

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E HABITAÇÃO

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

Grupo de Estudos e Equipamentos de Engenharia Sísmica

Proc. 037/14/13733

METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DE PERDAS HUMANAS EM CONSEQUÊNCIA DE SISMOS

RELATÓRIO 187/02 — G3ES

Lisboa, Julho de 2002

Trabalho realizado no âmbito do projecto "Mitigação do Risco Sísmico em Portugal"
financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia

NÃO CONFIDENCIAL

**METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DE PERDAS HUMANAS
EM CONSEQUÊNCIA DE SISMOS**

**METHODOLOGIES FOR THE EVALUATION OF
HUMAN LOSSES DUE TO EARTHQUAKES**

**METHODOLOGIES POUR L'EVALUATION DES PERTES HUMAINES
EN CONSEQUENCE DE TREMBLEMENTS DE TERRE**

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Situação em Portugal.....	2
1.3. Âmbito e objectivos do estudo	2
2. PERDAS HUMANAS EM CONSEQUÊNCIA DE SISMOS.....	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Sismos históricos em Portugal Continental.....	6
2.2.1. Sismo de 26 de Janeiro de 1531	6
2.2.2. Sismo de 1 de Novembro de 1755	7
2.2.3. Sismo de 11 de Novembro de 1858.....	8
2.2.4. Sismo de 23 de Abril de 1909.....	9
2.3. Sismo dos Açores – Ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa (1 de Janeiro de 1980). 10	
2.4. Sismo da Arménia - Spitak (7 de Dezembro de 1988).....	12
2.5. Sismo de Loma Prieta (17 de Outubro de 1989).....	13
2.6. Sismo de Northridge – Los Angeles (17 de Janeiro de 1994).....	14
2.7. Sismo do Japão - Kobe (17 de Janeiro de 1995)	16
2.8. Sismo dos Açores – Ilhas do Faial, Pico e S. Jorge (9 de Julho de 1998).....	19
2.9. Sismo da Turquia: Kocaeli/Izmit (17 de Agosto de 1999).....	20
2.10. Sismo da Grécia - Atenas (7 de Setembro de 1999).....	22
2.11. Sismo de Taiwan - Chichi (20 de Setembro de 1999).....	23
2.12. Sismo de El Salvador – América Central (13 de Janeiro de 2001)	24
3. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DE PERDAS HUMANAS.....	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Metodologia ATC 13 [ATC, 1985].....	30
3.3. Curvas de vulnerabilidade [Tiedemann, 1990 e Tiedemann, 1992].....	32
3.3.1. Incertezas gerais relacionadas com a contabilização de perdas humanas ...	33
3.3.2. Factores que influenciam as vítimas mortais.....	34

3.3.3. Parâmetros que influenciam o número de feridos	35
3.4. Perdas em função do colapso de edifícios [Coburn & Spence, 1992]	36
3.5. Metodologia FEMA & NIBS [1999].....	43
3.5.1. Enquadramento	43
3.5.2. Estimativa de perdas humanas.....	44
3.5.2.1. Dados	44
3.5.2.2. Modelo e Resultados.....	45
3.5.3. Estimativa de desalojados.....	47
3.5.3.1. Dados	47
3.5.3.2. Modelo e Resultados.....	47
3.5.4. Estimativa das necessidades de abrigos temporários.....	48
3.5.4.1. Dados	48
3.5.4.2. Modelo e Resultados.....	49
3.6. Metodologias desenvolvidas para regiões específicas do Globo	49
3.6.1. Turquia [Gulkan <i>et al.</i> , 1992]	49
3.6.2. China [Yang <i>et al.</i> , 1992]	51
3.6.3. Arménia [Murakami, 1992].....	52
4. SIMULAÇÃO DAS PERDAS HUMANAS NO SISMO DA TERCEIRA DE 1980.	54
5. ANÁLISE CRÍTICA DAS METODOLOGIAS.....	61
5.1. Enquadramento.....	61
5.2. Módulo da acção sísmica	61
5.3. Módulo da vulnerabilidade do edificado.....	63
5.4. Módulo da vulnerabilidade humana.....	66
5.5. Módulo dos danos	66
5.6. Módulo das perdas humanas	68
6. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS.....	72
ANEXO A – VALORES DE DEFEITO DA METODOLOGIA FEMA & NIBS [1999] PARA A ESTIMATIVA DAS PERDAS HUMANAS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Igreja de S. Nicolau [França, 1977].....	7
Figura 2.2 – Danos no edificado de Benavente.	9
Figura 2.3 – Colapso parcial de um edifício nos Açores [Oliveira <i>et al.</i> , 1992].....	11
Figura 2.4– Danos no edificado de Leninakan, Arménia [Academy of Science of U.S.S.R, 1996].....	13
Figura 2.5 – Danos em edifícios do distrito da Marina, São Francisco [USGS, 2001c]...	14
Figura 2.6 – Rotura de pilares na ponte Mission and Gothic, em Northridge [USGS, 2001b].	15
Figura 2.7 – Incêndio provocado pelo sismo de Kobe, Japão [Geotechnical Collection, 2000].....	17
Figura 2.8 – Epicentro e isossistas do sismo dos Açores de 9 de Julho de 1998 [Nunes, 1998].	19
Figura 2.9 – Contraste entre uma construção reforçada (esquerda) e o colapso total da construção vizinha (direita), Espalhafatos - Faial.....	20
Figura 2.10 – Efeito da liquefacção na Turquia [Vaz & Rodrigues, 1999].	21
Figura 2.11 – Danos no edificado de Menidi [Fardis & Bousias, 1999].....	23
Figura 2.12 – Danos no edificado de Taipei, Taiwan [Geocities, 2001].....	24
Figura 2.13 – Deslizamento da encosta de Santa Tecla em El Salvador [EERI, 2001]. ...	25
Figura 2.14 – Colapso total de estruturas em Las Colinas, El Salvador [NBC, 2001].....	25
Figura 3.1 – Causas de morte em sismos ocorridos entre 1900 e 1992 [adaptado de Coburn & Spence, 1992]	27
Figura 3.2 – Relação entre o número de vítimas mortais e o número de edifícios severamente danificados [adaptado de Coburn & Spence, 1992].	28
Figura 3.3 – Razão de mortos em função do factor de danos [adaptado de McCormack & Rad, 1997].	32
Figura 3.4 – Correlação aproximada entre a qualidade ou vulnerabilidade dos edifícios e a taxa de mortos, dependendo da intensidade MM do sismo. Tipologia dos edifícios: A = Adobe e alvenaria de pedra; B = Alvenaria de tijolo não reforçada; C = Estrutura de betão armado (BA) com 2,5% g; D = BA com 6% g; E = BA com 20% g. Correlação válida para edifícios moderadamente irregulares e para solos intermédios [Tiedemann, 1990].	35

Figura 3.5 – População por edifício (P/B) [adaptado de Coburn & Spence, 1992].	38
Figura 3.6 – Taxa de ocupação no instante do sismo [adaptado de Coburn & Spence, 1992].	39
Figura 3.7 – Modelo em árvore de eventos para o cálculo da probabilidade de ocupantes mortos em consequência de sismos [adaptado do FEMA & NIBS, 1999].	46
Figura 4.1 – Estimativa do número de mortos e feridos para o parque habitacional e população residente no Grupo Central do Arquipélago dos Açores à data do sismo de 1980.	56
Figura 4.2 – Estimativa do número de mortos e feridos para o parque habitacional e população residente no Grupo Central do Arquipélago dos Açores à data dos Censos 91.	57
Figura 4.3 – Estimativas do número de mortos para os elementos em risco em 1980 e em 1991 no Grupo Central do Arquipélago dos Açores.	59
Figura 5.1 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia ATC 13.	62
Figura 5.2 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia Tiedemann.	62
Figura 5.3 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia Coburn & Spence.	63
Figura 5.4 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia FEMA & NIBS.	64

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Perdas humanas em sismos históricos de Portugal Continental.	4
Quadro 2.2 – Perdas humanas e económicas em sismos severos recentes	5
Quadro 2.3 – Situação do parque habitacional após o sismo de 1980 [Lucas <i>et al.</i> , 1992].	11
Quadro 2.4 - Causas de morte no sismo de Kobe [adaptado de Yamazaki <i>et al.</i> , 1996].	18
Quadro 2.5 – Comparação dos sismos de Northridge e Kobe [adaptado de Pomonis & Williams, 1998].....	18
Quadro 3.1 – Relação entre o estado de danos e os factores de danos [adaptado do ATC, 1985].	30
Quadro 3.2 – Percentagem de mortos e feridos em função do estado de danos da construção [adaptado do ATC, 1985].	31
Quadro 3.3 – M3: Percentagem média de ocupantes aprisionados devido ao colapso de edifícios de alvenaria com n.º de pisos inferior a 3 [adaptado de Coburn & Spence, 1992].	40
Quadro 3.4 – M4: Distribuição dos feridos devido ao colapso de edifícios (% de ocupantes aprisionados) [adaptado de Coburn & Spence, 1992].	41
Quadro 3.5 – M5: Percentagem de sobreviventes aprisionados em edifícios colapsados que morrem posteriormente [adaptado de Coburn & Spence, 1992].....	42
Quadro 3.6 –Escala de gravidade de ferimentos [adaptado de FEMA & NIBS, 1999].	45
Quadro 3.7 – Razão entre o número de mortos e o de edifícios colapsados [adaptado de Gulkan <i>et al.</i> , 1992].....	50
Quadro 3.8 – Razão entre o número de mortos e o de feridos [adaptado de Gulkan <i>et al.</i> , 1992].	50
Quadro 3.9 – Coeficiente C e tipologia do edificado [adaptado de Gulkan <i>et al.</i> , 1992].	50
Quadro 3.10 – Relação entre o nível e o índice de danos e as perdas humanas e económicas [adaptado de Yang <i>et al.</i> , 1992].	51
Quadro 4.1 – Valores dos factores que afectam o potencial de mortalidade (M1) do modelo de Coburn & Spence utilizados na presente simulação.	58

Quadro A.1 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos ligeiros).	80
Quadro A.2 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos moderados).	81
Quadro A.3 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos severos).	81
Quadro A.4 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos perdas totais – colapso parcial).	81
Quadro A.5 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos perdas totais – colapso total).	82
Quadro A.6 – Probabilidade de colapso no estado limite de danos perdas totais (%).	82

METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO DE PERDAS HUMANAS EM CONSEQUÊNCIA DE SISMOS

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

Os sismos são fenómenos naturais que apenas poderão ter consequências desastrosas se afectarem uma região habitada do globo. Sem dúvida que os piores efeitos de um desastre sísmico são as perdas de vida humana envolvidas [Coburn & Spence, 1992].

A redução das perdas de vidas humanas é assim um dos grandes objectivos das políticas de prevenção e protecção sísmica e do domínio de investigação da engenharia sísmica.

Para se ter uma ideia da dimensão do problema refira-se que apenas no século XX (entre 1900 e o fim de 1992), o montante oficial de vítimas mortais em 1 100 sismos muito severos, atingiu o total de 1 528 000. Perto de metade deste número de vítimas ocorreu num único país, a China, e as principais contribuições para este montante decorreram de um pequeno número de sismos, ou seja, apenas 21 eventos catastróficos do século XX causaram cerca de um milhão de vítimas mortais [Coburn & Spence, 1992].

É provável porém que o número real de vítimas mortais de sismos do século XX seja superior aos 1,5 milhões referidos, pois neste número não foram contabilizados os mortos causados por sismos pouco severos. Além disso, neste número não estão incluídas as vítimas de cerca de uma centena de sismos severos por não existirem dados oficiais [Coburn & Spence, 1992].

De facto, existe uma grande imprecisão na avaliação do número de vítimas em consequência de sismos o que dificulta a compilação de estatísticas fiáveis e o desenvolvimento de modelos de previsão de perdas humanas para um dado cenário sísmico. Assim, as estimativas decorrentes dos modelos de avaliação de perdas humanas serão sempre afectadas por um elevado grau de incerteza.

1.2. Situação em Portugal

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. Na secção 2.12 serão apresentadas com maior detalhe as perdas humanas ocorridas em sismos históricos que afectaram Portugal Continental.

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

Para além disso, o estado actual dos conhecimentos sobre a acção sísmica que afecta o País e a existência de construções não dimensionadas para resistir aos sismos, indicam que parte da população portuguesa vive em situações de risco sísmico considerável [Sousa *et al.*, 2000].

Face ao elevado custo das medidas de prevenção e intervenção de emergência, torna-se necessário desenvolver e aplicar, em Portugal, metodologias para a avaliação de perdas humanas, para que possam ser tomadas medidas com o intuito de minimizar o risco sísmico nacional, e que sejam consistentes com as realidades de cada local em estudo, nomeadamente, com a localização geográfica, a geologia local e as características tipológicas do edificado.

1.3. Âmbito e objectivos do estudo

O presente relatório, elaborado no âmbito do projecto de investigação para a Fundação para a Ciência e a Tecnologia intitulado “Mitigação do Risco Sísmico em Portugal”, descreve as actividades desenvolvidas no Grupo de Estudos e Equipamentos de Engenharia Sísmica do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, inseridas nas seguintes tarefas e sub-tarefa:

T1 – Avaliação da casualidade e do risco sísmico do território Continental

T1.6 – Danos no edificado e humanos

Os objectivos principais do trabalho apresentado compreendem: (i) uma compilação da informação sobre perdas humanas em sismos históricos de Portugal e

em sismos severos recentes. (ii) a apresentação e análise crítica das principais metodologias de avaliação de perdas humanos em consequência de sismos e (iii) uma aplicação das metodologias FEMA & NIBS [1999], Coburn & Spence [1992] e Tiedemann [1990 e 1992], ao parque habitacional e população residente do Grupo Central do Arquipélago dos Açores.

Desta forma fundamenta-se a escolha da metodologia a utilizar na execução do terceiro dos resultados verificáveis desta tarefa, que consiste, de acordo com o Plano de Trabalhos, na avaliação probabilística do número de mortos, feridos e desalojados por unidade geográfica e tipologia construtiva.

2. PERDAS HUMANAS EM CONSEQUÊNCIA DE SISMOS

2.1. Introdução

As descrições das perdas humanas em consequência de sismos constituem ensinamentos importantes para minorar os efeitos de sismos futuros em Portugal.

Para tal pretende descrever-se neste capítulo as perdas humanas ocorridas em alguns sismos históricos que afectaram Portugal Continental, e também as perdas humanas que ocorreram em sismos severos recentes a nível mundial e nos mais significativos, e também recentes, a nível nacional.

Cada sismo é caracterizado pela sua data, instante de ocorrência, localização hipocentral e magnitude. Quando possível faz-se uma breve referência à vulnerabilidade das estruturas afectadas. Finalmente cada secção é encerrada com a especificação das perdas humanas e económicas publicadas na literatura nacional e internacional. No caso dos sismos severos recentes especifica-se também as perdas económicas.

Nos quadros 2.1 e 2.2 apresentam-se uma síntese das perdas humanas e económicas ocorridas nos sismos históricos de Portugal Continental e em sismos severos recentes.

Quadro 2.1 – Perdas humanas em sismos históricos de Portugal Continental.

<i>Sismo</i>		<i>Epicentro</i>	<i>M_L</i>	<i>Perdas Humanas</i>		<i>Fontes</i>
<i>Local</i>	<i>Data</i>			<i>Mortos</i>	<i>Feridos</i>	
Lisboa	26-Jan-1531	Vale inferior do Tejo	7,0	Várias centenas de milhar	-	Henriques <i>et al.</i> , 1988 Senos <i>et al.</i> , 1994 Oliveira, 1988
Gorringe	1-Nov-1755	Gorringe ou margem SW de Portugal Continental	8,5 - 8,75	10 000 - 18 000 em Lisboa	-	Baptista <i>et al.</i> , 1998 França, 1977
Setúbal	11-Nov-1858	Ao largo de Setúbal	7,0 - 7,2	8	-	Moreira, 1984 Senos <i>et al.</i> , 1994
Benavente	23-Abr-1909	Vale inferior do Tejo	7,0	46	75	Senos <i>et al.</i> , 1994 Choffat <i>et al.</i> , 1913

Quadro 2.2 – Perdas humanas e económicas em sismos severos recentes.

Sismo		Epicentro		M _L	Perdas Humanas			Perdas Económicas (10 ⁶ USD\$)	Fontes
Local	Data	Latitude	Longitude		Mórtos	Feridos	Desalojados		
Açores - Terceira	01-Jan-80	38,75°N	27,75°W	7,2	63	> 400	21 296	200	Oliveira <i>et al.</i> , 1992 Lucas <i>et al.</i> , 1992
Arménia - Spitak	07-Dez-88	40,98°N	44,18°E	6,9	25 000	15 000 - 19 000	> 500 000	14 200	Members.TheGlobe, 1988 USGS, 2001c
Loma Prieta	17-Out-89	37,04°N	121,88°W	7,1	62	> 3 700	12 000	5 000 - 10 000	EQE International, 2000a USGS, 2001c
Northridge	17-Jan-94	34,22°N	118,53°W	6,4	57	> 8 000	20 000	15 000 - 30 000	Eguchi <i>et al.</i> , 1997 Oliveira <i>et al.</i> , 1995
Japão - Kobe	17-Jan-95	34,58°N	135,02°E	7,2	> 5 500	> 43 000	300 000	150 000	Berz, 1988 EQE International, 2000b USGS, 2001c
Açores - Faial, Pico e S. Jorge	09-Jul-98	38,65°N	28,62°W	5,8	8	150	1 600	> 75	Oliveira <i>et al.</i> , 1998 www.reconstrucao.com, 1999
Turquia - Izmit	17-Ago-99	40,75°N	29,86°E	7,4	> 17 000	50 000	600 000	3 000 - 6 500	USGS, 2001a e b Vaz & Rodrigues, 1999
Grécia - Atenas	07-Set-99	38,11°N	23,60°E	5,9	143	1 600	50 000	655	Fardis & Bousias, 1999 USGS, 2001d
Taiwan - Chichi	20-Set-99	23,77°N	120,98°E	7,6	2 400	8 700	600 000	14 000	USGS, 2001d Geocities, 2001
El Salvador	13-Jan-01	14,06°N	88,79°W	7,6	> 700	2 500 - 3 000	> 46 000	1 000	USGS, 2001e Expresso, 2001

2.2. Sismos históricos em Portugal Continental

2.2.1. Sismo de 26 de Janeiro de 1531

A publicação intitulada “Sismicidade de Portugal. O sismo de 26 de Janeiro de 1531” [Henriques *et al.*, 1988] é um trabalho de compilação e análise de informação histórica, dedicado exclusivamente a este sismo. A descrição do sismo que a seguir se efectua baseia-se essencialmente na informação recolhida nesse trabalho.

O início do ano de 1531 foi uma época de grande actividade sísmica em Portugal. Culminou com um importante abalo, a 26 de Janeiro pelas 4h ou 5h da madrugada que gerou pânico em Lisboa. A maioria dos autores inclina-se para localizar o epicentro deste sismo no vale inferior do Tejo, pois as descrições de danos mais graves referem-se a esta região. A magnitude macrossísmica do sismo de 1531 foi estimada em 7,0 [Senos *et al.*, 1994]. O sismo foi seguido de várias réplicas no próprio dia do choque principal e nas semanas seguintes [Henriques *et al.*, 1988].

A informação existente sobre o sismo de 1531 relativamente à cidade de Lisboa é bastante abundante e pormenorizada devido à importância desta cidade no contexto socio-económico da época. A zona da cidade mais afectada pelo evento estende-se desde Belém ao Terreiro do Paço, entrando pelo vale do Rossio e encosta do Castelo.

Os danos foram elevados, afectando cerca de 25% das casas de Lisboa, tendo colapsado aproximadamente 10% [Oliveira, 1988].

O número de mortos é difícil de estimar devido à ausência de coerência dos relatos históricos sobre esta matéria. Henriques [Henriques *et al.*, 1988] são da opinião que “várias centenas milhares de pessoas, entre mortos e feridos, terão sido vítimas do abalo”.

Por ter havido uma grande actividade premonitória, nos dias que antecederam o abalo de 26 de Janeiro, o número de vítimas humanas do sismo pode ter sido reduzido. Com efeito, as descrições da época referem que as populações começaram a abandonar as suas casas para procurar lugares mais seguros, fora da cidade, à medida que iam tendo conhecimento da ocorrência dos fenómenos premonitórios [Oliveira, 1988].

2.2.2. Sismo de 1 de Novembro de 1755

O sismo de 1755 também conhecido pelo *Terramoto de Lisboa* ocorreu no dia 1 de Novembro, sábado, dia de Todos os Santos.

Até há poucos anos atrás, dada a distribuição espacial dos danos, as descrições do movimento sentido e os tempos de chegada do tsunami, o epicentro deste sismo era localizado a cerca de 150 km a SW do Cabo de S. Vicente e a sua magnitude macrossísmica em valores entre 8,5 e 8,75. Mais recentemente, o epicentro do sismo de 1755 tem sido localizado mais próximo do Continente, na margem sudoeste do território de Portugal Continental [Baptista *et al.*, 1998].

O choque principal ocorreu cerca das 9h 40m e foi constituído essencialmente por três impulsos. A primeira réplica bastante violenta, mas de menor duração que o choque principal, registou-se às 11h. Nos primeiros oito dias sentiram-se 28 réplicas e até Setembro de 1756 tiveram lugar 500 réplicas.

O sismo 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. Os efeitos deste sismo sobre Lisboa encontram-se bem documentados em inúmeras publicações, muitas das quais compiladas no trabalho de de Sousa [Pereira, 1919-1932].

Na época existiam em Lisboa, cerca de 20 000 edifícios de habitação que albergavam perto de 38 000 famílias. Segundo testemunhos da época, 12 000 edifícios sofreram grandes danos e 2 000 ficaram completamente destruídos ou pelo sismo ou pelo incêndio que se lhe seguiu. Uma grande percentagem da população perdeu a vida nas igrejas (ver figura 2.1) que se encontravam cheias à hora do sismo, pois era o dia de Todos os Santos [Moreira, 1984].



Figura 2.1 – Igreja de S. Nicolau [França, 1977].

Das quarenta igrejas existentes em Lisboa, dezasseis desmoronaram-se ou arderam, dezanove ficaram reduzidas a ruínas e as cinco restantes danificadas [França, 1977].

No resto do país a descrição dos efeitos do sismo também se encontra bem documentada, visto que foi o primeiro evento sobre o qual se efectuou um inquérito macrossísmico com bases científicas, elaborado de uma forma bastante rigorosa para a época. A cidade de Faro ficou totalmente em ruínas, sendo elevada a percentagem da população morta, atribuindo-se-lhe o grau X da escala de Mercalli Modificada de 1956. O mesmo grau de intensidade foi atribuído às localidades de Sagres, Lagoa, Silves, Faro, Portimão e Lagos.

