,55
163	0305	Celorico de Basto	0,161	1704	Mesão Frio	0,221	0112	Murtosa	10,49
164	1404	Alpiarça	0,160	1802	Carregal do Sal	0,219	0909	Meda	10,31
165	0304	Cabeceiras de Basto	0,160	1821	Tondela	0,217	1707	Murça	10,28
166	1410	Entroncamento	0,159	1813	Resende	0,217	1704	Mesão Frio	10,22
167	1309	Paços de Ferreira	0,159	0112	Murtosa	0,217	1824	Vouzela	9,95
168	1712	Valpaços	0,158	1820	Tarouca	0,216	1806	Mangualde	9,87
169	0906	Gouveia	0,157	1801	Armamar	0,214	1802	Carregal do Sal	9,87
170	0708	Mourão	0,157	0905	Fornos de Algodres	0,213	0903	Celorico da Beira	9,82
171	0613	Penacova	0,155	0102	Albergaria-a-Velha	0,211	0906	Gouveia	9,77
172	0102	Albergaria-a-Velha	0,155	1807	Moimenta da Beira	0,210	1701	Alijó	9,69
173	0702	Arraiolos	0,155	0111	Mealhada	0,209	1214	Portalegre	9,67
174	1803	Castro Daire	0,153	0108	Estarreja	0,208	1822	Vila Nova de Paiva	9,57
175	1305	Lousada	0,152	1815	S. João da Pesqueira	0,208	1601	Arcos de Valdevez	9,54
176	1816	São Pedro do Sul	0,151	0409	Torre de Moncorvo	0,207	1010	Marinha Grande	9,39
177	1212	Nisa	0,150	0117	Sever do Vouga	0,205	0613	Penacova	9,31
178	0712	Vendas Novas	0,150	1814	Santa Comba Dão	0,205	0410	Vila Flor	9,19
179	0104	Arouca	0,149	1204	Campo Maior	0,202	1821	Tondela	9,17
180	1813	Resende	0,146	0310	Terras de Bouro	0,202	0110	Ílhavo	9,07
181	0606	Góis	0,145	0106	Castelo de Paiva	0,201	0503	Covilhã	9,05
182	0409	Torre de Moncorvo	0,144	0304	Cabeceiras de Basto	0,200	1207	Elvas	9,02
183	0107	Espinho	0,144	1809	Nelas	0,196	1803	Castro Daire	9,01
184	1807	Moimenta da Beira	0,143	1805	Lamego	0,193	0913	Trancoso	8,97
185	0614	Penela	0,140	1819	Tabuaço	0,193	0304	Cabeceiras de Basto	8,96
186	1701	Alijó	0,139	1816	São Pedro do Sul	0,191	1410	Entroncamento	8,84
187	1604	Monção	0,138	0115	Ovar	0,188	0904	Fig. Castelo Rodrigo	8,69
188	0508	Proença-a-Nova	0,132	1710	Sabrosa	0,187	1811	Penalva do Castelo	8,53

Nº Ordem	DTCC	Designação	AEL [Eurox10 <sup>6</sup> ]	DTCC	Designação	AELR [%]	DTCC	Designação	AELC [Euro per capita]
189	0111	Mealhada	0,132	0906	Gouveia	0,186	1709	Ribeira de Pena	8,48
190	1708	Peso da Régua	0,130	1707	Murça	0,184	0118	Vagos	8,46
191	1008	Figueiró dos Vinhos	0,125	0501	Belmonte	0,184	1814	Santa Comba Dão	8,42
192	1713	Vila Pouca Aguiar	0,124	1803	Castro Daire	0,183	1713	Vila Pouca Aguiar	8,34
193	0511	Vila Velha Ródão	0,120	1708	Peso da Régua	0,179	0411	Vimioso	8,27
194	0405	Macedo Cavaleiros	0,120	0903	Celorico da Beira	0,178	0501	Belmonte	8,25
195	1824	Vouzela	0,118	1811	Penalva do Castelo	0,178	1110	Oeiras	8,24
196	0203	Alvito	0,117	1818	Sernancelhe	0,175	1603	Melgaço	8,22
197	1408	Constância	0,117	0913	Trancoso	0,174	1712	Valpaços	8,15
198	0707	Mora	0,117	1302	Baião	0,172	1302	Baião	8,12
199	0612	Pampilhosa Serra	0,115	0907	Guarda	0,171	0401	Alfândega da Fé	8,04