No sul de Espanha também houve grandes danos, mas não tão severos. Para o norte de Lisboa, as intensidades sentidas foram inferiores.

França [1977] apresenta no seu livro, estimativas de vítimas mortais para a cidade de Lisboa, propostas por diferentes autores. Por exemplo, cartas escritas de Lisboa, pouco depois do acontecimento, relatam 70 mil mortos. Para Núncio, as perdas em vidas humanas teriam atingido o número de 40 mil. Outras fontes como o Padre António Pereira e o Manuel Portal [1756], calculam o número de vítimas entre 12 e 15 mil. Segundo Frei António do Sacramento [1757] morreram nas ruínas e incêndios mais de 18 000 pessoas. Moreira de Mendonça [1758], calcula em 5 000 o número dos que morreram durante o evento e em 5 000 também os que vieram a morrer posteriormente em consequência de ferimentos. Este valor dado por Moreira de Mendonça aproxima-se do que foi dado pelo Marquês de Pombal imediatamente a seguir ao sismo [França, 1977].

Como se verifica é muito difícil obter uma estimativa das perdas humanas em sismos históricos, mesmo quando a informação se cinge à capital do país.

2.2.3. Sismo de 11 de Novembro de 1858

O sismo de 11 de Novembro de 1858 ocorreu pelas 7h 15m, com o epicentro situado no mar, ao largo de Setúbal. A intensidade máxima que se lhe atribui é de IX na escala de Mercalli Modificada [Moreira, 1984] e a sua magnitude macrossísmica foi estimada entre 7,0 e 7,2 [Senos *et al.*, 1994].

O evento foi precedido por sismos premonitores que tiveram o seu início cerca das 6 h da madrugada e seguido de réplicas pouco importantes.

Moreira [1984] descreveu os danos que ocorreram em Setúbal, no resto do país e em Espanha. A parte ocidental da cidade de Setúbal foi a mais afectada, mas os estragos foram importantes por toda a cidade, tendo ocorrido 6 mortos e um número elevado de feridos. Em Lisboa, muitos edifícios ficaram em ruínas, causando uma vítima mortal, tal como em Vila Franca de Xira.

O abalo causou também alguns estragos noutras localidades, como são exemplo, Palmela, Azeitão, Alcobaça, Óbidos, Coimbra, Viseu e Alcácer do Sal.

2.2.4. Sismo de 23 de Abril de 1909

No dia 23 de Abril de 1909, às 17h 04m, o Continente Português foi abalado pelo sismo mais importante deste século. A região epicentral onde foram observados estragos mais importantes situa-se predominantemente a Sul do Tejo. De acordo com Senos [Senos *et al.*, 1994] a magnitude macrossísmica deste sismo estima-se em cerca de 7,0, o seu foco, bastante superficial, situa-se a cerca de 4 km de profundidade e o seu epicentro localiza-se a 38° 57' N e a 8° 46' W. O evento teve uma duração de 22 segundos.

Ocorreram várias réplicas deste sismo no próprio dia e nos meses seguintes, tendo sido sentidos 246 abalos no vale do Tejo entre 24 de Abril de 1909 e 10 de Setembro de 1910.

Os efeitos catastróficos do sismo atenuaram rapidamente com a distância, facto esse ligado à relativa superficialidade do foco [Oliveira, 1988].

Relativamente aos danos registados em Lisboa, a parte oriental da cidade foi a mais danificada pelo evento. Nas localidades de Benavente e S^{to}. Estêvão, os efeitos do sismo foram catastróficos, na medida em que a razão entre o número de edifícios que sofreram estragos ou ruína e o número de edifícios existentes, atingiu valores próximos da unidade: 1:1 e 1:1,4, respectivamente (ver figura 2.2).



Figura 2.2 – Danos no edificado de Benavente.

Em Benavente, 190 edifícios ficaram habitáveis mediante ligeiras reparações, 380 necessitaram de reparações importantes e igual número, teve que ser demolido.

Em S^{to} Estêvão, dos 207 fogos existentes, 11 ficaram habitáveis, 35 necessitaram de reparações e 161 ficaram em ruínas [Choffat *et al.*, 1913].

O evento provocou 46 mortos e 75 feridos, todos na região epicentral [Moreira, 1984]. Em Benavente, o sismo vitimou cerca de 30 pessoas ($\approx 65\%$ do total das vítimas) e 38 feridos ($\approx 50\%$), sendo sem dúvida, a localidade mais afectada pelo evento de 1909.

2.3. Sismo dos Açores – Ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa (1 de Janeiro de 1980)

O sismo de 1 de Janeiro de 1980 foi sentido fortemente nas ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa, do Arquipélago dos Açores, tendo as duas primeiras sido as mais afectadas [Nunes *et al.*, 1992]. O evento ocorreu às 15h 40m locais e o seu hipocentro teve lugar a $38,75^\circ$ de latitude Norte, $27,75^\circ$ de longitude Oeste, a 10 km de profundidade, tendo uma duração de 28 segundos [Oliveira *et al.*, 1992].

De Março a Dezembro de 1980, foram registados pela rede sísmica do Arquipélago dos Açores, cerca de 378 eventos, dos quais 19 foram sentidos pela população [Nunes *et al.*, 1992].

Pela sua localização e magnitude, 7,2 na escala de Richter, o evento causou danos em cerca de 80% dos edifícios, da cidade Angra do Heroísmo [Soeiro, 1992].

Uma das causas principais que levou ao colapso de tão grande número de habitações residiu na elevada vulnerabilidade da construção tradicional Açoreana, em que as paredes mestras são constituídas por duas paredes de pedra (não aparelhada) com argamassa de barro, e em que o núcleo central é preenchido com godo solto (ver figura 2.3) [Soeiro, 1992].

Os edifícios que resistiram ao sismo foram os de pequeno porte, com estrutura de betão armado e preenchimento de paredes com blocos de betão [Soeiro, 1992].

O parque habitacional do Arquipélago dos Açores, assim como edifícios de elevado valor patrimonial foram gravemente atingidos, tendo sido afectados para cima de 12 mil edificações, das quais perto de 5 000 atingiram o colapso total [Lucas *et al.*, 1992].



Figura 2.3 – Colapso parcial de um edifício nos Açores [Oliveira et al., 1992].

No quadro 2.3 apresentam-se os danos no parque habitacional distribuídos pelas três ilhas mais afectadas do Arquipélago.

Quadro 2.3 – Situação do parque habitacional após o sismo de 1980 [Lucas et al., 1992].

<i>Ilhas</i>	<i>Habitações existentes em 1970</i>	<i>Habitações destruídas</i>	<i>Habitações danificadas</i>	<i>Habitações atingidas</i>	<i>Habitações sem danos</i>
Terceira	19 075	4 726	7 173	11 899	7 176
São Jorge	4 829	574	1 424	1 998	2 831
Graciosa	2 991	152	1 478	1 630	1 361
Total das três ilhas	26 895	5 452	10 075	15 527	11 368

Das cerca de 25 000 habitações existentes, mais do que 1/3 foram danificadas e um pouco menos de 1/5 ficou em ruínas. No conjunto das três ilhas, a mais afectada foi a ilha Terceira em que cerca de 62% do parque foi atingido. A ilha Graciosa, apesar de registar um pequeno número de construções destruídas (5%), também apresentou, tal como a ilha Terceira, uma percentagem elevada de edifícios afectados (55%) [Lucas *et al.*, 1992].

Sessenta e três pessoas perderam a vida, mais de 400 pessoas ficaram feridas e cerca de 21 000 pessoas ficaram desalojadas, devido ao colapso total ou danificação importante da construção tradicional das ilhas mais próximas do epicentro, ou seja, Terceira, São Jorge e Graciosa [Oliveira *et al.*, 1992].

Tendo por base valores de 1980 e antes de se ter efectuado um primeiro levantamento do danos, falava-se de perdas globais de 5 milhões de contos. Em Fevereiro do mesmo ano, o segundo relatório do Gabinete de Apoio e Reconstrução (GAR) atribuía 16 milhões de contos à recuperação dos prejuízos. Em 1982 as

previsões apontavam já para 24,6 milhões de contos, sendo 21,12 destinados à habitação, 3,12 ao património e 0,36 às actividades económicas [Lucas *et al.*, 1992].

Em 1990, os resultados apresentavam-se um pouco diferentes, na ordem dos 50 milhões de contos ($\approx 200 \times 10^6$ US\$). Comparando os 50 milhões com os 35 a 40 milhões de contos do orçamento do Plano de 1992, para toda a Região Autónoma dos Açores, verifica-se que o valor deste último é cerca de dois terços do valor do impacto do sismo [Lucas *et al.*, 1992].

2.4. Sismo da Arménia - Spitak (7 de Dezembro de 1988)

No dia 7 de Dezembro de 1988, pelas 11h 41m locais, um sismo de magnitude 6,9 na escala de Richter, sacudiu o noroeste da Arménia, logo seguido por outro sismo de magnitude 5,8. Outras tantas réplicas, por vezes com magnitude superior a 5,0 continuaram a abalar a área ao redor de Spitak, durante vários meses [Members.TheGlobe, 2002].

O hipocentro localizou-se numa vila da montanha de Shirokamud, com a longitude de 44,18° E, a latitude de 40,98° N e a profundidade de 5 km. O sismo provocou danos num raio de 80 km e atingiu os povoamentos de Gyumri, Spitak, Stepanavan e Kirovakan na República Soviética da Arménia, sendo considerado como o maior desastre sísmico local do século XX [Members.TheGlobe, 2002].

Mais de metade das estruturas da cidade de Leninakan foram danificadas ou destruídas. O sismo destruiu cerca de 5 100 edifícios na cidade de Spitak. Um número elevado de instalações médicas foram destruídas, vitimando cerca de 80% dos profissionais de saúde [Members.TheGlobe, 2002].

Muitos factores contribuíram para os efeitos nefastos do desastre, entre os quais se destacam, as baixas temperaturas da época do ano, a hora do dia, o tipo de solo e a vulnerabilidade das construções.

Neste sismo, tanto as deficiências dos projectos como as técnicas de construção, foram as principais causas do número de colapsos (ver figura 2.4), provocando assim um número elevado de mortos. As construções mais danificadas foram os pórticos de betão pré-fabricados e os edifícios de alvenaria [Murakami, 1992].

Apesar da magnitude não ter sido muito elevada, o sismo causou danos humanos elevados: 25 000 mortos, 15 a 19 000 feridos e mais de 517 000 desalojados, num total de 589 000 habitantes [Members.TheGlobe, 2002].



Figura 2.4– Danos no edifício de Leninakan, Arménia [Academy of Science of U.S.S.R, 1996].

Na época, as perdas económicas directas estimaram-se em $14,2 \times 10^9$ US\$ [Members.TheGlobe, 2002].

2.5. Sismo de Loma Prieta (17 de Outubro de 1989)

No dia 17 de Outubro de 1989, pelas 17h 04m locais um sismo de magnitude 7,1 na escala de Richter, afectou severamente a cidade de São Francisco e as regiões da Baía de Monterey. O epicentro teve lugar próximo do pico de Loma Prieta, nas montanhas de Santa Cruz, aproximadamente a 14 km de Santa Cruz e a 96 km de São Francisco.

O evento localizou-se a $37,04^\circ$ N de latitude e a $121,88^\circ$ W de longitude, com uma profundidade de 18 km. A ruptura estendeu-se por 35 km ao longo da falha, mas sem grande expressão à superfície [USGS, 2001c].

Na semana seguinte ao sismo principal, foram registados cerca de 300 sismos de magnitude igual ou superior a 2,5 e 20 eventos com magnitude superior a 4,0.

Os cientistas já tinham previsto um possível sismo nesta área, sendo considerada de risco sísmico elevado [EQE International, 2000a].

Entre as regiões e estruturas mais afectadas, destaque-se os colapsos registados em Oakland, na ponte da Baía de São Francisco, em edifícios do distrito da Marina

em São Francisco (ver figura 2.5) e em várias estruturas no povoamento de Santa Cruz. Mais de 18 000 habitações foram danificadas e 963 completamente destruídas [EQE International, 2000a].



Figura 2.5 – Danos em edifícios do distrito da Marina, São Francisco [USGS, 2001c].

O número total de vítimas mortais estimou-se em 62, um número notavelmente baixo dada a duração e severidade do sismo. Pelo menos 3 700 pessoas ficaram feridas e 12 000 desalojadas.

Os danos e a interrupção de negócios foram calculados em 10×10^9 US\$, com custos directos na ordem dos $6,8 \times 10^9$ US\$ [EQE International, 2000a].

2.6. Sismo de Northridge – Los Angeles (17 de Janeiro de 1994)

O sismo de Northridge ocorreu na parte Norte da Área Metropolitana de Los Angeles, Califórnia, às 4h 31m (hora local do Pacífico) do dia 17 de Janeiro de 1994, dia de feriado nacional, com o hipocentro localizado a $34^\circ 13' N$ e $118^\circ 32' W$ e com uma profundidade focal de cerca de 19 km [Oliveira *et al.*, 1995].

A magnitude de Richter do evento foi de 6,4, e a duração das vibrações mais intensas entre 15 e 20 segundos, dependendo da distância epicentral e das condições geológicas locais [Oliveira *et al.*, 1995].

Logo após o sismo foi instalada uma rede portátil, com 75 instrumentos de várias organizações, que detectou mais de 1 500 réplicas nos primeiros 5 dias. A maior das réplicas ocorreu às 15h 33m do próprio dia, com uma magnitude de 6,0 e com um mecanismo semelhante ao do sismo principal [Oliveira *et al.*, 1995].

Os registos dos movimentos sísmicos intensos indicam que foram excedidos os níveis usados nos projectos correntes de engenharia, apontando alguns estudos para um valor duplo do regulamentar [Oliveira *et al.*, 1995].

O evento foi sentido numa área de cerca de 230 000 km², incluindo o Sul da Califórnia, o Sudoeste do Nevada, o Oeste do Arizona e o Noroeste do México.

Embora a maior parte dos danos tenha ocorrido em estruturas antigas, houve alguns casos de estruturas recentemente construídas em que ocorreram colapsos generalizados. As obras de arte foram igualmente afectadas, sete das quais sofreram colapso parcial e outras 170 sofreram alguns danos, desde fissuração ligeira de elementos até ao assentamento de aterros nos encontros [Oliveira *et al.*, 1995]. Das 57 vítimas mortais resultantes do evento sísmico, 46 ocorreram em vias de comunicação devido ao colapso de pontes e viadutos (ver figura 2.6).



Figura 2.6 – Rotura de pilares na ponte Mission and Gothic, em Northridge [USGS, 2001b].

A eficácia da utilização de diversas técnicas de reforço, assim como do chamado isolamento-de-base foi, em muitos casos, evidente, apresentando essas estruturas um comportamento muito satisfatório [Oliveira *et al.*, 1995].

Apesar do movimento vibratório ter atingido valores de aceleração elevados, o comportamento sísmico da maioria das estruturas revelou-se bom, principalmente quando comparado com o que se tem passado noutros locais do Globo sujeitos a sismos de igual intensidade, denotando um certo sucesso dos programas para mitigação dos riscos sísmicos nos Estados Unidos e em particular no Estado da Califórnia [Oliveira *et al.*, 1995].

As construções que maiores danos evidenciaram neste sismo foram as de 2 a 3 andares em “stucco” (madeira), 3 a 5 andares em pórtico de betão armado, e 5 a 8 andares em estruturas mistas de betão armado [Oliveira *et al.*, 1995].

A ocorrência de alguns colapsos de estruturas mais recentes pode ser quase sempre atribuída a uma má concepção estrutural ou à não conformidade entre a execução da obra e o projecto.

Em consequência do sismo de Northridge, surgiram várias tecnologias, com o intuito de melhorar a gestão de emergência, entre as quais se destacam, as técnicas para estimar perdas recorrendo a sistemas de informação geográfica e de satélite [Eguchi *et al.*, 1997].

O sismo de Northridge marcou também a primeira oportunidade para testar o sucesso da aquisição de dados sobre danos e emergência, transmitidos e processados em tempo real ou quase real. Estes dados consistiram na avaliação da magnitude, localização do epicentro e distribuição das intensidades, conduzindo a estimativas de perdas, incluindo projecções sobre o número de vítimas, feridos, evacuação das populações e perdas financeiras provenientes das vibrações e dos incêndios [Oliveira *et al.*, 1995].

O número total de vítimas mortais estima-se em 57, existindo mais de 8 000 feridos e 20 000 desalojados, sendo a população mais afectada a das classes mais desfavorecidas, num total de 7 milhões de habitantes [Oliveira *et al.*, 1995].

As estimativas de perdas totais, feitas em meados de Fevereiro de 1994, apontavam para valores de 15×10^9 US\$, tendo o Estado da Califórnia apresentado um impacto económico total da ordem dos 30×10^9 US\$, perto do valor do Orçamento Geral do Estado Português para 1994. Os prejuízos na indústria e no comércio foram também surpreendentemente elevados, para os quais contribuíram os longos períodos de interrupção das actividades [Oliveira *et al.*, 1995].

2.7. Sismo do Japão - Kobe (17 de Janeiro de 1995)

O sismo de Hyogoken Nanbu, mais conhecido por sismo de Kobe, foi um dos mais violentos que alguma vez atingiu uma cidade moderna, industrializada e com um número elevado de habitantes: cerca 1,5 milhões de pessoas. A catástrofe não era aguardada pelas autoridades japonesas uma vez que a área onde ocorreu sofrera pouca actividade sísmica nos últimos anos, quando comparada com outras zonas do Japão.

O sismo de Kobe, ocorreu às 5h 46m locais e teve uma magnitude de 7,2 na escala de Richter. O evento localizou-se a $34,58^\circ$ N de latitude e a $135,02^\circ$ E de longitude [USGS, 2001c], tendo o movimento sísmico durado cerca de 20 segundos.

Os danos verificaram-se, principalmente, num raio de 100 km em torno do epicentro, incluindo cidades como Kobe, Osaka e Kyoto, sendo a de Kobe aquela que sofreu os danos mais severos.

A magnitude elevada e a proximidade do epicentro de centros urbanos densamente povoados ajudam a explicar o elevado nível de destruição e a severidade dos danos humanos: cerca de 5 500 mortos e 43 177 feridos. Cerca de 180 000 edifícios ficaram danificados ou destruídos e mais de 300 000 pessoas ficaram desalojadas na noite do sismo [EQE International, 2000b].

A maior parte da população estava a dormir, daí que 78,9% das mortes tenha ocorrido em consequência de danos nas construções. Mais concretamente em Kobe, quase 90% das perdas humanas, tiveram origem no colapso de edifícios ou em incêndios que deflagraram na sequência do sismo (ver figura 2.7). No entanto, estima-se que caso o sismo tivesse ocorrido duas a quatro horas mais tarde, as perdas seriam ainda mais elevadas.



Figura 2.7 – Incêndio provocado pelo sismo de Kobe, Japão [Geotechnical Collection, 2000].

Alguns investigadores apontam para um número ligeiramente diferente de vítimas mortais, na ordem das 6 310, das quais cerca de 5 000 foram causadas pelo colapso de edifícios [Yamazaki *et al.*, 1996].

O número de feridos continua a ser muito difícil de estimar, pois muitos não recorreram a hospitais ou não chegaram a ser realizados relatórios médicos sobre todas as ocorrências. No quadro 2.4 apresentam-se as principais causas de morte no sismo de Kobe.

As perdas humanas e os colapsos estruturais foram os mais elevados do século XX no Japão, com a exceção do sismo de Great Kanto em 1923 com 140 000 mortos.

Quadro 2.4 - Causas de morte no sismo de Kobe [adaptado de Yamazaki et al., 1996].

<i>Causas de Morte</i>	<i>Número de Mortos (%)</i>
Asfixia e compressão	4 224 (77,6)
Queimaduras e inalação de fumos	504 (9,3)
Ferimentos na cabeça e coluna	282 (5,2)
Ferimentos no organismo	55 (1,0)
Choque traumático	68 (1,2)
Cegueira	45 (0,8)
Síndrome de claustrofobia	15 (0,3)
Outros	128 (2,3)
Não identificáveis	124 (2,3)
Total	5 445 (100,0)

As perdas económicas foram estimadas em 150×10^9 US\$, as quais não incluem perdas humanas, interrupções de trabalho e perdas de produção. Grande parte das perdas económicas resultaram de danos na zona portuária de Kobe, onde praticamente todas as infra-estruturas portuárias sofreram estragos, devido a fenómenos de liquefacção, comprometendo a respectiva operacionalidade [Berz, 1988].

Comparando os efeitos do sismo de Kobe com os de Northridge, ambos com distâncias epicentrais e magnitudes aproximadas, pode afirmar-se que os primeiros foram cerca de 100 vezes mais nefastos que os segundos (ver quadro 2.5). A diferença pode estar relacionada com o tipo e idade das construções, com a qualidade dos solos, entre outros [Pomonis & Williams, 1998].

Quadro 2.5 – Comparação dos sismos de Northridge e Kobe [adaptado de Pomonis & Williams, 1998].

	<i>Northridge</i>	<i>Kobe</i>
Data de ocorrência	17/01/94	17/01/95
Hora de ocorrência (Local)	04h 31m	05h 46m
Magnitude (Mw)	6,7	6,9
Distância ao epicentro (Km)	18,5	14,3
Número de edifícios destruídos	2 396	209 043
Número de mortos	57	5 519
Número de feridos graves	568	1 883
Outros ferimentos	8 432	41 294
Estimativa das perdas económicas (10^6 USD\$)	30 000	100 000

Note-se que os valores apresentados no quadro 2.5 nem sempre coincidem com os referidos no texto e no quadro 2.4, devido à diferente origem da informação.

2.8. Sismo dos Açores – Ilhas do Faial, Pico e S. Jorge (9 de Julho de 1998)

A ilha do Faial foi atingida por um violento sismo de origem tectónica, no dia 9 de Julho de 1998, pelas 05h 19m locais, com magnitude 5,8 na escala de Richter, segundo o Instituto de Meteorologia. O hipocentro localizou-se a $28,62^{\circ}$ W de longitude e a $38,65^{\circ}$ N de latitude, a uma profundidade de 18 km, a cerca de 5 km da costa do Faial (ver figura 2.8) [Senos *et al.*, 2001].

Este evento foi precedido por um outro, às 05h 00m locais, também situado na mesma zona. Seguiram-se centenas de sismos diários, alguns com epicentros localizados muito próximos da cidade da Horta [Forjaz, 2000].



Figura 2.8 – Epicentro e isossistas do sismo dos Açores de 9 de Julho de 1998 [Nunes, 1998].

No dia do evento os sismógrafos registaram cerca de 1 350 sismos, dos quais cerca de 10% foram sentidos. No dia seguinte registaram-se cerca de 950 eventos e no terceiro dia foram registados cerca de 780 sismos [Forjaz, 2000].