200	0311	Vieira do Minho	0,114	0305	Celorico de Basto	0,171	0114	Oliveira do Bairro	8,02
201	0106	Castelo de Paiva	0,112	1822	Vila Nova de Paiva	0,170	0907	Guarda	7,99
202	1809	Nelas	0,112	0909	Meda	0,167	1816	São Pedro do Sul	7,95
203	0119	Vale de Cambra	0,111	0914	V. Nova de Foz Côa	0,167	1809	Nelas	7,94
204	0403	Carrzeda Ansiães	0,111	1706	Montalegre	0,167	0910	Pinhel	7,94
205	1007	Castanheira de Pêra	0,106	0311	Vieira do Minho	0,167	0305	Celorico de Basto	7,87
206	0914	V. Nova de Foz Côa	0,106	0104	Arouca	0,166	1116	Odivelas	7,86
207	1814	Santa Comba Dão	0,105	1702	Boticas	0,164	0311	Vieira do Minho	7,78
208	1417	Sardoal	0,104	1701	Alijó	0,163	0412	Vinhais	7,76
209	1420	V. Nova Barquinha	0,104	1808	Mortágua	0,161	1605	Paredes de Coura	7,75
210	1820	Tarouca	0,104	0107	Espinho	0,157	1711	Sta Marta Penaguião	7,67
211	1318	Trofa	0,103	0407	Mirandela	0,157	0902	Almeida	7,65
212	1815	S. João Pesqueira	0,103	0507	Penamacor	0,156	1805	Lamego	7,62
213	0306	Esposende	0,102	1810	Oliveira de Frades	0,156	0105	Aveiro	7,27
214	1802	Carregal do Sal	0,102	0113	Oliveira de Azeméis	0,156	1115	Amadora	7,21
215	0309	Póvoa de Lanhoso	0,100	0904	Fig. Castelo Rodrigo	0,154	0407	Mirandela	7,16
216	0112	Murtosa	0,098	0908	Manteigas	0,154	0117	Sever do Vouga	7,16
217	0714	Vila Viçosa	0,098	1812	Penedono	0,154	0603	Coimbra	7,02
218	0913	Trancoso	0,097	1601	Arcos de Valdevez	0,154	0901	Aguiar da Beira	7,02
219	1209	Gavião	0,096	0116	S. João da Madeira	0,153	1604	Monção	6,98
220	0617	V. Nova de Poiares	0,096	1823	Viseu	0,152	0101	Águeda	6,96
221	1013	Pedrógão Grande	0,096	1711	Sta Marta Penaguião	0,151	1708	Peso da Régua	6,95
222	0117	Sever do Vouga	0,094	1315	Valongo	0,150	0405	Macedo Cavaleiros	6,87
223	1801	Armamar	0,093	0410	Vila Flor	0,150	0908	Manteigas	6,68
224	1203	Avis	0,092	1709	Ribeira de Pena	0,150	0108	Estarreja	6,65
225	0703	Borba	0,092	1304	Gondomar	0,149	0106	Castelo de Paiva	6,50
226	0310	Terras de Bouro	0,091	0910	Pinhel	0,146	0408	Mogadouro	6,49
227	0301	Amares	0,090	1311	Penafiel	0,145	0111	Mealhada	6,37
228	0510	Vila de Rei	0,090	0911	Sabugal	0,144	0102	Albergaria-a-Velha	6,34
229	0910	Pinhel	0,087	1713	V. Pouca de Aguiar	0,144	1703	Chaves	6,31
230	0903	Celorico da Beira	0,086	0404	Freixo Espada Cinta	0,143	1808	Mortágua	6,27
231	1206	Crato	0,085	1317	Vila Nova de Gaia	0,142	1714	Vila Real	6,25
232	1215	Sousel	0,085	1605	Paredes de Coura	0,141	0104	Arouca	6,20
233	1602	Caminha	0,084	1301	Amarante	0,140	1312	Porto	5,86
234	0412	Vinhais	0,083	1712	Valpaços	0,137	1810	Oliveira de Frades	5,79
235	1710	Sabrosa	0,082	0308	Guimarães	0,135	1705	Mondim de Basto	5,69
236	1603	Melgaço	0,082	1307	Marco de Canaveses	0,133	1817	Sátão	5,62
237	1819	Tabuaço	0,078	0401	Alfândega da Fé	0,132	1606	Ponte da Barca	5,51