Dada a fraca qualidade da construção tradicional o sismo causou danos extensos no parque habitacional tendo as infra-estruturas também sido gravemente afectadas, principalmente nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge. As ilhas do Faial e do Pico, com cerca de 32 000 habitantes e 8 720 alojamentos, viram 42% do seu parque habitacional afectado [Reconstrução, 1999]. Do parque afectado cerca de 30% necessitou de ser totalmente reconstruído.

Na figura 2.9 ilustra-se de forma eloquente o conceito de vulnerabilidade sísmica. A fotografia foi tirada na sequência do sismo do Faial de 1998 e mostra a clara diferença de vulnerabilidade de dois edifícios. Embora ambos tenham estado exposto à mesma acção sísmica, o da esquerda, reforçado recentemente, não sofreu danos, enquanto que o da direita colapsou.



Figura 2.9 – Contraste entre uma construção reforçada (esquerda) e o colapso total da construção vizinha (direita), Espalhafatos - Faial.

Este sismo causou 8 mortes em consequência do desmoronamento de casas, 150 feridos e 1 600 famílias desalojadas. Cerca de 750 edifícios foram arrasados nas três ilhas referidas e cerca de 1 000 casas necessitaram de grandes reparações [Forjaz, 2000].

Os prejuízos, incluindo os relativos a infra-estruturas rodoviárias, estimam-se na ordem dos 23 milhões de contos ($\approx 75 \times 10^6$ US\$), equivalentes a $\approx 9\%$ do PIB da Região Autónoma dos Açores, à data do sismo [Forjaz, 2000].

2.9. Sismo da Turquia: Kocaeli/Izmit (17 de Agosto de 1999)

O sismo de Kocaeli ocorreu na região oriental do mar Mármara, na zona NW da Turquia, no dia 17 de Agosto de 1999, cerca das 3h 00m locais.

O hipocentro localizou-se a $40,75^\circ$ N de latitude e $29,86^\circ$ E de longitude e a uma profundidade de cerca de 17 km, na zona Norte da falha da Anatólia, tendo sido observadas roturas à superfície numa extensão de cerca de 100 km. O sismo teve uma

magnitude de 7,4 na escala de Richter e uma duração aproximada de 45 segundos [EERI, 1999a].

Através de informações oficiais das autoridades turcas as principais localidades em que ocorreram colapsos de edifícios foram: Golcuk, Yalova, Adapazari, Izmit, Avcilar, Duzce, Akyazi, Golyaka, Sapanca e Korfez.

Nestas localidades, cerca de 1 327 edifícios colapsaram, 98 000 sofreram danos severos e 63 000 sofreram danos moderados. Cerca de 7 000 edifícios tiveram que ser demolidos imediatamente após o sismo [INXNET, 1999].

As estruturas mais atingidas foram as de 4 a 8 pisos, cujas fundações não se encontravam dimensionadas para estarem implantadas em terrenos aluvionares e muito brandos. De facto, a natureza dos solos associada à ocorrência de fenómenos de liquefacção em áreas muito extensas pode, assim, ser considerada como uma das causas fundamentais para o volume de danos ocorridos nessas zonas (ver figura 2.10) [Vaz & Rodrigues, 1999].

Outra parte significativa dos danos foi atribuída a deficiências graves observadas ao nível do projecto e construção das estruturas.

Um número importante de edifícios que colapsou ou que apresentou danos severos datam da década de 1960, o que poderá explicar algumas das deficiências observadas, pois poderia ainda não estar a ser aplicado exhaustivamente o Regulamento local de segurança das construções contra os sismos, datado de 1958 [Vaz & Rodrigues, 1999].



Figura 2.10 – Efeito da liquefacção na Turquia [Vaz & Rodrigues, 1999].

De acordo com as informações do *Centro de Crise* em Ankara, à data de 21 de Setembro de 1999, o número de mortos ascendia aos 15 613, o número de feridos era

de 23 941 e o número de desaparecidos rondava os 30 000 a 35 000 [Vaz & Rodrigues, 1999].

Em termos de perdas monetárias as autoridades turcas estimaram um valor de 16×10^9 US\$ ($\approx 3\,000$ milhões de contos), na ordem dos 7% do PIB da Turquia. Deste total, cerca de 50% representam custos directos repartidos do seguinte modo:

- i) instalações Industriais: ≈ 380 milhões de contos;
- ii) edifícios: ≈ 950 milhões de contos;
- iii) caminhos-de-ferro: ≈ 190 milhões de contos;
- iv) estradas: ≈ 38 milhões de contos;
- v) instalações portuárias: ≈ 38 milhões de contos.

No entanto, existem outras fontes que apontam para valores diferentes, por exemplo, o *Earthquake Hazards Program* [USGS, 2001b], estima em mais de 17 000 o número de mortos, 50 000 o de feridos e cerca de 600 000 o de desalojados. O valor dos danos foi estimado entre 3 a $6,5 \times 10^9$ US\$ [USGS, 2001a].

2.10. Sismo da Grécia - Atenas (7 de Setembro de 1999)

O sismo de Atenas de 1999 ocorreu por volta das 15h 00m locais, do dia 7 de Setembro, com a magnitude de 5,9 na escala de Richter. O epicentro localizou-se a $23,60^\circ$ E de longitude e a $38,11^\circ$ N de latitude, junto dos subúrbios a noroeste da capital grega (a 16 km do centro de Atenas), tendo a duração de 7 segundos [Fardis & Bousias, 1999].

Após o sismo de 7 de Setembro fizeram-se sentir perto de 700 réplicas sem no entanto originarem vítimas mortais. No dia 9 de Setembro registaram-se dois sismos de magnitude 4,8 e 5,2 em duas ilhas do mar Egeu.

O evento provocou danos consideráveis nos edifícios mais antigos a noroeste de Atenas. Os edifícios que mais danos sofreram, foram aqueles que, de uma forma geral, não tinham sido projectados para resistir às acções sísmicas, pois quase não possuíam paredes resistentes e a maior parte dos pilares tinha uma secção reduzida [Fardis & Bousias, 1999].



Figura 2.11 – Danos no edifício de Menidi [Fardis & Bousias, 1999].

Em Menidi, um subúrbio com 120 mil habitantes a cerca de 20 km de Atenas, um terço dos edifícios colapsou e, entre os que foram vistoriados, 30% foram demolidos (ver figura 2.11).

Identificaram-se mais de 70 000 edifícios com necessidades de reparação. Os edifícios e pontes construídos na zona epicentral e projectados de acordo com a nova regulamentação, tiveram um comportamento bastante aceitável [Fardis & Bousias, 1999].

No sismo em análise, ocorreram 143 mortos, 1 600 feridos, 380 hospitalizados, 20 desaparecidos e 50 000 desalojados [Fardis & Bousias, 1999].

Em termos económicos, os prejuízos rondaram os 655×10^6 US\$, ou seja, cerca de 2% do PIB nacional grego [USGS, 2001d].

2.11. Sismo de Taiwan - Chichi (20 de Setembro de 1999)

O sismo de Taiwan de 20 de Setembro de 1999 foi sentido fortemente no centro da ilha, por volta das 01h 47m locais e o seu hipocentro foi localizado a $23,77^\circ$ de latitude Norte, $120,98^\circ$ de longitude Este e a 8 km de profundidade [Loh & Tsay, 2001].

Pela sua localização e magnitude, 7,6 na escala de Richter, o evento causou danos significativos em cidades como Taipei (ver figura 2.12), Chung Liao, Meishan, Taichung, Fongyen e Dongsu. A cidade mais afectada, tanto em termos humanos como económicos, foi Taipei, devido à sua localização a cerca de 160 km do epicentro.

Na semana seguinte ao sismo principal, foram registadas cerca de 20 réplicas de magnitude igual ou superior a 4,8 e 6 eventos com magnitude superior a 6,0 na escala de Richter [RCEP, 2001].



Figura 2.12 – Danos no edifício de Taipei, Taiwan [Geocities, 2001].

O evento provocou danos consideráveis no parque habitacional de Taiwan, tendo sido afectadas para cima de 30 mil edificações, das quais 7 200 atingiram o colapso total. As autoridades locais afirmam que uma em cada três habitações, sofreu graves danos estruturais [EERI, 2001].

Duas mil e quatrocentos pessoas perderam a vida, mais de 8 700 ficaram feridas e cerca de 600 000 desalojadas [Loh & Tsay, 2001].

O sismo provocou a interrupção do fornecimento de energia eléctrica e água em várias regiões do país, em especial no Norte.

Segundo analistas, as perdas sofridas na produção de *chips* electrónicos em Taiwan, responsável por 10% da produção mundial, provocaram uma alta mundial nos preços desses produtos. As perdas económicas foram estimadas entre 20 e 30×10^9 US\$.

Vários economistas afirmam que o evento terá provocado apenas um decréscimo de 0,3% do PIB de Taiwan em 1999, assinalando os trabalhos de reconstrução efectuados como fundamentais para conter a queda na economia [EERI, 1999b].

2.12. Sismo de El Salvador – América Central (13 de Janeiro de 2001)

O sismo de El Salvador, do dia 13 de Janeiro de 2001, ocorreu às 11h 33m locais e teve uma duração de 32 segundos. O sismo de magnitude 7,6 na escala de Richter, localizou-se a 110 km a SW da cidade de San Salvador, em pleno Oceano Pacífico e a uma profundidade de 39 km [USGS, 2001e].

Este evento, cujo epicentro foi situado pelos sismólogos do Observatório das Ciências da Terra de Estrasburgo, França, a 14,06° N de latitude e a 88,79° W de longitude, foi o mais violento registado na região nos últimos 20 anos [USGS, 2001e].

O abalo fez sentir-se por toda a América Central, tendo sido registadas mais de 569 réplicas, algumas de magnitude superior a 5,0. Várias localidades ficaram inacessíveis por estrada devido aos deslizamentos dos terrenos.

A imagem mais trágica foi a de uma avalanche no bairro de Santa Tecla, situado a 20 quilómetros da capital salvadorenha, com o deslizamento de uma encosta sobre uma urbanização com mais de 800 casas (ver figura 2.13) [EERI, 2001].



Figura 2.13 – Deslizamento da encosta de Santa Tecla em El Salvador [EERI, 2001].

Las Colinas foi o local mais atingido pela tragédia que fez ruir cerca de 90% das casas de adobe, e parte das infra-estruturas (ver figura 2.14).



Figura 2.14 – Colapso total de estruturas em Las Colinas, El Salvador [NBC, 2001].

Registou-se ainda, em El Salvador, a destruição total de 108 226 casas, entre elas 137 igrejas, 6 hospitais e 28 centros de saúde [USGS, 2001e].

De acordo com informações oficiais, o número de mortos rondou os 800 (a maioria devido a deslizamentos), o de feridos 4 700 e o de desalojados 46 000 [USGS, 2001e].

O número de desaparecidos divulgado pelo Comité de Emergência Nacional de S. Salvador, ultrapassou as 4 mil pessoas.

Em termos económicos, os prejuízos rondaram os $1\,600 \times 10^6$ US\$, perto de metade do orçamento anual do país [EERI, 2001].

Em 13 de Fevereiro de 2001, El Salvador foi afectado por um novo sismo de magnitude 6,6 na escala de Richter, que causou 283 mortos e 2 937 feridos [USGS, 2001e].

3. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DE PERDAS HUMANAS

3.1. Introdução

A identificação e compreensão dos factores que contribuem para a mortalidade em eventos sísmicos poderá ter, pelo menos, duas finalidades distintas: (i) evitar a repetição de eventos mortíferos e (ii) tentar modelar as perdas humanas resultantes de sismos.

Neste capítulo identificam-se diversos factores que influenciam as perdas humanas em consequência de sismos e descrevem-se vários métodos de previsão que neles se baseiam.

Os métodos publicados baseiam-se, na maioria dos casos, em relações entre os danos no edificado e o número de mortos, feridos e desalojados. Estas relações constituem modelos matemáticos que têm como objectivo reproduzir as situações ocorridas em sismos, sendo aferidas a partir de estatísticas mundiais de sismos recentes.

Estas estatísticas mostram que cerca de 75% das vítimas mortais atribuídas a sismos são causadas pelo colapso de edifícios. Os restantes 25% têm origem em causas não estruturais ou em efeitos colaterais induzidos pelos sismos [Coburn & Spence, 1992].

Na figura 3.1 apresenta-se a distribuição das vítimas mortais dos sismos do século XX pelas causas que as originaram.

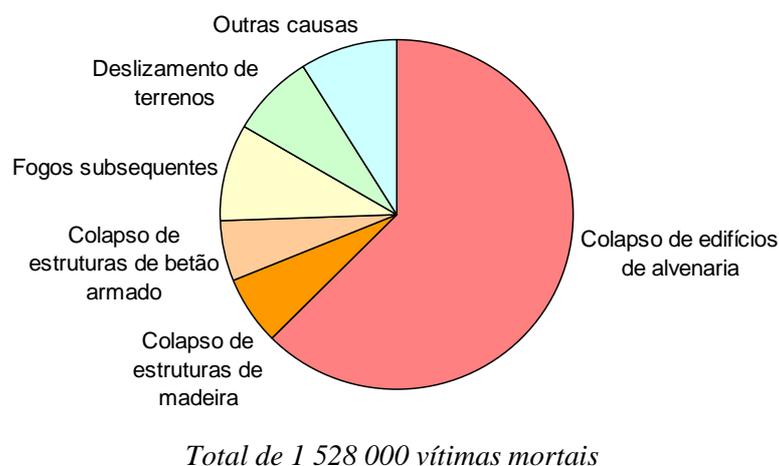


Figura 3.1 – Causas de morte em sismos ocorridos entre 1900 e 1992 [adaptado de Coburn & Spence, 1992]

Nesta figura verifica-se que a maioria das vítimas morre no colapso de edifícios de alvenaria.

Na figura 3.2 apresenta-se o número de vítimas mortais em função do número de edifícios severamente danificados, para sismos em que ambas as estatísticas possuam alguma fiabilidade.

Desta figura é possível verificar 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.

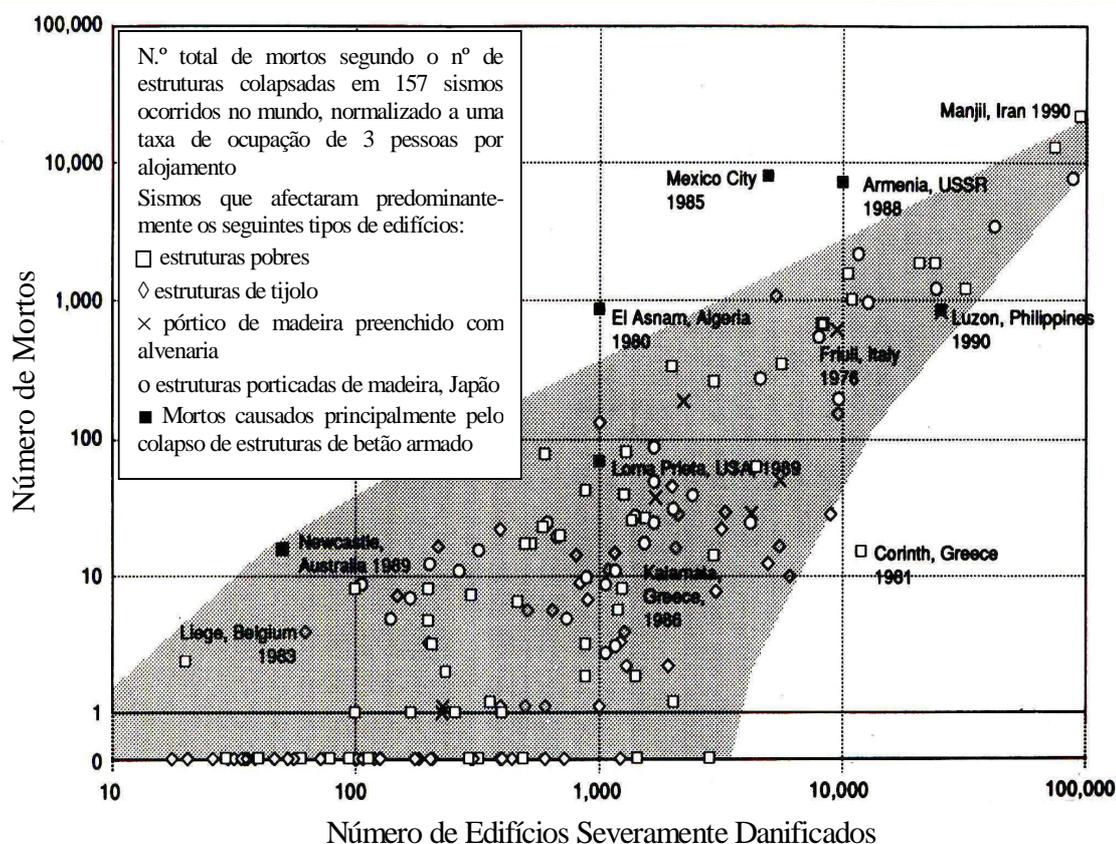


Figura 3.2 – Relação entre o número de vítimas mortais e o número de edifícios severamente danificados [adaptado de Coburn & Spence, 1992].

A variabilidade do número de vítimas de sismo para sismo é ainda maior quando os eventos são causadores de níveis de danos ligeiros ou moderados (< 5 000 edifícios danificados), pois comparativamente com os sismos severos a proporção entre o número de feridos e o de mortos é mais elevada, bem como a proporção entre o número de vítimas causadas por danos não estruturais e estruturais [Coburn & Spence, 1992].

No caso de sismos que causam mais de 5 000 edifícios severamente danificados, o número de mortos devido ao colapso de edifícios domina o número de vítimas mortais.

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 para uma acção sísmica semelhante, acrescidas pelo facto de, em geral, os dados documentais serem muito pobres, existindo grandes lacunas nas estatísticas pós-sismo.

Outra problemática inerente às avaliações de perdas humanas, relaciona-se com a dificuldade de localizar a população em função da hora do dia e do dia da semana e do ano.

Os métodos de avaliação podem também ser classificados segundo o seu nível de complexidade e detalhe: num extremo os que estimam as perdas, tendo em consideração apenas o número de edifícios danificados e, no outro, os que consideram, para além da tipologia do edificado, uma série de outros factores, que podem influenciar as perdas humanas e que se enumeram de seguida, a título de exemplo:

- i) intensidade do sismo no local;
- ii) vulnerabilidade da construção;
- iii) população por edifício;
- iv) taxa de ocupação no momento do sismo;
- v) danos estruturais;
- vi) aprisionamento devido ao colapso dos edifícios;
- vii) distribuição dos feridos no colapso;
- viii) eficácia dos sistemas de emergência;
- ix) factores sociais como rendimento, idade, raça, etc.

Estes factores serão descritos com mais detalhe na apresentação das metodologias que se segue. Desde já se evidencia que, como dados fundamentais comuns a todos os métodos, quer sejam simplificados ou complexos, se tem o inventário da população e a estimativa da acção sísmica no local.

3.2. Metodologia ATC 13 [ATC, 1985]

A metodologia ATC 13, foi desenvolvida pelo *Applied Technology Council* (ATC) dos Estados Unidos, com a finalidade de estimar o impacto económico de sismos severos na Califórnia [McCormack & Rad, 1997].

Uma vez que à data do desenvolvimento do projecto não se encontravam publicados dados suficientes sobre danos e perdas em consequência de sismo, foi constituído um painel de especialistas em engenharia sísmica que, com base na sua experiência e opinião desenvolveram estimativas para as seguintes categorias de perdas:

- danos físicos directos;
- perdas sociais;
- perdas económicas.

Mais concretamente, no âmbito deste trabalho interessa abordar as estimativas relativas (i) às perdas físicas esperadas, causadas pelo movimento sísmico (danos físicos directos) nomeadamente à sua relação com (ii) as percentagens esperadas de população morta e ferida (perdas sociais).

Relativamente ao primeiro ponto a metodologia ATC 13 define 7 estados de danos e exprime as percentagens de danos físicos, para diversas classes de construção da Califórnia, em termos do *factor de danos* e em função da intensidade de Mercalli Modificada. A grandeza do factor de danos é definida, em percentagem, como a razão entre o valor económico dos danos e o valor de reposição da estrutura.

No quadro 3.1 apresentam-se os estados de danos e o factor de danos correspondente definidos pela metodologia ATC 13.

Quadro 3.1 – Relação entre o estado de danos e os factores de danos [adaptado do ATC, 1985].

<i>Estado de Danos (DS)</i>	<i>Factor de Danos (%)</i>	<i>Valor Central do Factor de Danos - CDF (%)</i>
1 – Nenhum	0	0
2 – Muito Ligeiro	0 – 1	0,5
3 – Ligeiro	1 – 10	5
4 – Moderado	10 – 30	20
5 – Extenso	30 – 60	45
6 – Muito Extenso	60 – 100	80
7 – Colapso	100	100

As estimativas das percentagens de mortos e feridos foram desenvolvidas para sismos severos da Califórnia, tendo em conta os perdas totais sofridos pelas construções (edifícios e barragens), incluindo os danos resultantes do movimento do solo e efeitos colaterais (deslizamento de terrenos, liquefacção, etc.).

No quadro 3.2 apresentam-se as estimativas da percentagem de mortos e feridos para todo o tipo de construção, excepto para construções metálicas ligeiras e de madeira, em que os valores do quadro deverão ser multiplicados por 0,1.

*Quadro 3.2 – Percentagem de mortos e feridos em função do estado de danos da construção
[adaptado do ATC, 1985].*

<i>Estado de Danos (DS)</i>	<i>CDF (%)</i>	<i>Feridos Ligeiros</i>	<i>Feridos Graves</i>	<i>Mortos</i>
1 – Nenhum	0	0	0	0
2 – Muito Ligeiro	0,5	3/100 000	1/250 000	1/1 000 000
3 – Ligeiro	5	3/10 000	1/25 000	1/100 000
4 – Moderado	20	3/1 000	1/2 500	1/10 000
5 – Extenso	45	3/100	1/250	1/1 000
6 – Muito Extenso	80	3/10	1/25	1/100
7 – Colapso	100	2/5	2/5	1/5

De notar que as percentagens de mortos e feridos propostas são função do factor de danos médio da construção, o que inclui os danos na estrutura e no seu conteúdo.

As estimativas apresentadas no quadro 3.2 baseiam-se (i) na opinião dos especialistas participantes no projecto ATC 13, (ii) em levantamentos sobre mortos e feridos decorrentes de 15 sismos dos EUA ocorridos entre 1872 e 1971 [NOOA, 1972 e Anagnostopolous & Whitman, 1977 in ATC, 1985] e (iii) nas taxas de mortos e feridos para seis estados de danos apresentadas por Whitman *et al.* [Whitman, 1975 in ATC, 1985].