Nº Ordem	DTCC	Designação	AEL [Eurox10 <sup>6</sup> ]	DTCC	Designação	AELR [%]	DTCC	Designação	AELC [Euro per capita]
238	0507	Penamacor	0,077	1705	Mondim de Basto	0,131	1823	Viseu	5,51
239	1811	Penalva do Castelo	0,077	1308	Matosinhos	0,131	1204	Campo Maior	5,47
240	1702	Boticas	0,076	0109	Sta Maria da Feira	0,130	0402	Bragança	5,33
241	1605	Paredes de Coura	0,074	1714	Vila Real	0,130	0115	Ovar	5,14
242	1817	Sátão	0,073	0405	Macedo Cavaleiros	0,130	1301	Amarante	4,97
243	0408	Mogadouro	0,073	0119	Vale de Cambra	0,130	1602	Caminha	4,95
244	0410	Vila Flor	0,072	0313	Vila Verde	0,127	0301	Amares	4,90
245	1818	Sernancelhe	0,072	0902	Almeida	0,126	1608	Valença	4,87
246	1606	Ponte da Barca	0,071	1305	Lousada	0,124	1610	V. Nova de Cerveira	4,86
247	1707	Murça	0,069	1306	Maia	0,123	0313	Vila Verde	4,81
248	0204	Barrancos	0,069	0301	Amares	0,123	0113	Oliveira de Azeméis	4,71
249	1608	Valença	0,068	0901	Aguiar da Beira	0,123	1607	Ponte de Lima	4,62
250	0314	Vizela	0,067	1604	Monção	0,122	0119	Vale de Cambra	4,49
251	1711	Sta Marta Penaguião	0,065	1310	Paredes	0,121	0309	Póvoa de Lanhoso	4,39
252	1808	Mortágua	0,065	0412	Vinhais	0,120	1609	Viana do Castelo	4,35
253	1211	Monforte	0,065	1817	Sátão	0,119	0107	Espinho	4,33
254	1202	Arronches	0,064	1309	Paços de Ferreira	0,119	1304	Gondomar	4,21
255	0909	Meda	0,064	0303	Braga	0,118	1311	Penafiel	4,20
256	0902	Almeida	0,064	1607	Ponte de Lima	0,118	1316	Vila do Conde	4,20
257	0905	Fornos de Algodres	0,063	1603	Melgaço	0,118	1307	Marco de Canaveses	4,15
258	0501	Belmonte	0,062	1314	Santo Tirso	0,117	1317	Vila Nova de Gaia	4,13
259	1709	Ribeira de Pena	0,062	1703	Chaves	0,117	0307	Fafe	4,01
260	0904	Fig. Castelo Rodrigo	0,062	1316	Vila do Conde	0,116	0406	Miranda do Douro	4,01
261	1810	Oliveira de Frades	0,061	0312	V. Nova Famalicão	0,116	1315	Valongo	3,95
262	1822	Vila Nova de Paiva	0,059	0307	Fafe	0,114	0109	Sta Maria da Feira	3,90
263	0116	S. João da Madeira	0,055	0314	Vizela	0,114	0308	Guimarães	3,78
264	1208	Fronteira	0,054	0309	Póvoa de Lanhoso	0,113	1308	Matosinhos	3,49
265	1201	Alter do Chão	0,053	1606	Ponte da Barca	0,113	1305	Lousada	3,40
266	1704	Mesão Frio	0,050	1318	Trofa	0,110	1306	Maia	3,30
267	1205	Castelo de Vide	0,049	0302	Barcelos	0,103	1314	Santo Tirso	3,25
268	1705	Mondim de Basto	0,048	1608	Valença	0,103	0303	Braga	3,08
269	0401	Alfândega da Fé	0,048	1609	Viana do Castelo	0,101	0306	Esposende	3,08
270	1210	Marvão	0,047	1602	Caminha	0,101	1310	Paredes	3,06
271	0404	Freixo Espada Cinta	0,046	1303	Felgueiras	0,100	0312	V. Nova Famalicão	3,04
272	1204	Campo Maior	0,045	0408	Mogadouro	0,097	1313	Póvoa de Varzim	3,04
273	0411	Vimioso	0,044	1313	Póvoa de Varzim	0,096	1309	Paços de Ferreira	3,00
274	0901	Aguiar da Beira	0,043	0411	Vimioso	0,095	0314	Vizela	2,96
275	1610	V. Nova de Cerveira	0,043	0402	Bragança	0,090	1303	Felgueiras	2,80