Apesar da metodologia ATC 13 ser considerada desactualizada por alguns autores, pelo menos até ao final da década passada, ela foi amplamente aplicada em estudos de avaliação de danos e perdas em consequência de sismos.

Por exemplo, McCormack e Rad [1997] aplicaram esta metodologia à região de Portland nos Estados Unidos, tendo proposto um modelo para reproduzir aproximadamente os valores apresentados no quadro 3.2:

$$LL = NP * 5,94 * 10^{-6} * \exp(0,104 * DF) \quad (1)$$

$$SI = 4 * LL \quad (2)$$

em que LL representa as perdas humanas, NP o número de residentes por edifício, DF o factor de danos e SI os feridos graves.

Na figura 3.3 ilustra-se a variação da razão de mortos FD ($FD = LL / NP$) com o factor de danos DF .

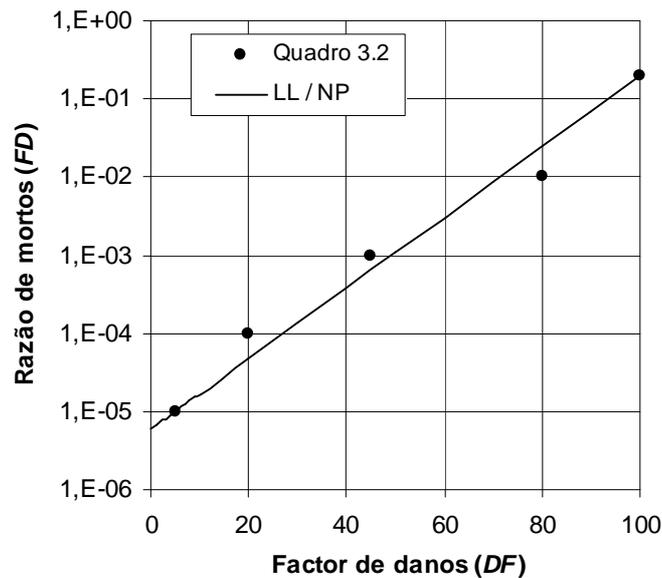


Figura 3.3 –Razão de mortos em função do factor de danos [adaptado de McCormack & Rad, 1997].

Outro exemplo da aplicação da metodologia ATC 13 foi a efectuada por Emmi & Horton [1993] num estudo probabilístico de risco sísmico que incluiu a avaliação de danos, perdas económicas e humanas em Salt Lake, nos Estados Unidos.

Tal como McCormack & Rad [1997], estes autores ajustaram funções matemáticas contínuas às matrizes apresentadas pela metodologia ATC 13. Porém, Emmi & Horton não explicitam a função matemática utilizada, limitando-se a referir que recorreram a um polinómio de 2º grau e a uma dupla transformação logarítmica.

3.3. Curvas de vulnerabilidade [Tiedemann, 1990 e Tiedemann, 1992]

A bibliografia internacional é muito pobre no que diz respeito à informação sobre perdas humanas em consequência de sismos, nomeadamente, na explicitação

dos diversos parâmetros e factores que as influenciam, como sejam, por exemplo, a intensidade do sismo ou a qualidade geral do edificado.

Desta forma, Tiedemann [1990 e 1992] analisou directamente os danos e as perdas causados por um número significativo de sismos ocorridos em diversas partes do mundo.

Baseado nesta análise, o autor discute num artigo, que data de 1990, as consequências da previsão de sismos sobre a mitigação do risco sísmico, avaliando, qualitativamente, a diminuição do impacto dos sismos sobre vários elementos em risco, nomeadamente a população, no caso das previsões sísmicas¹ serem efectivamente aplicadas.

No seu livro de 1992 Tiedemann apresenta, em termos muito abrangentes, as incertezas que afectam as estimativas de perdas humanas e os principais parâmetros que as influenciam, distinguindo aqueles que afectam o número de vítimas mortais e os que condicionam o número de feridos.

3.3.1. Incertezas gerais relacionadas com a contabilização de perdas humanas

A obtenção de informação precisa sobre as vítimas humanas em consequência de um sismo é geralmente muito difícil chegando por vezes a ser impossível.

Segundo Tiedemann [1992] sismos causadores de danos elevados são “eventos excitantes” e esta pode ser uma das razões pela qual o número de vítimas é muitas vezes exagerado, em particular pela imprensa. Porém, os números oficiais também se encontram muitas vezes errados, daí a necessidade do cruzamento de diversas fontes de informação e a importância das avaliações “in situ” das perdas humanas.

O resultado da contabilização das perdas humanas será ainda mais incerto caso as vítimas sejam originadas por diferentes factores, como por exemplo, o colapso de edifícios, fogos pós-sismo, tsunamis, más condições climatéricas e, no caso dos sismos históricos, por epidemias e fome.

Além disso, é necessário distinguir entre as vítimas mortais e os feridos. Enquanto que no primeiro caso se avalia uma variável binária, morto ou vivo, no

¹ Tiedemann [1990] diferencia quatro janelas temporais de previsão sísmica: (i) longo prazo, (ii) médio prazo, (iii) curto prazo e (iv) alarme sísmico. Esta diferenciação é importante pois os benefícios esperados da previsão probabilística são distintos para cada elemento em risco e janela temporal.

segundo o estado dos feridos pode ser muito variável. Assim, se já é muito difícil obter números precisos sobre perdas humanas, a contabilização do número de feridos e da gravidade do seu estado é ainda mais incerta.

Outra fonte de incerteza surge quando se tenta estabelecer o número de pessoas presente na região afectada por uma dada acção sísmica com vista a estimar a percentagem de população afectada. O levantamento da população presente num determinado instante e local é uma tarefa difícil na maioria dos países, agravada pelo facto da mobilidade actual da população ser elevada e do número de pessoas em trânsito introduzir um erro considerável nas estimativas.

Por fim, Tiedemann [1992] identifica como tarefa muito difícil a da obtenção de informação sobre vítimas correlacionada com a “qualidade”² dos edifícios em que se encontravam quando da ocorrência do sismo.

3.3.2. Factores que influenciam as vítimas mortais

De acordo com Tiedemann [1992] as principais variáveis de que depende a percentagem de população que pode ser morta por um sismo, DR (taxa de mortos) são:

$$DR = f(I, Q, T, S, W, H, M, \dots) \quad (3)$$

em que I é a intensidade do sismo, Q é a qualidade ou resistência do edifício, T é o instante do dia em que o sismo ocorre, S é a estação do ano, W representa a influência de qualquer alerta recebida pela população, H engloba os hábitos locais da população e M representa a qualidade e quantidade dos meios médicos e de socorro.

Sendo o impacto de um sismo sobre as pessoas fortemente condicionado pelas duas primeiras variáveis atrás mencionadas, Tiedemann [1990 e 1992] apresenta curvas de vulnerabilidade correlacionando a taxa de mortos, DR , com a intensidade MM (de Mercalli Modificada), para diferentes tipologias de edifícios.

A taxa de mortos representada na figura 3.4 foi estimada para condições médias, isto é, não se assumiu a hora de ponta nem efeitos sazonais e não se incluiu as vítimas esperadas em consequência de fogos ou tsunamis.

Tiedemann [1992] adverte que as curvas de vulnerabilidade, $DR \equiv DR(I/Q)$, deverão ser utilizadas com muita precaução não só pela incerteza substancial inerente

² Tiedemann [1990] considera a qualidade Q de um elemento em risco como o inverso da sua vulnerabilidade V , ou seja, $Q = 1/V$.

às amostras, como também devido aos diferentes factores que condicionam o desempenho dos edifícios e conseqüentemente o número de vítimas.

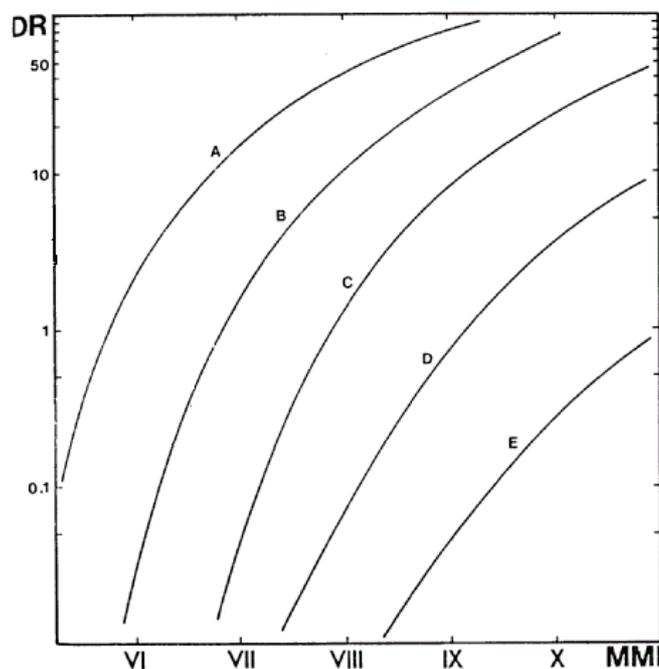


Figura 3.4 – Correlação aproximada entre a qualidade ou vulnerabilidade dos edifícios e a taxa de mortos, dependendo da intensidade MM do sismo. Tipologia dos edifícios: A = Adobe e alvenaria de pedra; B = Alvenaria de tijolo não reforçada; C = Estrutura de betão armado (BA) com 2,5% g; D = BA com 6% g; E = BA com 20% g. Correlação válida para edifícios moderadamente irregulares e para solos intermédios [Tiedemann, 1990].

Para exemplificar a utilização da figura 3.4 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.

Associando as intensidades macrossísmicas aos respectivos períodos de retorno, a figura 3.4 também pode ser utilizada para prever a probabilidade dos montantes de perdas de vida humana. Desta forma, Tiedemann [1990] sublinha a importância da previsão probabilística a longo e a médio prazo, na medida em que torna possível a implementação de medidas apropriadas para a redução de perdas de vida humana.

3.3.3. Parâmetros que influenciam o número de feridos

Relativamente à taxa de feridos IR , Tiedemann [1990 e 1992] não apresenta curvas de vulnerabilidade devido à elevada incerteza estatística e ao elevado número de variáveis e parâmetros que determinam o número esperado de feridos.

De facto, a obtenção do número esperado de feridos apresenta problemas adicionais relativamente ao número de mortos. A percentagem da população que sofre ferimentos depende não só das características estruturais dos edifícios como também do desempenho dos elementos não estruturais.

Na prática, verifica-se que *DR* aumenta com a vulnerabilidade enquanto que *IR* diminui proporcionalmente, ou seja, edifícios com elevada probabilidade de colapso causam muitos mortos deixando poucas 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. Desta forma, o número de mortos diminui e a maioria das vítimas são feridos.

A razão entre o número de mortos e feridos varia, em média, entre cerca de 1/3 e 1/6. Esta razão poderá ser muito menor se a qualidade do edificado for elevada ou se a intensidade do sismo for baixa.

Como regra geral aplicável a nível mundial, Tiedemann [1992] afirma que pode assumir-se a morte de cerca de 1/4 a 1/8 dos residentes de edifícios que sofreram danos entre os 80 e os 100%.

Tiedemann termina o seu artigo de 1990, fazendo uma análise geral de risco sísmico para o que recorre a um valor médio de um seguro de vida para avaliar a vida humana. Conclui assim, que numa região de rendimentos médios, ligeiramente industrializada e para edifícios com coeficiente sísmico entre 2 e 3% g, as perdas humanas representarão cerca de 5 a 10% do total das perdas devidas a um sismo.

Numa região de rendimentos mais elevados, os danos materiais e as perdas indirectas serão sempre mais elevados, do que numa região de rendimentos médios. Desta forma, mesmo aumentando o valor da vida humana (ou do seguro de vida), o valor das perdas humanas tem sempre um peso pouco significativo.

O autor refere ainda que os custos relativos a cuidados médicos, representam cerca de 20 a 35% dos citados anteriormente, excluindo as perdas indirectas.

3.4. Perdas em função do colapso de edifícios [Coburn & Spence, 1992]

Tal como Tiedemann, Coburn & Spence [1992] salientam a dificuldade da avaliação de perdas humanas em consequência de sismos, devido ao facto do número de mortos e feridos ser altamente variável de sismo para sismo e da informação sobre os montantes das perdas humanas em consequência de sismos ser pobre.

Recomendam assim que as estimativas de perdas humanas prováveis sejam acompanhadas pela especificação das margens de erro que a técnica de previsão exige.

Os autores propõem uma equação geral para a previsão de perdas humanas resultantes de um sismo (K):

$$K = K_s + K' + K_2 \quad (4)$$

em que as parcelas de perdas humanas contabilizadas são as resultantes de danos estruturais, K_s , de danos não estruturais, K' , e de outros fenómenos induzidos pelos sismos (tsunamis, fogos, etc), K_2 .

As perdas humanas resultantes de fenómenos induzidos pelos sismos são raras, porém, quando ocorrem, é provável que dominem as perdas totais. A parcela K' é a dominante nos níveis de dano baixos, sendo no entanto altamente variável e muito difícil de prever, não sendo abordada na metodologia de Coburn & Spence. A variável K_s controla as perdas na maioria dos sismos destrutivos e será a estimada pelo modelo de Coburn & Spence.

Face a estes constrangimentos, Coburn & Spence [1992] restringem o modelo que apresentam à estimativa do número de vítimas em edifícios colapsados, ou seja, avaliam parte da parcela K_s da expressão (4).

Assim, para uma dada tipologia de edifícios, b , o número de vítimas exprime-se por:

$$K_{sb} = D_b * [M1 * M2 * M3 * (M4 + M5(1 - M4))] \quad (5)$$

em que, D_b representa o número total de edifícios que colapsam pertencentes à tipologia b , $M1$ representa o potencial de mortalidade e $M2$ a $M5$ são factores que afectam o referido potencial como se explicará de seguida.

A soma do número de edifícios colapsados para todas as tipologias fornece o factor mais importante para a avaliação do número total de vítimas em consequência de um sismo.

MI: População por edifício

A população por edifício (P/B) é a variável que estabelece o número de pessoas em risco ou o potencial de mortalidade por edifício³.

³ No caso português esta variável será estimada com maior precisão, pois é possível conhecer o número médio de ocupantes por tipologia de edifícios, ou seja, MI_b .

A população por edifício varia consideravelmente de local para local e também ao longo do tempo para um dado local.

De acordo com os autores, em cidades europeias a razão P/B ronda as 2 a 3 pessoas em edifícios residenciais (ver figura 3.5). Em contrapartida, em áreas rurais em que o número de mortos por sismo costuma ser elevado (Irão, Turquia, etc.), bem como a dimensão das famílias, a razão P/B atinge valores médios próximos de 8.

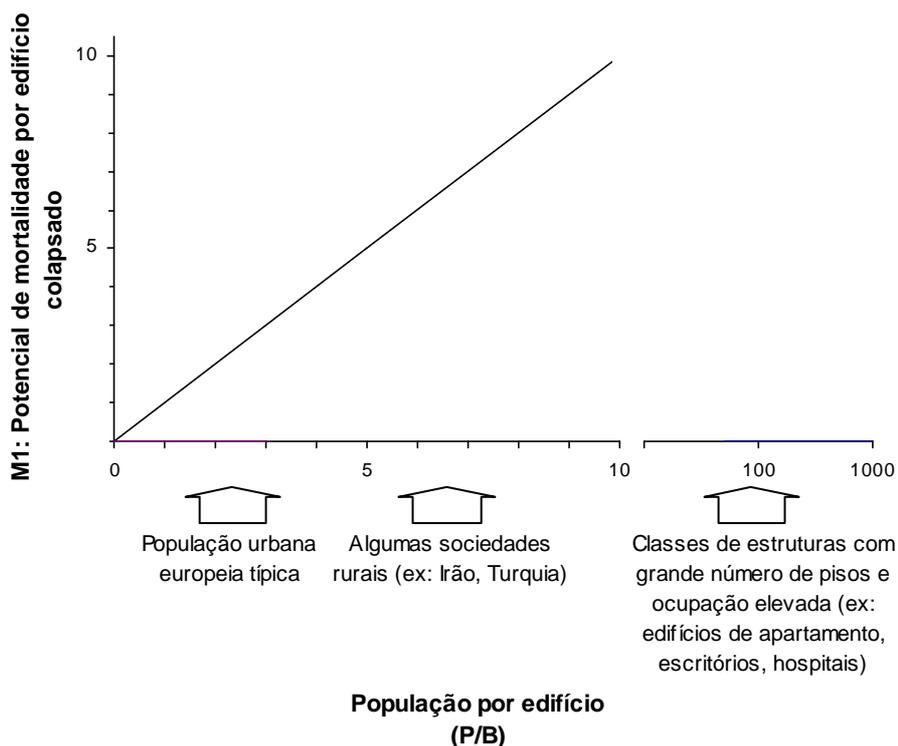


Figura 3.5 – População por edifício (P/B) [adaptado de Coburn & Spence, 1992].

M2: Taxa de ocupação no momento 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 (ver figura 3.6).

Nas sociedades rurais em que a população passa parte do dia fora de casa, há indicadores de que o número de mortos por edifício pode ser cerca de duas vezes superior em sismos que ocorrem durante a noite comparando com os que ocorrem durante o dia.

Em áreas urbanas esta variação não será tão acentuada, pois a população movimenta-se de edifícios residenciais para edifícios não residenciais durante o dia.

No entanto, há estudos que indicam a existência de uma redução considerável da ocupação dos edifícios durante a hora de ponta o que se poderá reflectir no número de vítimas de sismos que ocorram nesses períodos.

Outras variações relevantes na ocupação dos edifícios são as sazonais (períodos de férias) e as semanais (dias de trabalho e fins-de-semana).

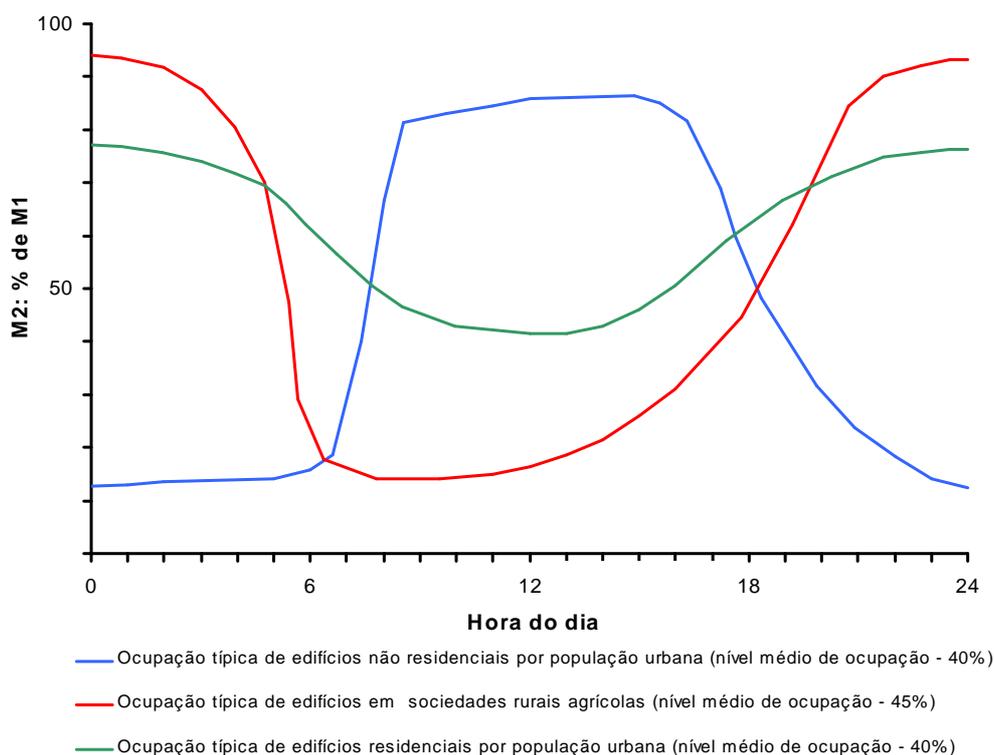


Figura 3.6 – Taxa de ocupação no instante do sismo [adaptado de Coburn & Spence, 1992].

M3: Ocupantes aprisionados devido ao colapso dos edifícios

O factor $M3$ é designado por Coburn & Spence [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 empiricamente devido à quase inexistência de estatísticas sobre o assunto. No entanto, é reconhecido que nem todos os ocupantes de um edifício ficam aprisionados se ele colapsar.

De acordo com Coburn & Spence [1992], cerca de 50% dos habitantes de edifícios de 1 só piso, ou do 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.

Não se sabe ao certo o tempo que um edifício demora a colapsar. Existem casos de edifícios de alvenaria, localizados em zonas epicentrais de sismos intensos, que colapsam instantaneamente. Um edifício dúctil demorará algumas dezenas de segundos a colapsar enquanto que um mais frágil colapsará mais rapidamente.

Testes sobre tempos de evacuação mostram que os habitantes 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.

Coburn & Spence estudaram as fotografias de mais de 300 edifícios colapsados com o objectivo de relacionar a extensão do colapso, ou a redução volumétrica da forma de um edifício, com o factor $M3$.

De acordo com a classificação de Coburn & Spence [1992], o estado de danos “colapso” poderá variar entre a queda de uma ou duas paredes até à desintegração completa da estrutura.

Os autores concluem que a redução volumétrica da forma de um edifício está relacionada com a extensão do colapso e por sua vez com a taxa de aprisionamento.

A redução volumétrica de edifícios de alvenaria colapsados pode variar entre 10 e 100% sendo que a extensão média do colapso parece estar relacionada com a intensidade do movimento sísmico (ver quadro 3.3).

Quadro 3.3 – M3: Percentagem média de ocupantes aprisionados devido ao colapso de edifícios de alvenaria com n.º de pisos inferior a 3 [adaptado de Coburn & Spence, 1992].

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

No caso de estruturas de vários pisos em pórtico de betão armado é o mecanismo de colapso que determina a sua redução volumétrica.

Coburn & Spence [1992] identificam 4 mecanismos de colapso neste tipo de estruturas: “bottom-up”; “top-down”; “pounding” e “overturning”. A proporção destes mecanismos de colapso nos edifícios de betão armado de vários pisos, parece depender das características do movimento do solo.

No caso de sismos próximos em que o movimento tem o seu maior conteúdo energético nas altas frequências, o mecanismo de colapso predominante é o “bottom-up” com valores de $M3$ em torno dos 70%, para estruturas de 3 a 5 pisos. Movimentos sísmicos de longo período causados por sismos afastados originam colapsos do tipo “top-down” e “pounding” com valores de $M3$ em torno dos 50% para estruturas com 3 a 5 pisos.

M4: Distribuição dos feridos no colapso

O factor $M4$ do modelo de vítimas de Coburn & Spence [1992] (eq. 5) exprime a percentagem de vítimas com ferimentos de diversas gravidades em relação aos ocupantes aprisionados devido ao colapso ($M3$).

Existe muito pouca informação sobre a distribuição da gravidade dos ferimentos dos ocupantes de edifícios colapsados. Contudo, estudos relativos a períodos de sobrevivência e a 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, em que grande parte das pessoas aprisionadas fica gravemente ferida.

No quadro 3.4 apresenta-se a proposta de Coburn & Spence [1992] para os valores do factor $M4$.

Quadro 3.4 – M4: Distribuição dos feridos devido ao colapso de edifícios (% de ocupantes aprisionados) [adaptado de Coburn & Spence, 1992].

<i>Gravidade de ferimentos</i>	<i>Alvenaria</i>	<i>Betão Armado</i>
Mortos	20	40
Vítimas em risco de vida caso não recebam tratamento médico imediato	30	10
Ferimentos que requerem tratamento hospitalar	30	40
Ferimentos que não necessitam de hospitalização	20	10

Por fim, Coburn & Spence [1992] apresentam diversos parâmetros que podem afectar o factor $M4$ realçando, entre eles, o índice de vazios no colapso, ou seja, a razão entre os espaços vazios e o volume dos elementos colapsados, bem como a dimensão dos vazios após o colapso.

Outros parâmetros importantes são o potencial de produção de poeira dos materiais do edifício, pois muitas das vítimas aprisionadas no colapso acabam por sufocar, e a configuração do edifício em termos de saídas de emergência, etc.

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 se os prisioneiros do colapso ligeiramente feridos podem sobreviver durante algum tempo, o mesmo não acontece com as vítimas gravemente feridas.

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 3.5.

No caso de um sismo catastrófico, em que uma 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.

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 essa sensibilidade diminui rapidamente com o tempo.

Quadro 3.5 – M5: Percentagem de sobreviventes aprisionados em edifícios colapsados que morrem posteriormente [adaptado de Coburn & Spence, 1992].

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

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

Factores que influenciam a eficácia do socorro incluem o tipo de material de construção, o tipo de colapso, o equipamento de socorro, a capacidade das equipas de emergência, etc.

3.5. Metodologia FEMA & NIBS [1999]

3.5.1. Enquadramento

A metodologia FEMA & NIBS actualizada em 1999, permite fazer uma estimativa integrada de perdas em consequência de sismos que inclui quatro componentes principais: Ciências da Terra, Danos Físicos Directos, Danos Físicos Induzidos e Perdas Económicas e Sociais Directas.

A metodologia FEMA & NIBS baseia-se em estatísticas de perdas humanas ocorridas em sismos dos Estados Unidos, na interpretação de estatísticas semelhantes recolhidas a nível mundial e nas contribuições de especialistas multidisciplinares envolvidos na estimativa de perdas humanas derivadas de sismos.

Cada uma das componentes referidas encontra-se organizada de forma modular. Os dois módulos relevantes para o presente estudo estão enquadrados na 4ª componente atrás mencionada (Perdas Económicas e Sociais Directas) e incluem: (i) a estimativa das perdas sociais directas relacionadas com as vítimas, aqui designada de perdas humanas (número de mortos e feridos) e (ii) a estimativa das perdas sociais directas relacionadas com o número de desalojados e necessidades de abrigos temporários.

No que toca ao primeiro módulo aqui descrito a metodologia baseia-se no princípio de que existe uma forte correlação entre os danos no edificado (estruturais e não estruturais), o número de pessoas afectadas e a gravidade dos seus ferimentos. Assume ainda que em sismos pouco severos é mais provável que os danos não estruturais controlem as estimativas de perdas humanas, enquanto que em sismos mais severos existirá um maior número de colapsos ou colapsos parciais e proporcionalmente um maior número de vítimas mortais.

Por outro lado a metodologia apenas fornece as estimativas de perdas humanas causadas pelos danos no edificado, não contemplando os efeitos colaterais de eventos induzidos como sejam incêndios pós-sismo, rotura de diques e barragens, libertação massiva de substâncias tóxicas, etc.

No que toca ao segundo módulo aqui descrito a metodologia permite estimar o número de famílias desalojadas e o número de pessoas que necessitam de abrigos temporários. A perda de habitabilidade é calculada directamente a partir dos danos no parque habitacional e da ausência de água e de energia.

Num passo intermédio o módulo fornece a estimativa do número total de alojamentos inabitáveis por unidade geográfica.

As estimativas das necessidades de abrigos temporários pressupõem que apenas parte dos desalojados procuram abrigos públicos e que uma parcela das pessoas que os procuram habitavam em alojamentos que sofreram danos insignificantes ou mesmo em alojamentos que não sofreram danos.

3.5.2. Estimativa de perdas humanas

3.5.2.1. Dados

São três os tipos de dados necessários para o módulo das perdas humanas, designadamente, (i) os dados definidos pelo utilizador, (ii) os dados fornecidos por outros módulos e (iii) os dados específicos do módulo de perdas humanas.

i) Dados definidos pelo utilizador

Nestes dados inclui-se o instante de ocorrência do sismo. A metodologia apresenta valores de defeito que permitem estimar as perdas humanas para o caso do sismo ocorrer em três instantes do dia: 2h 00m; 14h 00m e 17h 00m. Pressupõe-se que estes cenários originarão o maior número de perdas humanas para a população que se encontra em casa, no trabalho/escola e em trânsito, respectivamente.

ii) Dados fornecidos por outros módulos

Outros módulos da metodologia fornecerão dados relativos à distribuição da população de acordo com a sua ocupação, a tipologia do edificado e respectivos tipos de utilização e às probabilidades dos estado de danos estruturais (ausência de danos, danos ligeiros, danos moderados, danos severos e perdas totais com colapso parcial ou total).

iii) Dados específicos do módulo de perdas humanas

Este módulo limita-se a estimar as perdas humanas resultantes de danos em edifícios e pontes. São portanto excluídas as perdas não causadas por impactos físicos imediatos tais como os ataques cardíacos, os efeitos psicológicos, as quedas de elementos não estruturais exteriores aos edifícios, e as actividades pós-sismo como sejam a remoção de escombros e a reconstrução.

O presente módulo da metodologia FEMA & NIBS fornece os valores por defeito das perdas humanas para as seguintes estruturas:

- por tipologia de edifícios para danos estruturais ligeiros, moderados, severos e perdas totais (colapso estrutural total ou parcial⁴);
- para pontes no estado limite de danos perdas totais.

Os valores das perdas humanas fornecidos por defeito baseiam-se nos da metodologia ATC 13 [ATC, 1985], os quais foram revistos para ter em consideração dados de sismos passados, em particular o de Northridge.

O resultado do presente módulo consiste na estimativa das perdas humanas repartidas por quatro níveis de gravidade dos ferimentos (ver quadro 3.6). Esta escala de 4 níveis baseia-se em trabalhos anteriores de Durkin & Thiel, 1991, Coburn, 1992 e Cheu, 1994 [citados em FEMA & NIBS, 1999].

Quadro 3.6 –Escala de gravidade de ferimentos [adaptado de FEMA & NIBS, 1999].

<i>Níveis de gravidade dos ferimentos</i>	<i>Descrição</i>
<i>Gravidade 1</i>	Feridos que requerem tratamento médico, sem necessidade de hospitalização.
<i>Gravidade 2</i>	Feridos que requerem um grau mais elevado de tratamento médico e hospitalização, mas que não se encontram em perigo de vida.
<i>Gravidade 3</i>	Feridos em perigo de vida se não forem tratados de forma imediata e adequada. A maioria destes feridos ficam aprisionados em consequência do colapso de estruturas.
<i>Gravidade 4</i>	Morte imediata ou ferimentos mortais.

3.5.2.2. Modelo e Resultados

A metodologia FEMA & NIBS para a estimativa de perdas humanas baseia-se em conceitos desenvolvidos pelos modelos de Coburn & Spence [1992], Murakami [1992] e Shiono *et al.* [citados em FEMA & NIBS, 1999], sendo uma extensão do modelo proposto por Stojanovski and Dong [1994] [citados em FEMA & NIBS, 1999].

⁴ De realçar que apenas parte dos edifícios no estado limite de danos perdas totais colapsa totalmente.

O modelo estima as perdas humanas resultantes de um determinado sismo com base no desenvolvimento de uma árvore de eventos. Esta árvore de eventos inicia-se com um dado cenário sísmico e segue o curso possível dos acontecimentos que conduz às perdas de vidas humanas e à ocorrência de feridos.

A cada ramo da árvore de eventos é atribuída uma probabilidade de ocorrência, obtida de forma subjectiva.

Dado que os sismos são acontecimentos raros a probabilidade de cada ramo é inferida a partir de estatísticas existentes de perdas humanas, combinadas com a opinião de especialistas, com estatísticas clássicas e inferência Bayesiana.

Para exemplificar, a figura 3.7 representa de forma simplificada o modelo em árvore de eventos utilizado pela metodologia FEMA & NIBS, contemplando apenas o quarto nível de gravidade de ferimentos e reportando-se a uma única tipologia do edificado.

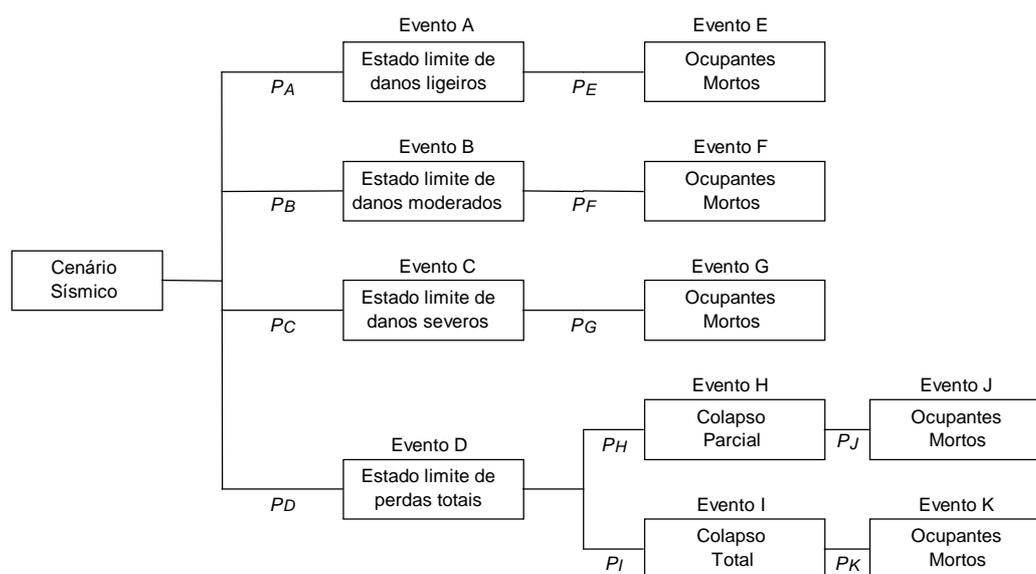


Figura 3.7 – Modelo em árvore de eventos para o cálculo da probabilidade de ocupantes mortos em consequência de sismos [adaptado do FEMA & NIBS, 1999].

Assumindo que as probabilidades de todos os ramos são conhecidas, a probabilidade de um ocupante ser morto, P_{morto} , é dada pela seguinte expressão:

$$P_{morto} = (P_A * P_E) + (P_B * P_F) + (P_C * P_G) + P_D * (P_H * P_J + P_I * P_K) \quad (6)$$

Introduzindo as substituições:

$$P_{morto} / colapso = P_D * P_I * P_K \quad (7)$$

e

$$P_{morto} / sem\ colapso = (P_A * P_E) + (P_B * P_F) + (P_C * P_G) + (P_D * P_H * P_J) \quad (8)$$

A equação (6) pode ser rescrita de forma simplificada:

$$P_{morto} = P_{morto} / colapso + P_{morto} / sem\ colapso \quad (9)$$

O número esperado de ocupantes mortos ($EN_{ocupantes\ mortos}$) resulta do produto do número de ocupantes do edifício, na altura do sismo ($N_{ocupantes}$) com a probabilidade de cada ocupante morrer (P_{morto}).

$$EN_{ocupantes\ mortos} = N_{ocupantes} * P_{morto} \quad (10)$$

No Anexo A apresentam-se as percentagens de perdas humanas para os diversos níveis de severidade de ferimentos, estado de danos e para as tipologias da metodologia FEMA & NIBS mais representativas das existentes em Portugal.

3.5.3. Estimativa de desalojados

3.5.3.1. Dados

Os dados necessários para calcular o número de alojamentos inabitáveis e o número de famílias desalojadas, são os seguintes:

- número total de alojamentos uni e multifamiliares;
- número total de famílias;
- probabilidade de ocorrerem danos estruturais moderados, extensivos e perdas totais em alojamentos uni e multifamiliares;
- probabilidade dos alojamentos ficarem sem energia e/ou água.

3.5.3.2. Modelo e Resultados

A estimativa do número de alojamentos inabitáveis é obtida a partir das seguintes fontes:

- número de alojamentos inabitáveis devido a danos estruturais. Este número é determinado através do número de alojamentos (i) inabitáveis devido a danos estruturais efectivos, e (ii) danificados e considerados inabitáveis pelos residentes;

- número de alojamentos inabitáveis em consequência da perda de infra-estruturas (água, electricidade, etc).

A metodologia considera inabitáveis todos os alojamentos localizados em edifícios no estado limite de danos perdas totais. Por outro lado, distingue os habitantes de edifícios unifamiliares dos multifamiliares, considerando que os primeiros toleram mais facilmente os danos sendo mais provável que continuem a viver na sua habitação desde que não esteja completamente danificada, enquanto que os segundos encaram os seus alojamentos como inabitáveis logo que estejam num estado de danos moderado.

Embora não seja explícito na metodologia FEMA & NIBS, pensamos que esta distinção na percepção do risco se deve principalmente a dois factores que contribuem para diminuir o nível de risco tolerável dos habitantes de estruturas multifamiliares: (i) parte das estruturas multifamiliares é associada a propriedade arrendada e (ii) os habitantes de estruturas multifamiliares não controlam ou não conhecem globalmente o estado de danos do respectivo edifício.

Por fim, aplicando uma taxa de ocupação (número de famílias por alojamento) o modelo converte o número de alojamentos considerados inabitáveis em número de desalojados.

3.5.4. Estimativa das necessidades de abrigos temporários

3.5.4.1. Dados

Para além da estimativa dos desalojados obtida pelo modelo da secção anterior os dados necessários, por unidade geográfica, para estimar as necessidades de abrigos temporários são os seguintes:

- população residente;
- número total de famílias;
- percentagem de famílias por classes de rendimento;
- percentagem de famílias por classes étnicas;
- percentagem de famílias residentes em habitação própria;
- percentagem de famílias residentes em habitação arrendada;
- percentagem de população por grupos etários.

3.5.4.2. Modelo e Resultados

Pressupõe-se que todos os residentes em alojamentos que ficaram inabitáveis procurarão abrigos temporários. Contudo, alguns recorrem a familiares e amigos, outros a hotéis ou ao próprio automóvel. O modelo apenas estima o número de desalojados que procuram abrigos públicos temporários, tendo por base os conhecimentos adquiridos em desastres naturais ocorridos no passado (sismos e furacões), em particular no sismo de Northridge.

Assim, nestes desastres verificou-se que as famílias que procuram abrigos públicos pertencem às classes de menores rendimentos, têm crianças pequenas ou são constituídas por elementos idosos. Verificou-se ainda que para rendimentos similares, a população hispânica tem uma maior percepção do risco.

Para estimar as necessidades de abrigos temporários o modelo utiliza os dados atrás referidos e pondera-os recorrendo a uma série de factores.

Estes factores de ponderação baseiam-se na opinião de especialistas tendo sido calibrados pelos conhecimentos sobre as perdas humanas após o sismo de Northridge.

3.6. Metodologias desenvolvidas para regiões específicas do Globo

3.6.1. Turquia [Gulkan *et al.*, 1992]

Gulkan *et al.* [1992] desenvolveram matrizes de probabilidade de danos e curvas de fragilidade, funções da intensidade macrossísmica, com base em observações quantitativas de danos recolhidos durante três décadas de levantamentos pós-sismo na Turquia.

Os autores ilustram a aplicação das ferramentas desenvolvidas em estudos de estimativas de perdas e em simulações de cenários para o planeamento de emergência.

Analisando as estatísticas sobre mortos e feridos, Gulkan *et al.* [1992] concluem que para a mesma intensidade macrossísmica existem grandes variações entre as diferentes regiões da Turquia, devido a diferentes práticas construtivas e diferentes níveis de qualidade da construção.

Fazendo esta ressalva os autores apresentam uma matriz de perdas humanas, definida pela razão entre o número de mortos e o de edifícios colapsados, para vários graus de intensidade macrossísmica e tipologias do edificado (quadro 3.7).

Quadro 3.7 – Razão entre o número de mortos e o de edifícios colapsados [adaptado de Gulkan et al., 1992].

<i>Intensidade MSK</i>				
<i>Tipo de Edifício</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>
Alvenaria de Pedra	0,002	0,008	0,080	0,130
Alvenaria de Adobe	0,002	0,008	0,080	0,130
Alvenaria de Tijolo	0	0,001	0,010	0,050
Estrutura de Madeira	0	0	0,003	0,020
Estrutura de Betão Armado	0	0	0,002	0,010

Para ilustrar a variabilidade atrás mencionada apresentam uma segunda matriz, agora com as razões entre o número de mortos e o de feridos para duas regiões da Turquia e para vários graus de intensidade macrossísmica (quadro 3.8).

Quadro 3.8 – Razão entre o número de mortos e o de feridos [adaptado de Gulkan et al., 1992].

<i>Intensidade MSK</i>				
<i>Regiões da Turquia</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>
Este	0,23	0,26	1,32	4,67
Oeste	0,10	0,09	0,30	0,49

Para além destas matrizes os autores desenvolveram uma relação empírica entre o número de mortos D , e o número de edifícios severamente danificados ou colapsados, N :

$$D = C * N^{1,32} \quad (11)$$

em que o coeficiente C depende da tipologia do edificado de acordo com o preconizado no quadro 3.9:

Quadro 3.9 – Coeficiente C e tipologia do edificado [adaptado de Gulkan et al., 1992].

<i>Tipologia de Edifício</i>	<i>C</i>
Alvenaria de pedra e adobe	0,010
Alvenaria de tijolo	0,008
Madeira	0,005
Betão armado	0,003

3.6.2. China [Yang *et al.*, 1992]

Yang *et al.* [1992] desenvolveram um sistema inteligente para a avaliação de danos em consequência de sismos, e aplicaram-no em diversas cidades de pequena e média dimensão da China.

O sistema permite prever os danos causados por sismos nos edifícios de uma cidade, avaliar perdas de bens materiais e humanas, identificar as tipologias de edifícios e regiões de maior risco, e ser usado como base para o desenvolvimento de programas de mitigação do risco sísmico.

De acordo com os autores as perdas humanas estão relacionadas com a intensidade do sismo, com o tipo e dimensão do edifício e com o instante do dia em que o sismo ocorre (dia / noite).

O modelo apresentado pelos autores para estimar perdas humanas e económicas para uma dada intensidade i , é o seguinte:

$$L_i = \sum_{j=1}^6 P(D)_{ij} * l_j * N * m_i \quad (12)$$

em que, j é o nível de danos, $P(D)_{ij}$ é a probabilidade do nível de danos j dada a intensidade i , l_j é a razão de perdas humanas ou económicas dado o nível de danos j , N representa a população ou o valor do elemento em risco e m_i é um coeficiente relacionado com a causa das perdas e com a intensidade i .

No quadro 3.10 apresenta-se a relação entre o índice de danos e as perdas humanas ou económicas.

Quadro 3.10 – Relação entre o nível e o índice de danos e as perdas humanas e económicas [adaptado de Yang et al., 1992].

Nível de danos	Praticamente intacto	Danos ligeiros	Danos moderados	Danos severos	Colapso parcial	Colapso total
Índice de danos	[0-0,1] 0	[0,1-0,3] 0,2	[0,3-0,5] 0,4	[0,5-0,7] 0,6	[0,7-0,9] 0,8	[0,9-1,0] 1,0
Perdas nos edifícios (%)	[0-1] 0,4	[1-8] 3,8	[8-20] 12	[20-60] 36	[60-95] 82	[95-100] 100
Perdas nos recheios (%)	0 0	[0-1] 0,2	[1-5] 2,2	[5-20] 10,5	[20-50] 32	[50-100] 75
Feridos (%)	0 0	[0-0,02] 0,006	[0,02-0,1] 0,05	[0,1-3] 0,5	[3-30] 10	[30-70] 50
Mortos (%)	0 0	0 0	[0-0,01] 0,001	[0,01-1] 0,15	[1-10] 3	[10-30] 20

Para avaliar as perdas económicas e humanas num intervalo de tempo de 50 anos, com base em estudos probabilísticos de casualidade sísmica, os autores propõem a seguinte expressão:

$$L_{50} = \sum_{i=6}^{10} \{ P(\hat{I} > i)_{50} - P[\hat{I} > (i+1)]_{50} \} * L_i \quad (13)$$

em que, $P(\hat{I} > i)$ e $P[\hat{I} > (i+1)]_{50}$ são as probabilidades de excedência das intensidades i e $i+1$ num intervalo de tempo de referência de 50 anos.

3.6.3. Arménia [Murakami, 1992]

Tal como a metodologia FEMA & NIBS [1999], Murakami [1992] já tinha proposto um modelo de simulação baseado numa árvore de eventos, para descrever o processo de perdas humanas em consequência do colapso de diferentes tipos de edifícios.

O autor reconhece a dificuldade em estimar as probabilidades para cada ramo da árvore de eventos.

Por simplicidade, o modelo assume que as pessoas que estejam fora dos edifícios, ou dentro de edifícios que não colapsam não morrem.

À semelhança de Coburn & Spence [1992] este modelo tem em consideração a taxa de aprisionamento e de mortalidade no caso de aprisionamento.

De acordo com o modelo de Murakami [1992], o rácio médio de mortos para uma dada intensidade I , exprime-se por:

$$Pd(I) = Ph * \sum_j [Phj * Pcj(I) * Ptj * Pffj] + Pw * \sum_k [Pwk * Pck(I) * Ptk * Pfk] \quad (14)$$

em que Ph é o rácio de ocupantes em edifícios residenciais, Pw é o rácio de ocupantes em edifícios não residenciais, Phj é o rácio de edifícios residenciais do tipo j ($\sum_j Phj = 1$), Pwk é o rácio de edifícios não residenciais do tipo k ($\sum_k Pwk = 1$), Pcj é a razão de colapsos de edifícios do tipo j (ou k) dada uma intensidade I , Ptj é a taxa de aprisionamento de um edifício do tipo j e $Pffj$ é a taxa de mortalidade em caso de aprisionamento num edifício do tipo j .