276	1812	Penedono	0,042	1610	V. Nova de Cerveira	0,089	0302	Barcelos	2,77
277	0406	Miranda do Douro	0,032	0306	Esposende	0,076	1318	Trofa	2,74
278	0908	Manteigas	0,025	0406	Miranda do Douro	0,063	0116	S. João da Madeira	2,64

## D.2. Perdas humanas

Nº Ordem	DTCC	Designação	AED [1000]	DTCC	Designação	AEDR [%]
1	1106	Lisboa	1778,00	0803	Aljezur	0,051
2	0211	Odemira	868,50	0815	Vila do Bispo	0,039
3	0811	Portimão	728,30	0211	Odemira	0,033
4	0813	Silves	715,30	0809	Monchique	0,031
5	0807	Lagos	628,90	0807	Lagos	0,025
6	0808	Loulé	563,30	0212	Ourique	0,022
7	0801	Albufeira	460,80	0813	Silves	0,021
8	1111	Sintra	422,30	0811	Portimão	0,016
9	0805	Faro	382,30	0806	Lagoa	0,016
10	0806	Lagoa	334,60	0801	Albufeira	0,015
11	0810	Olhão	315,10	0201	Aljustrel	0,012
12	1509	Santiago do Cacém	287,80	0206	Castro Verde	0,011
13	1503	Almada	283,40	0202	Almodôvar	0,011
14	1115	Amadora	274,30	0209	Mértola	0,011
15	0803	Aljezur	266,00	0808	Loulé	0,010
16	1110	Oeiras	229,80	1509	Santiago do Cacém	0,009
17	1105	Cascais	221,40	0802	Alcoutim	0,008
18	0809	Monchique	218,90	0213	Serpa	0,008
19	1510	Seixal	214,10	0810	Olhão	0,008
20	1107	Loures	214,00	1513	Sines	0,007
21	0815	Vila do Bispo	208,00	0214	Vidigueira	0,007
22	1512	Setúbal	189,10	0814	Tavira	0,007
23	0814	Tavira	182,60	0812	São Brás de Alportel	0,007
24	1116	Odivelas	165,50	0805	Faro	0,007
25	0205	Beja	162,30	0804	Castro Marim	0,007
26	1504	Barreiro	153,30	1505	Grândola	0,006
27	0212	Ourique	135,90	0709	Portel	0,005
28	0213	Serpa	134,00	0207	Cuba	0,005
29	1114	Vila Franca de Xira	125,70	0708	Mourão	0,005
30	1506	Moita	125,00	0208	Ferreira do Alentejo	0,005
31	0201	Aljustrel	121,40	0210	Moura	0,005
32	1113	Torres Vedras	114,70	0205	Beja	0,005
33	1513	Sines	98,97	1501	Alcácer do Sal	0,004
34	0209	Mértola	92,13	0203	Alvito	0,004
35	1505	Grândola	90,78	1106	Lisboa	0,003
36	1109	Mafra	88,08	0713	Viana do Alentejo	0,003
37	1508	Palmela	87,77	0816	Vila Real de Santo António	0,003
38	0202	Almodôvar	86,45	1502	Alcochete	0,002
39	0206	Castro Verde	85,40	1409	Coruche	0,002
40	1416	Santarém	85,15	0711	Reguengos de Monsaraz	0,002
41	0210	Moura	77,25	1102	Arruda dos Vinhos	0,002
42	0705	Évora	74,58	1504	Barreiro	0,002
43	1507	Montijo	70,26	0710	Redondo	0,002
44	0812	São Brás de Alportel	67,81	1414	Rio Maior	0,002
45	1101	Alenquer	60,83	0204	Barrancos	0,002
46	1511	Sesimbra	60,39	1506	Moita	0,002

Nº Ordem	DTCC	Designação	AED [1000]	DTCC	Designação	AEDR [%]
47	1501	Alcácer do Sal	53,03	1103	Azambuja	0,002
48	0816	Vila Real de Santo António	49,70	1507	Montijo	0,002
49	0208	Ferreira do Alentejo	46,00	1503	Almada	0,002
50	0214	Vidigueira	45,07	1104	Cadaval	0,002
51	1409	Coruche	44,11	0706	Montemor-o-Novo	0,002
52	1006	Caldas da Rainha	43,19	1005	Bombarral	0,002