O modelo foi aplicado a um cenário semelhante ao do sismo da Arménia (Spitak) de 1988, tendo as probabilidades atrás mencionadas sido aferidas a partir das estatísticas deste sismo.

O autor conclui que os resultados da aplicação estão de acordo com o observado no sismo, nomeadamente, no que toca à distribuição das vítimas pelo tipo e utilização da construção.

4. SIMULAÇÃO DAS PERDAS HUMANAS NO SISMO DA TERCEIRA DE 1980

Efectuou-se a aplicação das metodologias Tiedemann, Coburn & Spence e FEMA & NIBS ao parque habitacional e população residente no Grupo Central do Arquipélago dos Açores, estimando-se as perdas humanas em termos do número de mortos e feridos, tendo como referência o sismo da Terceira de 1980.

Como foi referido no capítulo 2 este sismo ocorreu a 1 de Janeiro de 1980, dia feriado, teve o seu epicentro localizado a 27,8° de longitude Oeste e a 38,8° de latitude Norte, com uma magnitude de 7,2 na escala de Richter e causou 63 vítimas mortais e cerca de 400 feridos [Oliveira *et al.*, 1992]. Este número de vítimas representa 0.09% (mortos) e 0.57% (feridos) do total dos ocupantes das ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa estimados para 1980. O evento destruiu 5 455 edifícios de habitação no Grupo Central, sendo a ilha Terceira a mais afectada contabilizando 87% do parque total destruído, seguida da ilha de S. Jorge (10%) e da Graciosa (3%).

Foram efectuadas duas aplicações recorrendo-se a dois tipos de inventário dos elementos em risco recolhidos nos Censos 91 relativos ao Grupo Central do Arquipélago dos Açores (INE, 1994): (i) a simulação das perdas humanas tomando para elementos em risco as estimativas do parque habitacional e a distribuição da população existentes à data do sismo de 1980; (ii) a simulação das perdas humanas tomando por base a configuração do parque habitacional e a distribuição da população determinada nos Censos 91 para a região. As duas simulações foram efectuadas com a desagregação geográfica da freguesia [Campos Costa *et al.*, 2001].

Para se estimar os elementos em risco à data de 1980 e uma vez que a informação sobre o parque habitacional caracterizada por factores de vulnerabilidade como a época de construção, os elementos resistentes e o número de pisos, apenas se encontrava disponível para os Censos 91, procedeu-se da seguinte forma: (i) todas as tipologias construtivas posteriores a 1980 não foram consideradas e (ii) distribuiu-se a população residente em edifícios posteriores a 1980 pelas tipologias anteriores a 1980, nas proporções observadas no Censos 91, após se ter verificado que entre 1980 e 1991 a população residente sofreu um aumento de apenas 1% no Grupo Central.

As simulações efectuadas tiveram como finalidade analisar a viabilidade de aplicação das metodologias escolhidas a sismos e ao parque habitacional do Arquipélago dos Açores. Assim, como nessas metodologias existe um grande número de variáveis envolvidas tentou controlar-se algumas delas, ou seja, em primeiro lugar (figuras 4.1 e 4.2 em cima) pretendeu não se reflectir nas estimativas de perdas humanas os possíveis erros de caracterização da acção sísmica pelo que se efectuou uma exploração dos resultados fazendo variar um único parâmetro da acção sísmica, a

intensidade macrossísmica máxima; esta, sumariza a distribuição das intensidades estimadas para o Grupo Central, para diversos sismos com epicentro no mesmo local do de 1980, mas com magnitudes sucessivamente crescentes. Depois, (figuras 4.1 e 4.2 em baixo) pretendeu não se reflectir nas estimativas de perdas humanas os possíveis erros de caracterização da vulnerabilidade do parque, pelo que as perdas humanas foram simuladas directamente a partir do montante de edifícios colapsados estimados com base na metodologia FEMA & NIBS, nas distribuições de intensidades macrossísmicas referidas e nos elementos em risco existentes no Grupo Central.

Assim, nas figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se as estimativas do número de mortos e feridos para vários graus de intensidade macrossísmica máxima e para várias percentagens de edifícios colapsados, tendo como referência o sismo de 1980 e o parque habitacional e a distribuição da população existente no Grupo Central, à data de 1980 e dos Censos 91, respectivamente.

Nas figuras 4.1 e 4.2, verifica-se que o número de mortos estimado pelas metodologias Tiedemann e Coburn & Spence crescem mais rapidamente com a intensidade e com o número de edifícios colapsados do que o estimado pela metodologia FEMA & NIBS. No caso analisado verifica-se ainda que, para intensidades inferiores a VIII-IX, as avaliações da mortalidade pela metodologia FEMA & NIBS excedem as de Tiedemann. Por outro lado a metodologia Coburn & Spence estima valores para as vítimas mortais pelo menos uma ordem de grandeza acima dos estimados pelas outras metodologias e dos realmente verificados no sismo de 1980.

É interessante verificar nas figuras 4.1 e 4.2 (em baixo), e para o caso da metodologia FEMA & NIBS, que o número de pessoas afectadas varia linearmente com a percentagem de edifícios colapsados, sendo que o coeficiente de determinação da regressão linear é unitário. Este facto decorre naturalmente da forma como foram construídas na metodologia FEMA & NIBS as matrizes das taxas de mortalidade para várias tipologias de edifícios e para as várias classes de danos estruturais.

No caso da metodologia Tiedemann o melhor ajuste para a estimativa do número de mortos é obtido com uma função quase quadrática da percentagem de edifícios colapsados, enquanto que no caso da metodologia de Coburn & Spence a percentagem de edifícios colapsados vem afectada de um expoente que quase não varia com a alteração dos elementos em risco (1,5 para 1980 e 1,6 para 1991).

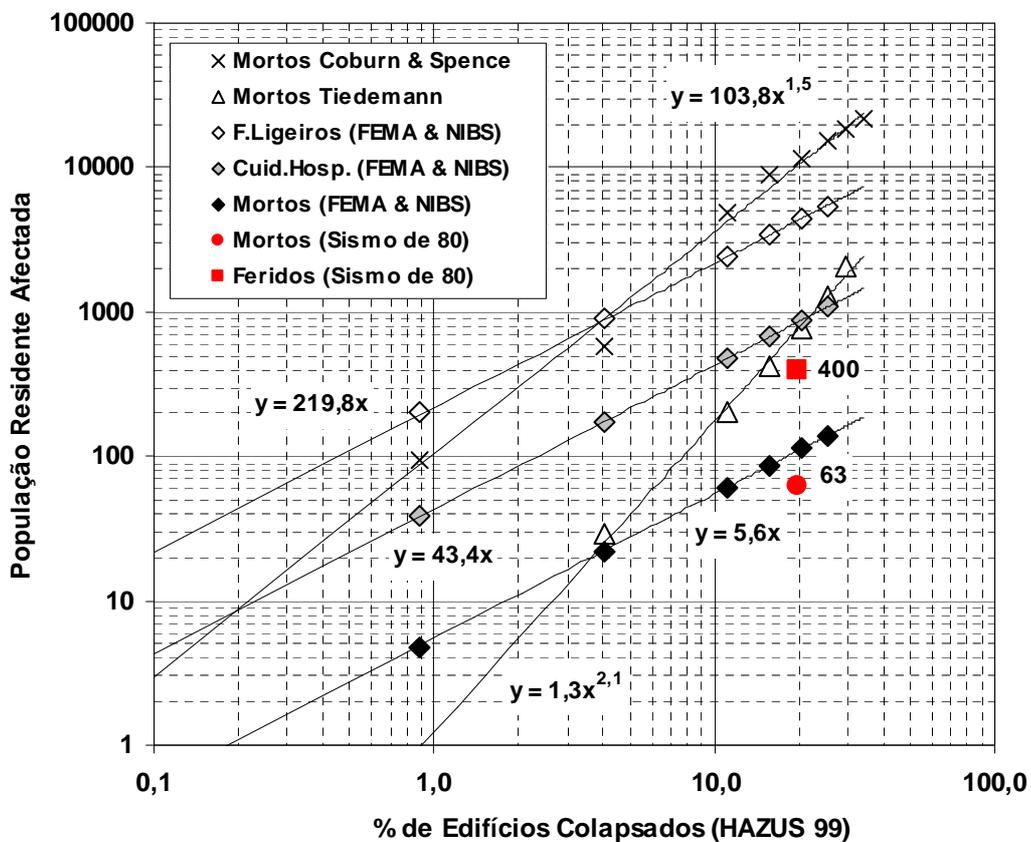
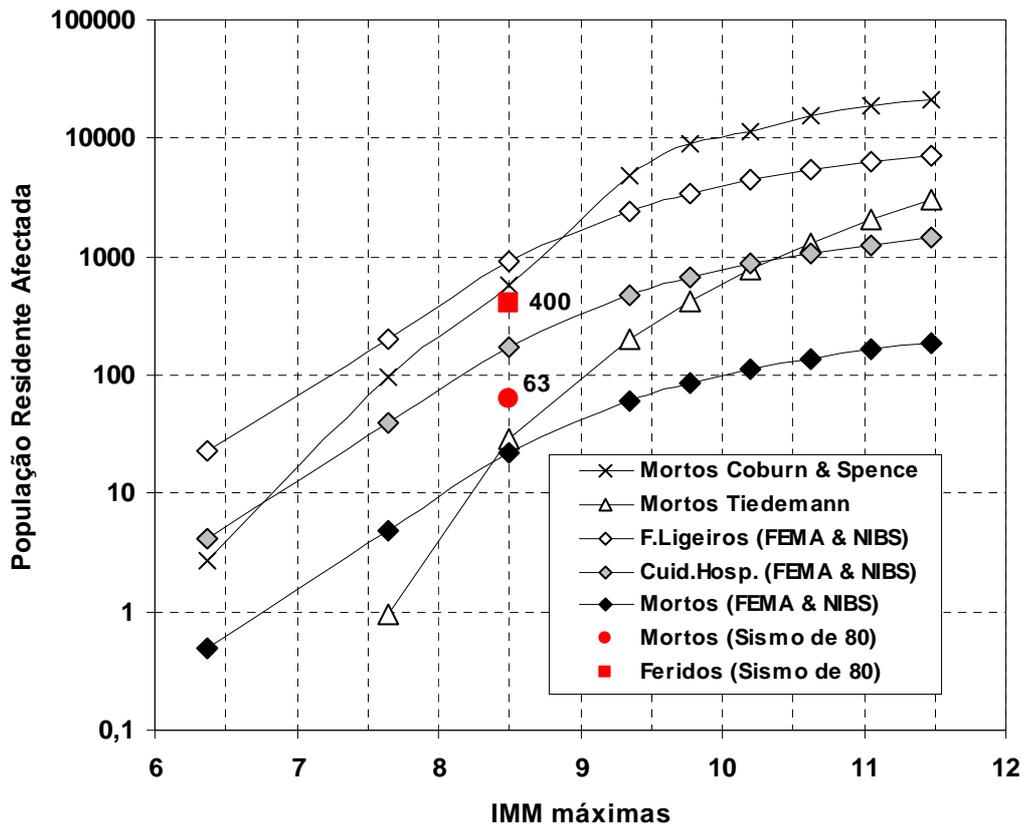


Figura 4.1 – Estimativa do número de mortos e feridos para o parque habitacional e população residente no Grupo Central do Arquipélago dos Açores à data do sismo de 1980.

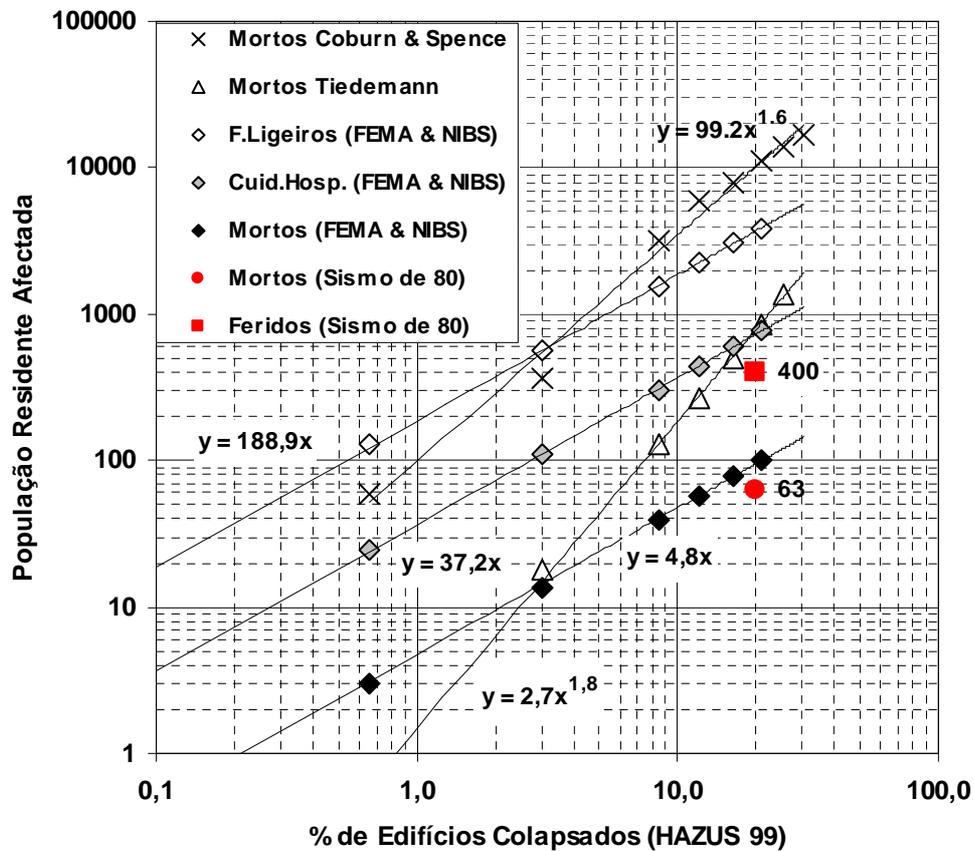
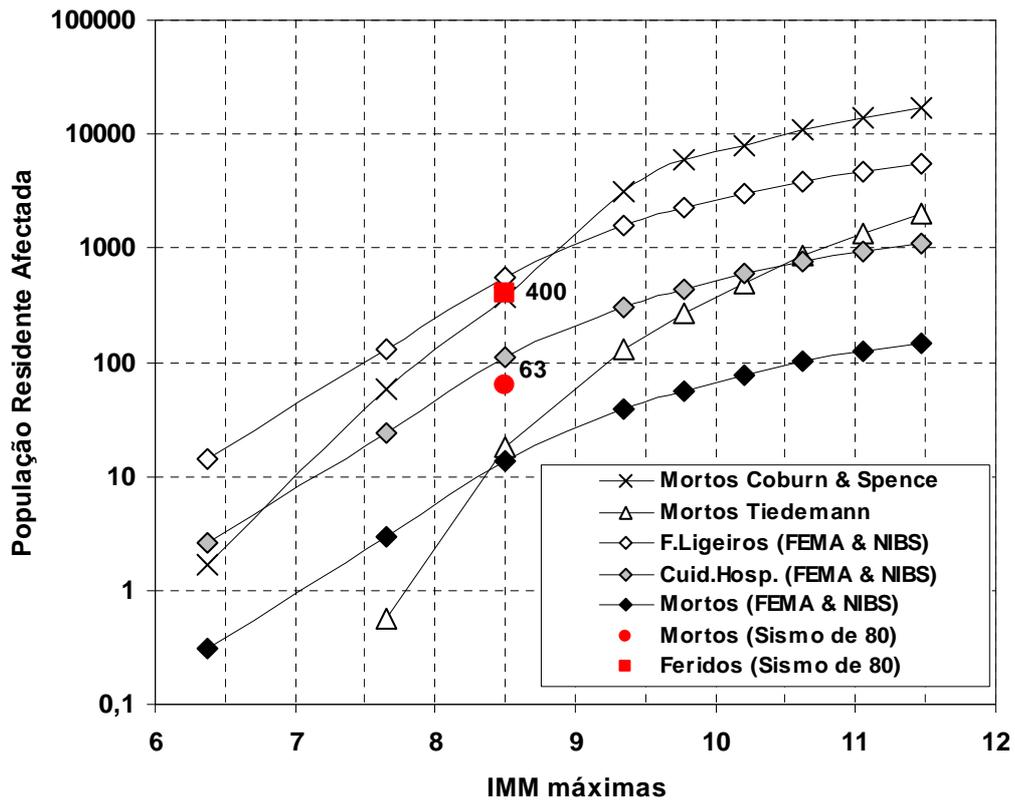


Figura 4.2 – Estimativa do número de mortos e feridos para o parque habitacional e população residente no Grupo Central do Arquipélago dos Açores à data dos Censos 91.

No quadro 4.1 apresentam-se os valores dos factores $M2$ a $M5$ da metodologia Coburn & Spence adoptados na presente simulação. Apresentam-se ainda os valores do factor $K_{s1} = K_{sb} / D_b * M1$ ou $K_{s1} = M2 * M3 * [M4 + M5 * (1 - M4)]$ que resulta da contribuição de todos os factores que afectam o potencial de mortalidade no modelo de Coburn & Spence (ver expressão 5 no capítulo 3).

Quadro 4.1 – Valores dos factores que afectam o potencial de mortalidade (M1) do modelo de Coburn & Spence utilizados na presente simulação.

Tipologia construtiva	IMM / Distância	M2	M3	M4*	M5	K_{s1}
Alvenaria	VI	0,95	0,05	0,20	0,50	0,029
	VII	0,95	0,05	0,20	0,50	0,029
	VIII	0,95	0,30	0,20	0,50	0,171
	IX	0,95	0,60	0,20	0,95	0,547
	X	0,95	0,70	0,20	0,95	0,638
Betão armado	Próximo	0,95	0,70	0,40	0,95	0,645
	Afastado	0,95	0,50	0,40	0,80	0,418

* M4 relativo aos mortos

Analisando o quadro 4.1 verifica-se que o factor K_{s1} apresenta, no caso das construções em alvenaria, uma discontinuidade importante entre as intensidades VII e VIII devida à grande variação do factor $M3$ e outra entre as intensidades VIII e IX devida à grande variação do factor $M5$. Da análise deste quadro e das figuras 4.1 e 4.2, em cima, conclui-se ainda que pequenas variações em determinadas gamas da intensidade macrossísmica implicam grandes variações nas estimativas das vítimas mortais. Desta forma o modelo de Coburn & Spence é muito sensível à variável intensidade macrossísmica o que é coerente com o facto dos factores relativos à construção em betão armado terem uma contribuição muito reduzida para as estimativas das vítimas apresentadas nas figuras 4.1 e 4.2, pois na simulação efectuada a percentagem de edifícios desta tipologia que colapsam é desprezível face à percentagem de colapsos dos edifícios em alvenaria.

Observando as figuras 4.1 e 4.2 poderá parecer inconsistente o facto do montante de mortos ser estimado por defeito, pelas metodologias Tiedemann e FEMA & NIBS, nas figuras de cima e por excesso nas de baixo. Essa inconsistência aparente explica-se pelo facto destas figuras, mais do que uma simulação, constituírem uma análise de sensibilidade às variáveis intensidade e número de edifícios colapsados. Assim, para os elementos em risco de 1980 e para a intensidade máxima do sismo de 1980, VIII-IX, o número de mortos estimado pela metodologia FEMA & NIBS foi de

22, enquanto que a percentagem de edifícios colapsados foi de 4%. Para se obter um número de mortos próximo de 63 ter-se-ia que estimar uma percentagem de colapsos de cerca de 11%. Isto significa que tendo como termo de comparação o sismo e o parque de 1980 no Grupo Central, a metodologia FEMA & NIBS estima por excesso os valores das perdas humanas, pois o que realmente se observou neste sismo foi um colapso do parque habitacional da ordem dos 20% e por esta metodologia bastariam 11% de colapsos para se obter o número de mortos ocorrido. Por outro lado, se a metodologia Tiedemann estima por defeito os valores das perdas humanas (29 mortos para a intensidade máxima VIII-IX) a metodologia Coburn & Spence estima o número de vítimas mortais muito por excesso (577 mortos para a intensidade máxima VIII-IX).

Aplicando as três metodologias apresenta-se, na figura 4.3, a variação das estimativas de mortos com a variação dos elementos em risco entre 1980 e 1991.

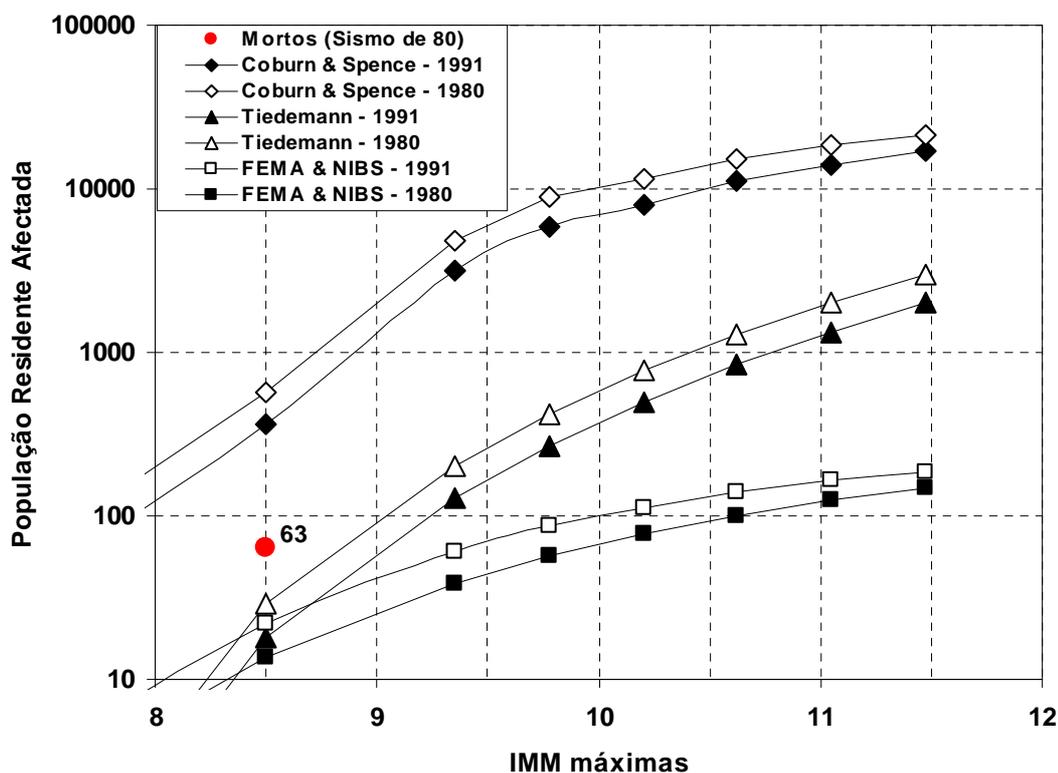


Figura 4.3 – Estimativas do número de mortos para os elementos em risco em 1980 e em 1991 no Grupo Central do Arquipélago dos Açores.

Da análise da figura verifica-se uma diminuição das estimativas do número total de vítimas mortais quando se efectua as simulações com os elementos em risco de 1991 em lugar dos de 1980. Esta diminuição apenas reflecte a influência da construção posterior a 1980 na melhoria da vulnerabilidade do parque habitacional do

Grupo Central. De facto, a mitigação observada ainda seria mais expressiva caso se tivesse considerado, nos elementos em risco de 1991, o reforço de cerca de duas dezenas de milhar de fogos, efectuado após o sismo de 1980.

Para terminar saliente-se que as funções de vulnerabilidade humana apresentadas (figuras 4.1 a 4.3), ou as rectas ajustadas nas figuras 4.1 e 4.2 em baixo, reflectem a vulnerabilidade da população residente, estando porém afectadas pela distribuição da intensidade macrossísmica, pela natureza do parque e pela distribuição da população pelo mesmo, nas datas analisadas. Desta forma, estas funções de vulnerabilidade humana apenas são válidas para a situação analisada.

Tendo em consideração esta restrição refira-se que estas figuras poderão desempenhar um papel fundamental em estudos de avaliação de risco sísmico, bastando para tal conhecer as probabilidades de excedência dos vários graus de intensidade.

5. ANÁLISE CRÍTICA DAS METODOLOGIAS

5.1. Enquadramento

No capítulo 3 do presente relatório apresentaram-se algumas das metodologias publicadas na literatura internacional para a avaliação das perdas humanas em consequência de sismos.

De salientar que não se pretendeu descrever de forma exaustiva o estado da arte sobre este tipo de avaliações, mas tão somente apresentar as metodologias mais relevantes (secções 3.2 a 3.5), de maior divulgação e aplicabilidade a nível mundial. Na secção 3.6 apresentaram-se ainda outras metodologias de aplicação mais restrita, pois os respectivos parâmetros foram aferidos para regiões específicas do Globo.

As metodologias ATC 13, Tiedemann, Coburn & Spence e FEMA & NIBS possuem algumas características comuns decorrentes de existir uma forte correlação entre os danos no edificado e o número de vítimas causadas por sismos. Como esses danos dependem naturalmente da intensidade da acção sísmica e da vulnerabilidade do edificado é possível identificar quatro módulos comuns a estas metodologias: os módulos da acção sísmica, da vulnerabilidade do edificado, dos danos no edificado e das perdas humanas. As metodologias Coburn & Spence e FEMA & NIBS especificam informação e procedimentos adicionais que permitem identificar um quinto módulo, o da vulnerabilidade humana.

As figuras 5.1 a 5.4 ilustram de uma forma esquemática os pressupostos, a informação necessária e os procedimentos envolvidos nas quatro metodologias mais relevantes. Com base nestas figuras, na apresentação das metodologias efectuadas no capítulo 3 e na aplicação efectuada no capítulo 4, far-se-á, para cada módulo identificado, a análise comparativa e crítica destas quatro metodologias.

5.2. Módulo da acção sísmica

A caracterização da acção sísmica é feita nas metodologias ATC 13 e Tiedemann recorrendo à intensidade macrossísmica que é uma grandeza subjectiva e classificada numa escala ordinal.

Coburn & Spence consideram que a variável intensidade macrossísmica possui fraca correlação com os níveis de danos observados, devido não tanto à avaliação dos estados de dano nos levantamentos pós-sismo, mas principalmente na própria avaliação e variabilidade da intensidade sísmica. Assim, os autores elaboraram uma nova escala de intensidade do movimento do solo, definida directamente a partir de

levantamentos de danos pós-sismos, com o objectivo de aumentar a precisão das estimativas dos danos no edificado, sendo designada de escala de intensidade não-paramétrica⁵, ou escala PSI (ψ). Coburn & Spence apresentam ainda correlações entre a escala PSI e outros parâmetros do movimento do solo tal como a aceleração de pico.

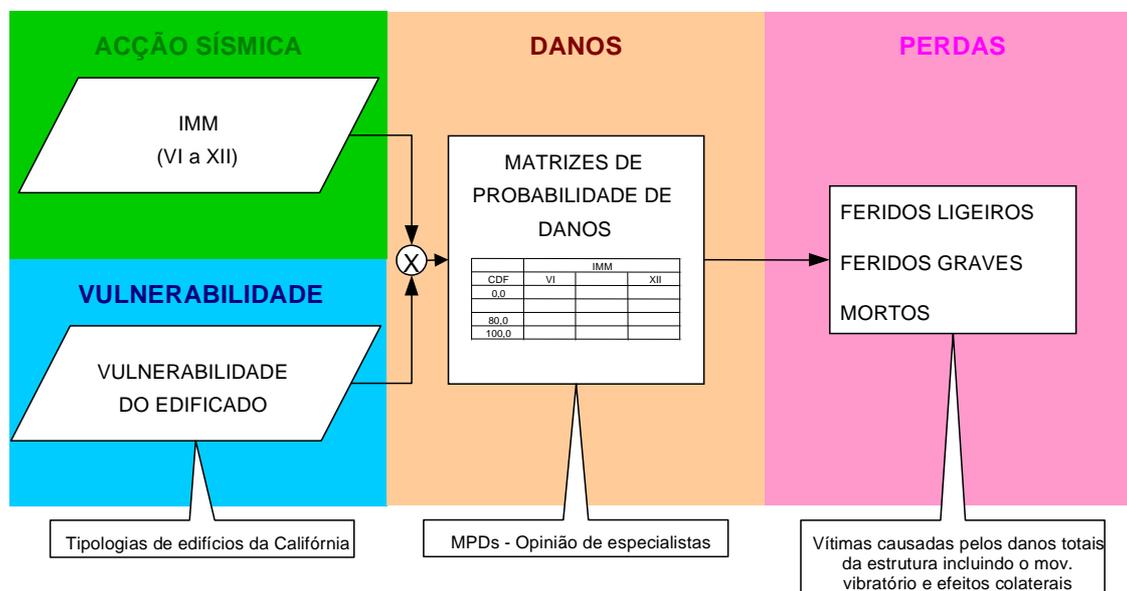


Figura 5.1 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia ATC 13.

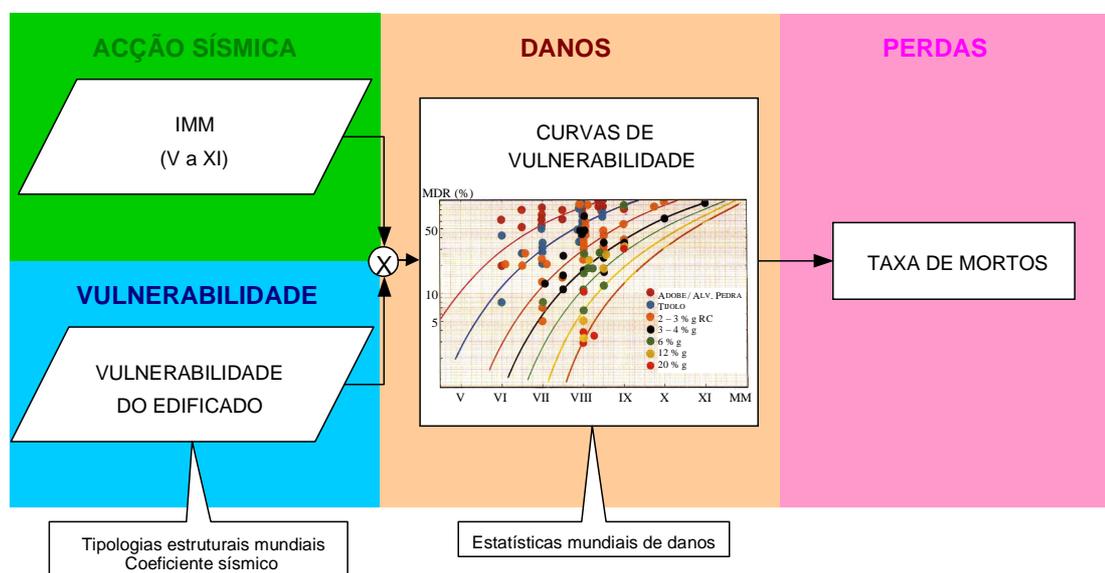


Figura 5.2 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia Tiedemann.

⁵ No original: *parameterless scale of seismic intensity*.

Já a metodologia FEMA & NIBS descreve a acção sísmica utilizando um espectro de resposta o que permite, recorrendo a um modelo do comportamento da estrutura (curvas de capacidade), avaliar directamente a resposta do edificado a essa acção sísmica.

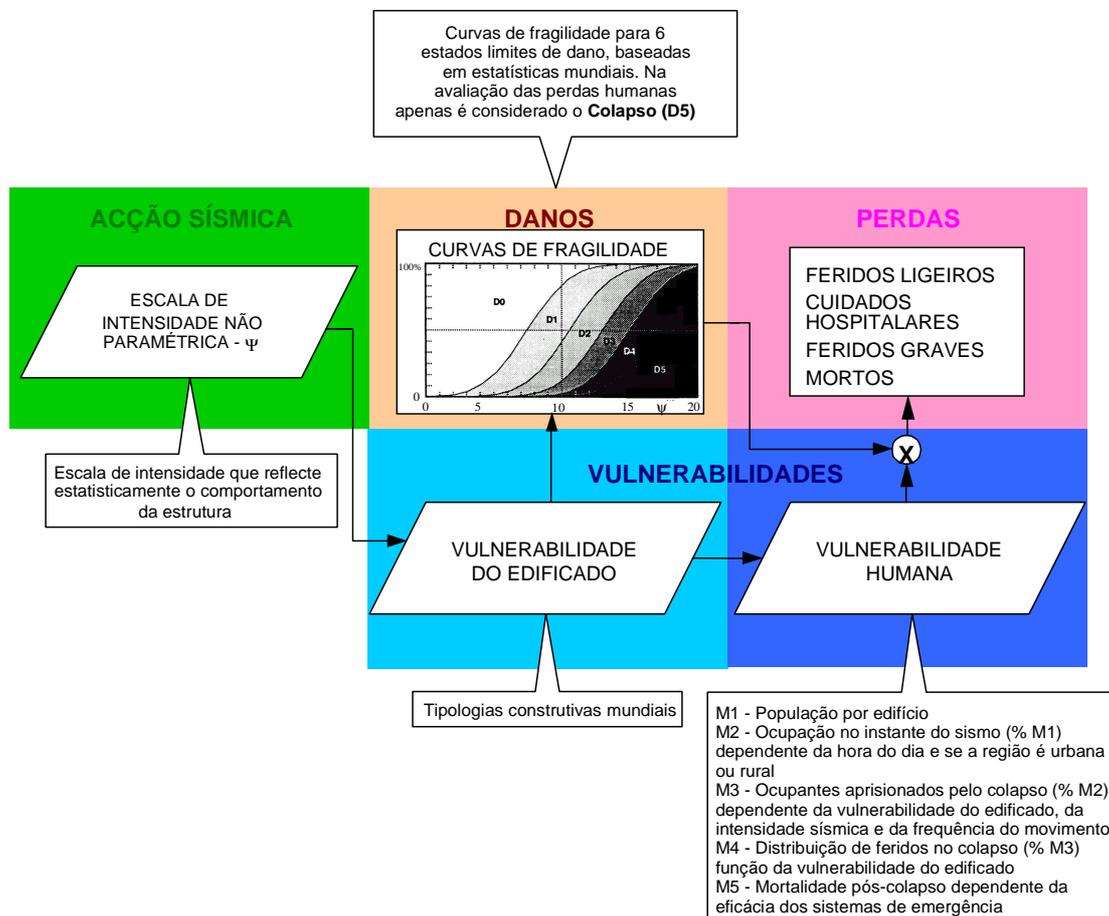


Figura 5.3 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia Coburn & Spence.

O espectro de resposta utilizado pela metodologia FEMA & NIBS é porém uma grandeza matematicamente mais sustentável para traduzir a resposta do edificado do que a escala PSI, além do que esta última não se revelou de grande divulgação nem de fácil aplicação. A quantificação espectral da acção sísmica é ainda uma vantagem da metodologia FEMA & NIBS em relação às restantes metodologias, pois permite a introdução da altura do edificado como mais um factor de vulnerabilidade idealizado matematicamente (análise dinâmica).

5.3. Módulo da vulnerabilidade do edificado

No que diz respeito ao módulo da vulnerabilidade do edificado todas as quatro metodologias agrupam os elementos em risco em classes com um desempenho

sísmico aproximadamente homogéneo. Assim, os edifícios de uma dada região, são classificados em tipologias construtivas que possuem factores de vulnerabilidade comuns, ou seja, características semelhantes que condicionam a sua resposta à acção sísmica e conseqüentemente o nível de danos causados pelos sismos.

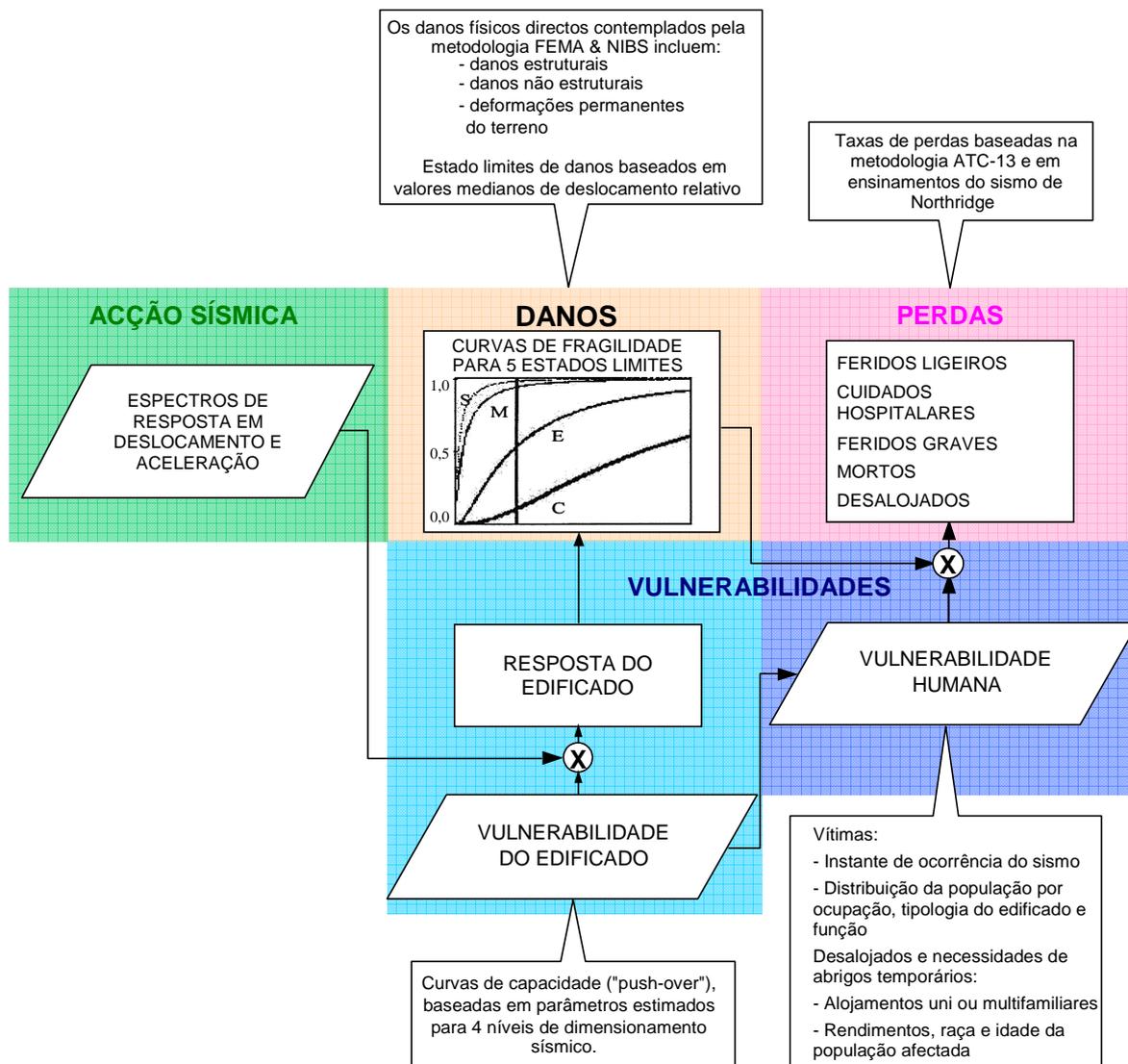


Figura 5.4 – Fluxograma do procedimento de avaliação de perdas humanas pela metodologia FEMA & NIBS .

As classificações tipológicas das metodologias Tiedemann e Coburn & Spence abrangem a construção mundial, sendo reconhecido que as classes tipológicas identificadas apenas serão homogéneas no mesmo país e região, enquanto que as classificações da metodologia ATC 13 e FEMA & NIBS se restringem, primordialmente, à região da Califórnia.

A metodologia FEMA & NIBS baseia-se na classificação tipológica da publicação FEMA 178 [FEMA, 1992] que define 36 tipologias para as construções da Califórnia. A metodologia FEMA & NIBS é, entre os 4 analisados, o mais sofisticado, pois caracteriza a vulnerabilidade dos edifícios recorrendo a curvas de capacidade que caracterizam a resistência global dos mesmos a deslocamentos horizontais impostos ao longo da sua altura, após se assumir uma série de hipóteses simplificativas sobre o comportamento dinâmico não linear das estruturas. Desta forma, as curvas de capacidade podem ser estimadas com base nos principais aspectos ligados ao desempenho sísmico de um edifício tendo em consideração os níveis do seu dimensionamento sísmico. A grande vantagem desta metodologia é que sendo todos os parâmetros do modelo explícitos, eles são passíveis de serem calibrados para o parque edificado da região em que as avaliações de risco são efectuadas.

Por oposição, na metodologia Tiedemann a vulnerabilidade da construção é abordada de uma forma mais simplificada, sendo apenas função das tipologias do edificado que englobam edifícios de adobe, alvenaria de tijolo não reforçada e betão armado. No caso desta última tipologia a vulnerabilidade é quantificada pelo respectivo coeficiente sísmico. Tiedemann [1990] reconhece que o coeficiente sísmico é uma variável muito grosseira para exprimir a vulnerabilidade do edificado, tendo apenas a vantagem de ser quantificável. Os danos esperados dependem de muitos outros parâmetros, sendo os mais importantes apresentados pelo autor. Porém, esta metodologia tem a virtude de ser de fácil aplicação, enquanto que a calibração dos parâmetros da metodologia FEMA & NIBS se pode revelar uma tarefa muito complexa.

Coburn & Spence [1992] consideram que o tipo de sistema estrutural para resistir à acção dos sismos é o factor de vulnerabilidade mais importante que influencia os danos em estruturas causados por sismos. Em alguns casos os elementos verticais (alvenaria, madeira ou pórtico de betão armado) é suficiente para definir a tipologia construtiva, enquanto que noutros o tipo de pavimentos e cobertura também é importante. Outro factor também considerado importante por estes autores para classificar o edificado é a data ou o período de construção. Para além destes factores de vulnerabilidade principais, Coburn & Spence [1992] consideram ainda outros factores secundários como sejam a configuração estrutural do edificado (irregularidades, etc.) efeitos de edifícios adjacentes e condições locais (inclinação do terreno, etc.), qualidade da construção e história do edificado (manutenção, modificações da estrutura, reforço, etc.).

Tal como as metodologias Tiedemann e Coburn & Spence, a metodologia ATC 13 também se limita a classificar tipologicamente a vulnerabilidade do edificado, não quantificando parâmetros relacionados com o respectivo desempenho sísmico. A metodologia ATC 13 identifica algumas características estruturais (material de construção, altura, idade, etc.) que influenciam os possíveis danos que sofrerão num sismo e classifica a construção da Califórnia em 78 classes de estruturas, 40 de edifícios e 38 de outro tipo.

5.4. Módulo da vulnerabilidade humana

As metodologias FEMA & NIBS e Coburn & Spence introduzem factores adicionais, para além da vulnerabilidade do edificado, que contribuem para modelar a vulnerabilidade humana.

A metodologia Coburn & Spence especifica uma série de factores originais, que na prática se tem verificado influenciarem o potencial de mortalidade, mas cuja quantificação se revela discutível, verificando-se que os resultados do modelo são muito sensíveis aos valores atribuídos a esses factores. Além disso, Coburn & Spence [1992] introduzem uma série de simplificações no seu modelo, salientando-se aquela que restringe o número de mortos e feridos ao subconjunto daqueles que ficam aprisionados devido ao colapso. Deste subconjunto, o modelo assume que todos sofrem algum tipo de ferimento, enquanto que relativamente ao conjunto complementar o modelo assume que ninguém morre ou sofre ferimentos.

Entre as metodologias analisadas a FEMA & NIBS é a única contemplar outras vulnerabilidades humanas para além das que conduzem às estimativas do número 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 adicional ou a utilizar os valores de defeito apresentados na metodologia. Refira-se porém, que tal como para o módulo de vulnerabilidade do edificado, estes valores de defeito são difíceis de calibrar para contextos diferentes da situação original para a qual foi desenvolvida a metodologia.

5.5. Módulo dos danos

Neste módulo a metodologia ATC 13 especifica matrizes de probabilidade de danos (MPD), função da intensidade macrossísmica, construídas para cada tipologia construtiva com base na opinião de especialistas. Esta técnica revelou-se muito útil para gerar curvas de vulnerabilidade e matrizes de probabilidade de danos para classes

tipológicas razoavelmente bem conhecidas em termos estruturais, mas para as quais não existe muita informação disponível sobre danos [Coburn & Spence, 1992].

Por seu lado a metodologia Tiedemann apresenta curvas de vulnerabilidade, baseadas em estatísticas mundiais de danos e perdas humanas causadas por sismos, função da intensidade macrossísmica e parametrizadas pelo coeficiente sísmico para o caso das tipologias de betão armado. Uma das simplificações desta metodologia relaciona-se com o facto das curvas de vulnerabilidade apresentadas se limitarem aos valores médios, não sendo conhecidas as incertezas das respectivas distribuições; uma segunda simplificação, apontada aliás pelo próprio autor, relaciona-se com o fraco poder explicativo da variável coeficiente sísmico para prever os danos causados por sismos nas estruturas e seus ocupantes.