53	0804	Castro Marim	42,78	1406	Cartaxo	0,002
54	1414	Rio Maior	39,68	1407	Chamusca	0,002
55	1406	Cartaxo	39,29	1512	Setúbal	0,002
56	0709	Portel	38,11	1508	Palmela	0,002
57	1103	Azambuja	37,67	1112	Sobral de Monte Agraço	0,002
58	1001	Alcobaça	36,51	1109	Mafra	0,002
59	1009	Leiria	33,40	1511	Sesimbra	0,002
60	1502	Alcochete	32,38	1115	Amadora	0,002
61	1108	Lourinhã	31,88	1113	Torres Vedras	0,002
62	0706	Montemor-o-Novo	31,65	1101	Alenquer	0,002
63	0802	Alcoutim	31,38	1412	Golegã	0,002
64	1401	Abrantes	29,58	1012	Óbidos	0,002
65	1312	Porto	29,04	0701	Alandroal	0,001
66	1419	Torres Novas	27,29	1408	Constância	0,001
67	1418	Tomar	26,95	1510	Seixal	0,001
68	0207	Cuba	25,86	1110	Oeiras	0,001
69	0603	Coimbra	25,67	1108	Lourinhã	0,001
70	1405	Benavente	25,65	1416	Santarém	0,001
71	1104	Cadaval	24,28	0705	Évora	0,001
72	0711	Reguengos de Monsaraz	22,67	1105	Cascais	0,001
73	1005	Bombarral	22,52	1116	Odivelas	0,001
74	1421	Ourém	20,64	1111	Sintra	0,001
75	1102	Arruda dos Vinhos	20,60	0702	Arraiolos	0,001
76	1015	Pombal	19,56	1405	Benavente	0,001
77	1407	Chamusca	19,16	1107	Loures	0,001
78	1014	Peniche	17,50	0704	Estremoz	0,001
79	0704	Estremoz	16,80	1114	Vila Franca de Xira	0,001
80	1317	Vila Nova de Gaia	16,74	1006	Caldas da Rainha	0,001
81	1012	Óbidos	16,31	0703	Borba	0,001
82	0605	Figueira da Foz	16,30	1415	Salvaterra de Magos	0,001
83	0713	Viana do Alentejo	16,10	1419	Torres Novas	0,001
84	1415	Salvaterra de Magos	16,00	0714	Vila Viçosa	0,001
85	0708	Mourão	15,02	1401	Abrantes	0,001
86	1112	Sobral de Monte Agraço	14,55	1411	Ferreira do Zêzere	0,001
87	0710	Redondo	14,09	0707	Mora	0,001
88	1016	Porto de Mós	12,68	1202	Arronches	0,001
89	0105	Aveiro	11,63	1001	Alcobaça	0,001
90	1823	Viseu	10,75	1014	Peniche	0,001
91	1213	Ponte de Sor	10,36	1418	Tomar	0,001
92	1214	Portalegre	10,05	1404	Alpiarça	0,001
93	0203	Alvito	9,92	0712	Vendas Novas	0,001
94	1403	Almeirim	9,91	1402	Alcanena	0,001
95	0103	Anadia	9,90	1002	Alvaiázere	0,001

Nº Ordem	DTCC	Designação	AED [/1000]	DTCC	Designação	AEDR [‰]
96	0502	Castelo Branco	9,89	1007	Castanheira de Pêra	0,001
97	0701	Alandroal	9,80	1413	Mação	0,001
98	0503	Covilhã	9,75	1213	Ponte de Sor	0,001
99	1304	Gondomar	9,56	0510	Vila de Rei	0,001
100	1402	Alcanena	9,03	1011	Nazaré	0,001
101	1207	Elvas	8,85	1016	Porto de Mós	0,001
102	0702	Arraiolos	8,76	1209	Gavião	0,000
103	1412	Golegã	8,69	0606	Góis	0,000
104	0110	Ílhavo	8,31	1403	Almeirim	0,000
105	1308	Matosinhos	8,18	0506	Oleiros	0,000
106	0602	Cantanhede	8,12	1421	Ourém	0,000
107	0101	Águeda	8,11	1004	Batalha	0,000
108	0109	Santa Maria da Feira	7,98	1211	Monforte	0,000
109	1011	Nazaré	7,97	1208	Fronteira	0,000
110	1010	Marinha Grande	7,75	1417	Sardoal	0,000
111	0308	Guimarães	7,55	1206	Crato	0,000
112	0712	Vendas Novas	7,21	1214	Portalegre	0,000