A metodologia Coburn & Spence propõe curvas de vulnerabilidade para tipologias construtivas identificadas no módulo da vulnerabilidade. Para algumas classes de estruturas os autores acrescentam intervalos de confiança, em torno dos valores médios previstos pelas curvas de vulnerabilidade permitindo a construção de curvas de fragilidade. Estas curvas são função da escala de intensidades PSI e são definidas para 5 estados de dano (Danos Ligeiros, Moderados, Severos, Destruição Parcial e Colapso) e para um sexto estado de Ausência de Danos. No entanto, como foi referido, as perdas humanas apenas são estimadas para o estado de dano correspondente ao colapso.

Mais uma vez a metodologia FEMA & NIBS apresenta os procedimentos mais sofisticados para estimar os danos causados por sismos em edifícios, depois destes serem classificados por tipologias e de se ter estimado o nível da acção sísmica actuante. A metodologia contempla danos em componentes estruturais e não estruturais de um edifício, sendo a severidade desses danos descrita por um de quatro estados de dano: Danos Ligeiros, Moderados, Severos e Totais, aos quais se acrescenta um quinto estado que descreve a Ausência de Danos. Quando se pretende estimar as perdas humanas o estado de dano Danos Totais subdivide-se ainda nos estados de dano Colapso Parcial e Colapso Total. Os estados de dano são definidos, por classe tipológica, pela descrição dos danos físicos nos elementos dos edifícios. A metodologia FEMA & NIBS desenvolve curvas de fragilidade (distribuições lognormais) que descrevem a probabilidade de se atingir ou exceder os diferentes estados de dano, condicionada por um dado nível do deslocamento espectral. Este nível correspondente à resposta espectral máxima da estrutura e resulta dum procedimento iterativo que conduz à intersecção entre um espectro de solicitação reduzido e a curva de capacidade mediana do edifício. Por outras palavras, são

estimados sucessivos espectros de solicitação de amortecimento efectivo crescente, sobre os quais se determinam os pontos da resposta até se atingir a convergência com a curva de capacidade. Os valores medianos das curvas de fragilidade das componentes estruturais dos edifícios baseiam-se nos deslocamentos relativos⁶ entre pisos correspondentes ao limiar dos estados de dano e contemplam o dimensionamento e o desempenho sísmico das tipologias construtivas.

5.6. Módulo das perdas humanas

A metodologia Tiedemann é aquela que estima as perdas humanas de forma mais simplificada limitando-se a avaliar a taxa de mortos por tipologia construtiva.

As metodologias ATC 13 e Coburn & Spence já descrevem as perdas humanas em termos de número de mortos e em 2 e 3 classes de gravidade de ferimentos, respectivamente.

A metodologia ATC 13 estima percentagens de mortos, feridos ligeiros e graves em função do estado de dano da construção e apenas para duas classes de construção, ou seja, metálicas ligeiras e de madeira e todos os outros tipos.

Por sua vez, a metodologia Coburn & Spence já estima o número de mortos, feridos ligeiros, necessitados de cuidados hospitalares e feridos graves para as várias classes tipológicas em que é possível avaliar o potencial de mortalidade. Porém, embora não seja referido pelos autores, o modelo de mortalidade de Coburn & Spence não se aplica directamente à estimativa de feridos, tendo que ser ligeiramente modificado devido ao factor $M5$, que representa um acréscimo de mortalidade pós-colapso condicionado pela eficácia dos sistemas de emergência.

Finalmente, a metodologia FEMA & NIBS para além de estimar o número de mortos, feridos ligeiros, necessitados de cuidados hospitalares e feridos graves, para 4 estados de dano e diversas classes tipológicas, apresenta a inovação de estimar o número de desalojados e as necessidades de abrigos temporários.

⁶ No original *drift ratios* [FEMA & NIBS, 1999].

6. CONCLUSÕES

A avaliação de perdas humanas em consequência de sismos é uma tarefa complexa, que reflecte a qualidade dos dados documentais e das estatísticas pós-sismo e a grande variabilidade do número de vítimas de sismo para sismo.

Na Introdução do presente relatório apresenta-se o enquadramento geral e nacional do tema abordado e explicita-se o âmbito e os objectivos do estudo.

Posteriormente, no capítulo 2, descrevem-se as perdas humanas ocorridas em alguns sismos históricos que afectaram Portugal Continental e também as perdas humanas que ocorreram em sismos severos recentes a nível mundial e nos mais significativos, e também recentes, a nível nacional.

A análise do quadro síntese 2.2, sobre as perdas ocorridas em sismos severos recentes, confirma a ideia de que a crescente concentração da população mundial em centros urbanos, tem originado um aumento anual das perdas económicas em consequência de sismos, verificando-se, que para sismos de severidade semelhante, ocorrem perdas humanas mais graves em países mais vulneráveis do ponto de vista sísmico.

Para exemplificar a afirmação anterior considere-se o caso dos sismos de Loma Prieta ($M_L=7,1$) e da Turquia-Izmit ($M_L=7,4$), em que as perdas económicas se situaram entre 5 e 10×10^9 USD\$ e entre 3 e $6,5 \times 10^9$ US\$, respectivamente, enquanto que as perdas humanas foram completamente distintas tendo ocorrido 62 mortos no primeiro caso e mais de 17 000 mortos no segundo, pois a Turquia é um país em que as vulnerabilidades do edificado e humanas são bastante superiores às dos Estados Unidos.

Também no sismo de Northridge ($M_L=6,4$) apesar de terem ocorrido apenas 57 vítimas mortais, os danos económicos foram muito elevados, entre 15 e 30×10^9 US\$, devido à paralisação da indústria e comércio durante um longo período de tempo.

Por outro lado atente-se ao caso dos sismos de Kobe e da Terceira, ambos com magnitude $M_L=7,2$, em que, no primeiro caso, as perdas económicas e humanas foram muito superiores às do segundo, devido à baixa concentração dos elementos em risco nos Açores.

Iniciou-se o capítulo 3 com a identificação, em termos gerais, das principais causas de mortes ocorridas em sismos, sendo realçada a grande variabilidade do número de vítimas de sismo para sismo.

No restante capítulo descrevem-se as metodologias publicadas internacionalmente que se consideram mais relevantes e de maior divulgação para a avaliação das perdas humanas em consequência de sismos, bem como outras de aplicação mais restrita, pois os respectivos parâmetros foram aferidos para regiões específicas do Globo.

Constata-se que existem um número elevado de metodologias para a avaliação das perdas humanas, com diversos graus de complexidade e detalhe nas estimativas, dependentes do conjunto de dados disponíveis, ou a colectar, e da diferenciação exigida aos especialistas que as aplicam. Como informação fundamental requerida por todos os métodos em geral, tem-se 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.

No capítulo 4 efectuou-se a aplicação das metodologias Tiedemann, Coburn & Spence e FEMA & NIBS ao parque habitacional e população residente no Grupo Central do Arquipélago dos Açores, estimando-se as perdas humanas em termos do número de mortos e feridos, tendo como referência o sismo da Terceira de 1980.

Como nestas metodologias existe um grande número de variáveis envolvidas, e com o objectivo de analisar a viabilidade de aplicação das metodologias escolhidas a um caso concreto efectuou-se a exploração dos resultados fazendo variar um único parâmetro da acção sísmica, a intensidade macrossísmica máxima e analisou-se a sensibilidade das metodologias ao montante de edifícios colapsados.

Das simulações efectuadas conclui-se sobre a viabilidade de aplicação das metodologias FEMA & NIBS e Tiedemann à estimativa do número de vítimas de sismos que afectem o Grupo Central do Arquipélago dos Açores, enquanto que a metodologia Coburn & Spence estima o número de vítimas mortais uma ordem de grandeza acima dos estimados pelas outras metodologias e dos realmente verificados no caso analisado. Analisam-se as causas desta sobreavaliação tendo-se concluído que nas simulações efectuadas a metodologia Coburn & Spence é muito sensível à variação da intensidade macrossísmica e aos diversos factores envolvidos, propostos de forma empírica.

A metodologia ATC 13 não foi aplicada pois é um modelo muito simples de avaliação de perdas humanas, que recorre a uma grandeza subjectiva para caracterizar a acção sísmica e que não discrimina as perdas humanas em termos de tipologias construtivas. Além do mais, os valores de defeito fornecidos pela metodologia FEMA & NIBS, que apresenta um nível de complexidade muito mais elevado, baseiam-se nos da metodologia ATC 13, e foram revistos tendo em consideração informação de outros sismos da Califórnia, em especial o de Northridge.

Paralelamente as três metodologias foram aplicadas a dois tipos de inventário dos elementos em risco, o de 1980 e o de 1991, verificando-se uma diminuição do número total de vítimas mortais o que reflecte a melhoria da construção em épocas mais recentes, conduzindo a uma mitigação do risco sísmico em termos do número de mortos no Grupo Central do Arquipélago dos Açores.

Em termos de investigação futura e ainda no capítulo 4 de aplicação das metodologias, importa realçar que o trabalho desenvolvido é um primeiro passo para um estudo de avaliação de risco sísmico no Grupo Central, pois basta conjugar os resultados agora obtidos com os de uma análise probabilística da casualidade sísmica.

Finalmente no capítulo 5 esquematiza-se os pressupostos, a informação necessária e os procedimentos envolvidos nas metodologias 4 metodologias consideradas mais relevantes e efectua-se a análise crítica das mesmas.

Conclui-se que a metodologia FEMA & NIBS é a que assenta em procedimentos mais sofisticados, sendo a mais recente e actual em termos do estado da arte em Engenharia Sísmica e sendo a única que contempla o desempenho sísmico das construções. No entanto, na aplicação efectuada as perdas humanas foram simuladas directamente a partir do montante de edifícios colapsados, pelo que a utilização integral desta metodologia requer a sua calibração, para ser possível reproduzir a vulnerabilidade específica do parque habitacional a que é aplicada.

Por outro lado, as restantes metodologias têm a virtude de serem de mais fácil aplicação, não requerendo a calibração de um número tão elevado de parâmetros a partir dos conhecimentos adquiridos em sismos ocorridos no passado que afectaram Portugal.

REFERÊNCIAS

ACADEMY OF SCIENCE OF U.S.S.R., 1996.

http://www.johnmartin.com/eqshow/647011_14.htm

ATC, 1985.

Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, ATC 13, Redwood City, California.

BAPTISTA, M.A., MIRANDA, P.M.A, MIRANDA, J.M. & MENDES-VITOR, L., 1998.

Constraints 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*, vol. 25, n.º 2.

BERZ, G., 1988.

List of Major Natural Disasters, 1960 – 1987. *Natural Hazards – An International Journal of Hazards Research & Prevention*, vol. 1, n.º 1, pp. 97-99.

CAMPOS COSTA, A., SOUSA, M.L., CASTRO, S. & MARTINS, A., 2001.

Metodologias para a Avaliação de Perdas Humanas em Consequência de Sismos. *5º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, Ponta Delgada, S. Miguel.

CARVALHO, A., SOUSA, M.L., OLIVEIRA, C.S., NUNES, J.C., CAMPOS COSTA, A., 2001.

Casualidade Sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, *5º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, Ponta Delgada, S. Miguel.

CHOFFAT, P. & BENSÁUDE, 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., 1992.

Earthquake Protection. John Wiley & Sons, pp. 253-321, Chichester - Nova Iorque – Brisbane – Toronto – Singapura.

EERI, 1999a.

<http://www.eeri.org/Reconn/Turkey0899/Turkey0899.html>

EERI, 1999b.

The ChiChi, Taiwan Earthquake of September 20, 1999. Earthquake Engineering Research Intitute, EERI Special Earthquake Report, EUA.

EERI, 2001.

Learning from Earthquakes – Preliminary Observations on the El Salvador Earthquakes of January 13 and February 13, 2001. Earthquake Engineering Research Institute, EERI Special Earthquake Report, Julho, EUA.

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, n.º 4, pp. 815 – 832, EUA.

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, n.º 1, pp. 11 – 33, EUA.

EQE INTERNATIONAL, 2000a.

<http://www.eqe.com/publications/lomaprie/introduc.htm>

EQE INTERNATIONAL, 2000b.

<http://www.eqe.com/publications/kobe/introduc.htm>

FARDIS, M.N. & BOUSIAS, S.N., 1999.

Engineering Aspects of the Mt. Parnes (Athens) Earthquake of 7/9/99. Structures Laboratory, Department of Civil Engineering, University of Patras, Grécia.

FEMA, 1992.

NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings. Federal Emergency Management Agency, FEMA 178, Washington, D.C., EUA.

FEMA & NIBS, 1999.

Earthquake Loss Estimation Methodology – HAZUS 99, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., EUA.

FORJAZ, VICTOR HUGO, 2000.

<http://www.geocities.com/Pentagon/Quarters/2765/cientifico.htm>

FRANÇA, J.A., 1977.

Lisboa Pombalina e o Iluminismo, Livraria Bertrand, Lisboa.

GEOCITIES, 2001.

<http://www.geocities.com/Pipeline/Dropzone/5171/taiwan.html>

GEOTECHNICAL COLLECTION, 2000.

<http://www.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/100/effects-kobe.html>

GULKAN, P., SUCOGLU, H. & ERGUNAY, O., 1992.

Earthquake Vulnerability, Loss and Risk Assessment in Turkey. *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 1, pp. 539 – 543, Madrid, Espanha.

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.

INXNET, 1999.

<http://www.inx.net/~turkiye/mim/izmitequake.htm>

LOH, CHIN-HSIUNG & TASAY, CHING-YEN, 2001.

Responses of the Earthquake Engineering Research Community to the Chi-Chi (Taiwan) Earthquake. *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, vol. 17, nº 4, pp. 635-656, Novembro, EUA.

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. Editado por Oliveira *et al.*, *Monografia - 10 Anos Após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*, vol. 2, pp. 663-791, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 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, n.º 4, pp. 605 – 621, EUA.

MEMBERS.THEGLOBE, 2002.

<http://members.theglobe.com/keoteba/history.html?nfhp=97599454&rld=519677468>

MOREIRA, V.S., 1984.

Sismicidade Histórica de Portugal Continental. Separata da Revista do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Março, Lisboa.

MURAKAMI, H.O., 1992.

A Simulation Model to Estimate Human Loss for Occupants of Collapsed Buildings in an Earthquake. *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 10, pp. 5969 - 5974, Madrid, Espanha.

NATIONAL GEOGRAPHIC PORTUGAL, 2001.

Rubrica **Geographica - Sismologia**, Julho.

NBC, 2001.

<http://www.msnbc.com/news/515848.asp?cp1=1>

NUNES, JOÃO C., ALVES, J.L. & FORJAZ, V.H. , 1992.

Sismicidade Instrumental dos Açores no período 1980-1989. Implicações Neotectónicas. Editado por Oliveira *et al.*, *Monografia – 10 Anos Após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*, vol. 1, pp. 141 – 160, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

NUNES, J.C., FRANÇA, Z., OLIVEIRA, C.S. & ORTIZ, R., 1998.

Distribuição das Intensidades Sísmicas na Ilha do Pico referentes ao Sismo de 9 de Julho de 1998: Condicionantes Morfológicas, Geológicas e Tectónicas. *1º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Lagos, Portugal.

OLIVEIRA, C. S., 1988.

Distribuição dos Danos Ocorridos em Lisboa Aquando dos Principais Sismos Históricos. *Revista Protecção Civil*, Serviço Nacional de Protecção Civil, vol. 1, n.º 4, Setembro.

OLIVEIRA, C. S., LUCAS, A.R.A. & GUEDES, J.H.C., 1992.

Monografia – 10 anos após o sismo de 1 de Janeiro de 1980. vol. 1 e 2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

OLIVEIRA, C. S., AZEVEDO, J., DELGADO, R., COSTA, A.G. & COSTA, A.C., 1995.

O Sismo de Northridge, Los Angeles - 17 de Janeiro de 1994, Ensinamentos para Portugal. Instituto de Construção, DECivil, Instituto Superior Técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

PEREIRA DE SOUSA, F.L., 1919-1932.

O Terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um Estudo Demográfico. Serviços Geológicos, 4 vols, Lisboa.

POMONIS, A. & WILLIAMS, M.S., 1998.

Lessons Learnt from the EEFIT Missions to the Northridge and Kobe Earthquake. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, México.

RCEP, 2001.

Chichi (Taiwan) Earthquake – Report of a Quick Investigation. Research Center for Earthquake Prediction, Universidade de Kyoto.

RECONSTRUÇÃO, 1999.

<http://www.reconstrucao.com/crise.html>

SENOS, M.L., DINORA, R. & TAQUELIM, M.J, 1994.

Estudo dos Principais Sismos que Atingiram o Território de Portugal Continental. *2º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SENOS, M.L., GASPAS, J.L. & ALVES, P., 2001.

A Sismicidade Recente do Arquipélago dos Açores. *2º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, 3º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia*, pp. 36, Évora.

SOEIRO, A., 1992.

O Sismo de 1980 no Grupo Central dos Açores. Efeitos e Acções. Consequências Onze Anos Depois. Editado por Oliveira *et al.*, *Monografia -10 Anos Após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*, vol. 1, pp. 313-319, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

SOUSA, M.L., CARVALHO, E.C. & OLIVEIRA, C.S., 2000.

Risco Sísmico em Portugal. Bolsa dos Seguros. *Revista dos Seguros e Pensões*, Ano III, n.º 8.

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, pp. 705 – 720, Lisboa.

TIEDEMANN, H., 1992.

Earthquakes and Volcanic Eruptions: A Handbook on Risk Assessment, Swiss Reinsurance Company, Zurique.

USGS, 2001a.

<http://quake.wr.usgs.gov/study/turkey>

USGS, 2001b.

http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/99_EVENTS/

USGS, 2001c.

<http://geopubs.wr.usgs.gov/dds/dds-29/>

USGS, 2001d.

http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/sig_1999.html

USGS, 2001e.

http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/sig_2001.html

VAZ, C. T. & RODRIGUES, J., 1999.

O Sismo de Kocaeli (Izmit) de 17 de Agosto de 1999 – Relatório Preliminar da Visita de Estudo Efectuada às Zonas Afectadas. Nota Técnica C3ES, Proc. 260/14/13733, LNEC, Lisboa.

YAMAZAKI, F., NISHIMURA, A. & UENO, Y., 1996.

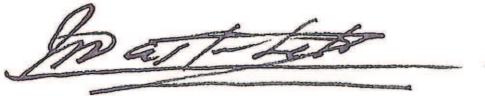
Estimation of Human Casualties due to Urban Earthquakes. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Paper nº 443, Acapulco, México.

YANG, Y., WANG, Z., YANG, Y. & YANG, L., 1992.

An Expert Evaluation System for Earthquake Damage. *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 10, pp. 6307 - 6310, Madrid, Espanha.

VISTOS

O Engenheiro Chefe do Departamento
de Estruturas



Mário Castanheta

O Engenheiro Chefe do Grupo
de Estudos e Equipamentos
de Engenharia Sísmica



Eduardo Cansado Carvalho

AUTORIA

G3ES



Maria Luísa Sousa

Assistente de Investigação



Sandra Castro

Bolseira de Investigação



Alfredo Campos Costa

Investigador Principal

**ANEXO A – VALORES DE DEFEITO DA METODOLOGIA FEMA
& NIBS [1999] PARA A ESTIMATIVA DAS PERDAS HUMANAS**

Os quadros A.1 a 5, definem as percentagens das perdas humanas, para os diferentes níveis de severidade de ferimentos, estado de danos e para as tipologias construtivas da metodologia FEMA & NIBS mais correntes em Portugal. As tipologias construtivas consideradas foram:

- C1: Pórtico de betão armado;
- C3: Pórtico de betão armado com paredes de enchimento em alvenaria não reforçada;
- URM: Paredes resistentes de alvenaria não reforçada.

As tipologias aqui descritas são igualmente classificadas mediante o número de pisos, ou seja, no caso das tipologias C1 e C3, a classificação contempla edifícios de 1 a 3 pisos (“Low Rise”), de 4 a 7 pisos (“Mid Rise”) e edifícios com mais de 8 pisos (“High Rise”). No caso das tipologias URM, a classificação contempla edifícios de 1 a 2 pisos (“Low-Rise”) e com mais de 3 pisos (“Mid-Rise”).

O quadro A.6 define a probabilidade de colapso das tipologias construtivas consideradas, para o estado limite de danos perdas totais.

Quadro A.1 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos ligeiros).

<i>Tipologia construtiva</i>	<i>Níveis de Severidade</i>			
	<i>1 (%)</i>	<i>2 (%)</i>	<i>3 (%)</i>	<i>4 (%)</i>
C1L	0,05	0,005	0	0
C1M	0,05	0,005	0	0
C1H	0,05	0,005	0	0
C3L	0,05	0,005	0	0
C3M	0,05	0,005	0	0
C3H	0,05	0,005	0	0
URML	0,05	0,005	0	0
URMM	0,05	0,005	0	0

Quadro A.2 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos moderados).

Tipologia construtiva	Níveis de Severidade			
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)
C1L	0,2	0,02	0	0
C1M	0,2	0,02	0	0
C1H	0,2	0,02	0	0
C3L	0,2	0,02	0	0
C3M	0,2	0,02	0	0
C3H	0,2	0,02	0	0
URML	0,4	0,04	0	0
URMM	0,4	0,04	0	0

Quadro A.3 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos severos).

Tipologia construtiva	Níveis de Severidade			
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)
C1L	1	0,1	0,001	0,001
C1M	1	0,1	0,001	0,001
C1H	1	0,1	0,001	0,001
C3L	1	0,1	0,001	0,001
C3M	1	0,1	0,001	0,001
C3H	1	0,1	0,001	0,001
URML	2	0,2	0,002	0,002
URMM	2	0,2	0,002	0,002

Quadro A.4 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos perdas totais – colapso parcial).

Tipologia construtiva	Níveis de Severidade			
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)
C1L	5	1	0,01	0,01
C1M	5	1	0,01	0,01
C1H	5	1	0,01	0,01
C3L	5	1	0,01	0,01
C3M	5	1	0,01	0,01
C3H	5	1	0,01	0,01
URML	10	2	0,02	0,02
URMM	10	2	0,02	0,02

Quadro A.5 – Percentagem de perdas humanas por níveis de severidade de ferimentos e tipologias construtivas (estado limite de danos perdas totais – colapso total).

<i>Tipologia construtiva</i>	<i>Níveis de Severidade</i>			
	<i>1</i> <i>(%)</i>	<i>2</i> <i>(%)</i>	<i>3</i> <i>(%)</i>	<i>4</i> <i>(%)</i>
C1L	50	10	2	2
C1M	50	10	2	2
C1H	50	10	2	2
C3L	50	10	2	2
C3M	50	10	2	2
C3H	50	10	2	2
URML	50	10	2	2
URMM	50	10	2	2

Quadro A.6 – Probabilidade de colapso no estado limite de danos perdas totais (%).

<i>Tipologia construtiva</i>	<i>(%)</i>
C1L	20
C1M	15
C1H	10
C3L	25
C3M	20
C3H	15
URML	25
URMM	25