113	0615	Soure	6,94	0509	Sertã	0,000
114	1004	Batalha	6,64	1212	Nisa	0,000
115	0703	Borba	6,63	1207	Elvas	0,000
116	0115	Ovar	6,49	1013	Pedrógão Grande	0,000
117	0509	Sertã	6,43	1008	Figueiró dos Vinhos	0,000
118	1411	Ferreira do Zêzere	6,43	0511	Vila Velha de Ródão	0,000
119	0610	Montemor-o-Velho	6,40	1203	Avis	0,000
120	0714	Vila Viçosa	6,29	1015	Pombal	0,000
121	0303	Braga	6,25	1410	Entroncamento	0,000
122	1410	Entroncamento	6,22	1215	Sousel	0,000
123	1315	Valongo	5,93	0615	Soure	0,000
124	0912	Seia	5,90	0614	Penela	0,000
125	1408	Constância	5,53	0609	Miranda do Corvo	0,000
126	0312	Vila Nova de Famalicão	5,40	0103	Anadia	0,000
127	0113	Oliveira de Azeméis	5,37	0601	Arganil	0,000
128	1306	Maia	5,13	1210	Marvão	0,000
129	1002	Alvaiázere	5,06	1420	Vila Nova da Barquinha	0,000
130	1311	Penafiel	5,04	0617	Vila Nova de Poiares	0,000
131	1404	Alpiarça	4,97	1009	Leiria	0,000
132	1413	Mação	4,91	0608	Mira	0,000
133	0504	Fundão	4,62	0508	Proença-a-Nova	0,000
134	0118	Vagos	4,51	0616	Tábua	0,000
135	1316	Vila do Conde	4,50	0605	Figueira da Foz	0,000
136	1821	Tondela	4,34	0610	Montemor-o-Velho	0,000
137	0601	Arganil	4,26	0505	Idanha-a-Nova	0,000
138	1804	Cinfães	4,16	1204	Campo Maior	0,000
139	0609	Miranda do Corvo	4,13	1010	Marinha Grande	0,000
140	1310	Paredes	4,12	0110	Ílhavo	0,000
141	0114	Oliveira do Bairro	4,00	0607	Lousã	0,000
142	0108	Estarreja	3,99	0112	Murtosa	0,000
143	0302	Barcelos	3,89	0604	Condeixa-a-Nova	0,000
144	0707	Mora	3,83	0602	Cantanhede	0,000

Nº Ordem	DTCC	Designação	AED [1000]	DTCC	Designação	AEDR [%]
145	1609	Viana do Castelo	3,78	1205	Castelo de Vide	0,000
146	0611	Oliveira do Hospital	3,74	0912	Seia	0,000
147	0102	Albergaria-a-Velha	3,71	0118	Vagos	0,000
148	1806	Mangualde	3,68	1003	Ansião	0,000
149	0907	Guarda	3,65	1824	Vouzela	0,000
150	0204	Barrancos	3,59	0114	Oliveira do Bairro	0,000
151	0608	Mira	3,50	0613	Penacova	0,000
152	1314	Santo Tirso	3,45	1804	Cinfães	0,000
153	0607	Lousã	3,45	0503	Covilhã	0,000
154	1301	Amarante	3,35	0502	Castelo Branco	0,000
155	0616	Tábua	3,32	1806	Mangualde	0,000
156	0604	Condeixa-a-Nova	3,29	0603	Coimbra	0,000
157	1212	Nisa	3,27	0611	Oliveira do Hospital	0,000
158	0613	Penacova	3,17	1814	Santa Comba Dão	0,000
159	1307	Marco de Canaveses	3,16	0101	Águeda	0,000
160	0506	Oleiros	3,02	0105	Aveiro	0,000
161	1309	Paços de Ferreira	2,83	1802	Carregal do Sal	0,000
162	0505	Idanha-a-Nova	2,83	0612	Pampilhosa da Serra	0,000
163	1805	Lamego	2,82	1201	Alter do Chão	0,000
164	0111	Mealhada	2,80	0102	Albergaria-a-Velha	0,000
165	1003	Ansião	2,79	0504	Fundão	0,000
166	0107	Espinho	2,64	0108	Estarreja	0,000
167	1008	Figueiró dos Vinhos	2,60	1821	Tondela	0,000
168	0508	Proença-a-Nova	2,59	0111	Mealhada	0,000
169	1607	Ponte de Lima	2,50	1704	Mesão Frio	0,000
170	1714	Vila Real	2,47	0117	Sever do Vouga	0,000
171	1209	Gavião	2,40	0905	Fornos de Algodres	0,000
172	1816	São Pedro do Sul	2,35	1820	Tarouca	0,000
173	1420	Vila Nova da Barquinha	2,34	1816	São Pedro do Sul	0,000
174	0606	Góis	2,32	1809	Nelas	0,000
175	1824	Vouzela	2,32	0115	Ovar	0,000
176	0313	Vila Verde	2,27	1813	Resende	0,000
177	1202	Arronches	2,23	1823	Viseu	0,000
178	1007	Castanheira de Pêra	2,21	1807	Moimenta da Beira	0,000
179	1305	Lousada	2,16	0106	Castelo de Paiva	0,000
180	0617	Vila Nova de Poiares	2,14	1801	Armamar	0,000
181	0614	Penela	2,12	1808	Mortágua	0,000
182	1313	Póvoa de Varzim	2,10	1312	Porto	0,000
183	0104	Arouca	2,09	1803	Castro Daire	0,000
184	1814	Santa Comba Dão	2,08	0501	Belmonte	0,000
185	0112	Murtosa	2,02	0507	Penamacor	0,000
186	1215	Sousel	1,97	1819	Tabuaço	0,000
187	0106	Castelo de Paiva	1,97	1818	Sernancelhe	0,000
188	0307	Fafe	1,94	1815	São João da Pesqueira	0,000
189	1204	Campo Maior	1,90	0913	Trancoso	0,000
190	1803	Castro Daire	1,88	1805	Lamego	0,000
191	0510	Vila de Rei	1,86	0903	Celorico da Beira	0,000
192	1203	Avis	1,79	0906	Gouveia	0,000
193	1303	Felgueiras	1,78	1707	Murça	0,000

Nº Ordem	DTCC	Designação	AED [/1000]	DTCC	Designação	AEDR [%]
194	1417	Sardoal	1,76	0911	Sabugal	0,000
195	1206	Crato	1,74	1710	Sabrosa	0,000
196	0117	Sever do Vouga	1,70	1811	Penalva do Castelo	0,000
197	1809	Nelas	1,70	0310	Terras de Bouro	0,000
198	1013	Pedrógão Grande	1,64	0403	Carrazeda de Ansiães	0,000
199	1802	Carregal do Sal	1,64	1822	Vila Nova de Paiva	0,000
200	1208	Fronteira	1,62	0104	Arouca	0,000
201	0906	Gouveia	1,58	1708	Peso da Régua	0,000
202	1708	Peso da Régua	1,58	1810	Oliveira de Frades	0,000
203	1601	Arcos de Valdevez	1,56	0907	Guarda	0,000
204	1302	Baião	1,54	0107	Espinho	0,000
205	1211	Monforte	1,46	0304	Cabeceiras de Basto	0,000
206	1813	Resende	1,45	0409	Torre de Moncorvo	0,000
207	0511	Vila Velha de Ródão	1,43	0113	Oliveira de Azeméis	0,000
208	0304	Cabeceiras de Basto	1,40	1702	Boticas	0,000
209	0911	Sabugal	1,40	0910	Pinhel	0,000
210	1318	Trofa	1,36	1605	Paredes de Coura	0,000
211	0116	São João da Madeira	1,33	1311	Penafiel	0,000
212	0119	Vale de Cambra	1,31	1706	Montalegre	0,000
213	1807	Moimenta da Beira	1,26	1315	Valongo	0,000
214	1210	Marvão	1,25	0904	Figueira de Castelo Rodrigo	0,000
215	1703	Chaves	1,18	0311	Vieira do Minho	0,000
216	1808	Mortágua	1,15	1302	Baião	0,000
217	0913	Trancoso	1,11	1709	Ribeira de Pena	0,000
218	0407	Mirandela	1,07	0909	Meda	0,000
219	1712	Valpaços	1,05	0116	São João da Madeira	0,000
220	1820	Tarouca	1,05	1601	Arcos de Valdevez	0,000
221	0305	Celorico de Basto	1,03	0404	Freixo de Espada à Cinta	0,000
222	0311	Vieira do Minho	1,02	1713	Vila Pouca de Aguiar	0,000
223	0309	Pàvoa de Lanhoso	0,95	0914	Vila Nova de Foz Côa	0,000
224	1713	Vila Pouca de Aguiar	0,94	1701	Alijó	0,000
225	1706	Montalegre	0,89	1711	Santa Marta de Penaguião	0,000
226	1701	Alijó	0,89	0902	Almeida	0,000
227	1815	São João da Pesqueira	0,89	1316	Vila do Conde	0,000
228	0301	Amares	0,88	1307	Marco de Canaveses	0,000
229	1810	Oliveira de Frades	0,88	1817	Sátão	0,000
230	0314	Vizela	0,87	0109	Santa Maria da Feira	0,000
231	0903	Celorico da Beira	0,86	1304	Gondomar	0,000
232	1801	Armamar	0,83	1317	Vila Nova de Gaia	0,000
233	0501	Belmonte	0,83	1607	Ponte de Lima	0,000
234	0612	Pampilhosa da Serra	0,82	1301	Amarante	0,000
235	1205	Castelo de Vide	0,82	0908	Manteigas	0,000
236	1811	Penalva do Castelo	0,81	1712	Valpaços	0,000
237	1604	Monção	0,81	1606	Ponte da Barca	0,000
238	0910	Pinhel	0,80	1309	Paços de Ferreira	0,000
239	1817	Sátão	0,78	0119	Vale de Cambra	0,000
240	0409	Torre de Moncorvo	0,78	1705	Mondim de Basto	0,000
241	1602	Caminha	0,76	0401	Alfândega da Fé	0,000
242	0405	Macedo de Cavaleiros	0,76	0305	Celorico de Basto	0,000

Nº Ordem	DTCC	Designação	AED [ /1000]	DTCC	Designação	AEDR [%]
243	0310	Terras de Bouro	0,75	1310	Paredes	0,000
244	0905	Fornos de Algodres	0,72	1308	Matosinhos	0,000
245	0402	Bragança	0,71	1714	Vila Real	0,000
246	1819	Tabuaço	0,71	0313	Vila Verde	0,000
247	0306	Esposende	0,70	1305	Lousada	0,000
248	0507	Penamacor	0,70	1314	Santo Tirso	0,000
249	1606	Ponte da Barca	0,70	0301	Amares	0,000
250	0403	Carrzeda de Ansiães	0,68	0308	Guimarães	0,000
251	1605	Paredes de Coura	0,67	0901	Aguiar da Beira	0,000
252	1707	Murça	0,66	1602	Caminha	0,000
253	1704	Mesão Frio	0,65	0405	Macedo de Cavaleiros	0,000
254	1710	Sabrosa	0,65	1306	Maia	0,000
255	1818	Sernancelhe	0,65	1609	Viana do Castelo	0,000
256	1201	Alter do Chão	0,59	0312	Vila Nova de Famalicão	0,000
257	1822	Vila Nova de Paiva	0,55	0309	Póvoa de Lanhoso	0,000
258	0914	Vila Nova de Foz Côa	0,53	0407	Mirandela	0,000
259	1711	Santa Marta de Penaguião	0,53	1604	Monção	0,000
260	1608	Valença	0,51	0410	Vila Flor	0,000
261	0902	Almeida	0,51	1812	Penedono	0,000
262	0904	Figueira de Castelo Rodrigo	0,49	0412	Vinhais	0,000
263	1709	Ribeira de Pena	0,49	0314	Vizela	0,000
264	1702	Boticas	0,48	0303	Braga	0,000
265	1705	Mondim de Basto	0,45	1603	Melgaço	0,000
266	0412	Vinhais	0,41	0411	Vimioso	0,000
267	0909	Meda	0,41	0307	Fafe	0,000
268	1603	Melgaço	0,38	1318	Trofa	0,000
269	0410	Vila Flor	0,31	1608	Valença	0,000
270	0401	Alfândega da Fé	0,31	1313	Póvoa de Varzim	0,000
271	0901	Aguiar da Beira	0,29	0302	Barcelos	0,000
272	0404	Freixo de Espada à Cinta	0,26	1303	Felgueiras	0,000
273	1610	Vila Nova de Cerveira	0,25	1610	Vila Nova de Cerveira	0,000
274	0408	Mogadouro	0,24	1703	Chaves	0,000
275	0908	Manteigas	0,21	0408	Mogadouro	0,000
276	0411	Vimioso	0,20	0306	Esposende	0,000
277	0406	Miranda do Douro	0,15	0402	Bragança	0,000
278	1812	Penedono	0,14	0406	Miranda do Douro	0,000

