

Apreciação do risco sísmico em Lisboa

Seismic risk assessment in Lisbon

Maria Luísa Sousa
Alfredo Campos Costa
Laura Caldeira

Resumo

Ao longo da sua história, a cidade de Lisboa tem sofrido os efeitos devastadores de diversos sismos que foram responsáveis por danos e perdas relevantes no seu parque edificado e seus habitantes.

Os objectivos do presente artigo englobam a identificação, a análise e a avaliação do risco sísmico deste concelho, cumprindo-se, desta forma, algumas das etapas do processo de gestão do risco.

Efectuou-se a análise de risco para uma perigosidade sísmica regida por mais do que um cenário probabilístico de ocorrência de sismos. Para o efeito, caracterizou-se a perigosidade sísmica das 53 freguesias de Lisboa, considerando dois cenários de ocorrência construídos sobre os mesmos pressupostos em que se fundamentou a acção sísmica que serviu de base ao Anexo Nacional do Eurocódigo 8. Avaliou-se ainda a exposição do parque habitacional e habitantes deste concelho, classificou-se e caracterizou-se a vulnerabilidade sísmica dos elementos expostos, traçaram-se as curvas de risco sísmico para a cidade de Lisboa e estimaram-se os valores esperados anuais das perdas económicas e sociais nas freguesias desta cidade.

Da análise efectuada ressalta que as perdas totais são condicionadas essencialmente pelo cenário de acção sísmica próximo, que as freguesias mais antigas são aquelas em que o risco relativo esperado anual é mais elevado e que as freguesias responsáveis pelos maiores valores de risco absoluto são as que apresentam a vulnerabilidade sísmica mais elevada e os maiores valores de exposição.

A apreciação do risco sísmico efectuada para Lisboa permite concluir que o risco de morte anual devido a sismos a que os habitantes desta cidade estão expostos se situa na zona ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*).

Palavras-chave: Distribuições probabilísticas / Lisboa / Perdas económicas / Perdas sociais / Perigosidade sísmica / Risco sísmico

Abstract

Throughout its history, the city of Lisbon has suffered the catastrophic effects of several earthquakes that originated significant damages and losses in its building stock and inhabitants.

The objectives of this study were to identify, to analyse and to evaluate seismic risk of Lisbon County, carrying out some steps of a risk management process.

Seismic risk analysis was performed taking into account more than one probabilistic seismic hazard scenario. This required the characterization of the seismic hazard at the 53 parishes of Lisbon, considering two types of spectral scenarios, following the same premises as the ones in which Eurocode 8 Portuguese National Annex was based. Furthermore, the residential building stock and inhabitants exposure was assessed, seismic vulnerability of elements at risk was classified and characterized, seismic risk curves for Lisbon County were evaluated and annualized earthquake economic and social losses were estimated for each parish.

The results indicate that total losses are strongly influenced by the short distance seismic scenario that the annualized relative risk is higher in older Lisbon parishes, whereas the parishes responsible for higher annualized absolute risk are the ones that are seismically more vulnerable and have the highest exposure values.

Seismic risk assessment of Lisbon lead to the conclusion that the annualized estimates of casualties caused by earthquakes in this city is located in the ALARP region (*As Low As Reasonably Practicable*).

Keywords: Economic losses / Social losses / Lisbon / Probabilistic distributions / Seismic hazard / Seismic risk

Maria Luísa Sousa

Investigadora Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
luisa.sousa@lnec.pt

Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
alf@lnec.pt

Laura Caldeira

Investigadora-Coordenadora
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
laurac@lnec.pt

1 Introdução

Os sismos são, entre os desastres naturais, aqueles que têm o potencial de causar efeitos mais devastadores. O potencial destruidor de sismos severos difere do de outros perigos naturais, tais como os deslizamentos de terrenos, as avalanches ou as cheias, pela extensão dos seus efeitos, pelo seu impacto súbito e pela ausência de uma possível previsão a curto prazo [1].

No último século, tem-se observado um crescimento significativo de pessoas afectadas por fenómenos sísmicos, bem como das perdas económicas que deles decorrem. Este crescimento é uma consequência do aumento da população mundial e dos valores expostos, da maior complexidade da sociedade moderna e da sua tecnologia e da concentração dos elementos em risco em zonas urbanas que poderão ser afectadas por sismos [2]. Por outro lado, tal como é afirmado em [3], os recursos necessários à segurança sísmica competem com os necessários à redução dos riscos decorrentes de outros perigos e as decisões de mitigar o risco sísmico são tomadas com base na dimensão e probabilidade daquele risco, realçando-se assim a utilidade de uma apreciação probabilística do risco sísmico.

Em Portugal, a concentração da população e da exposição em zonas onde a actividade sísmica se caracteriza por uma frequência reduzida de acontecimentos de grande impacto, aliada à existência de construções vulneráveis aos fenómenos sísmicos, revelam a importância de se apreciar a dimensão do problema do risco sísmico, pois só assim se poderá controlar de forma fundamentada as perdas futuras, bem como assegurar o seu financiamento.

Em particular, a cidade de Lisboa, que ao longo da sua história sofreu os efeitos de sismos devastadores, é das regiões do País onde existe uma maior concentração dos elementos expostos a sismos [4]. Estudos de análise do risco sísmico já foram efectuados no passado para a cidade de Lisboa, ou para regiões mais vastas que incluem esta cidade [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Contudo, é possível identificar diversas vertentes em que existe o interesse e a oportunidade para realizar estudos originais de risco sísmico de âmbito regional, nomeadamente (i) a actualização dos estudos anteriores com base em modelos mais sofisticados de análise de risco aplicados com uma maior resolução espacial e (ii) a apreciação do risco individual decorrente de fenómenos sísmicos.

Este estudo tem como objectivo cumprir algumas das etapas de um processo de gestão do risco sísmico aplicado à cidade de Lisboa, nomeadamente a sua identificação, análise e avaliação, contemplando assim, globalmente, a fase de apreciação do risco.

O artigo inclui ainda uma metodologia de análise do risco sísmico que tem em consideração mais do que um cenário de ocorrência, obviando as dificuldades que decorrem da caracterização da acção sísmica por um espectro envolvente

Os objectivos do presente artigo englobam a identificação, a análise e a avaliação do risco sísmico do concelho de Lisboa, cumprindo-se, desta forma, a etapa de apreciação de um processo de gestão do risco. Da análise efectuada ressalta que as perdas totais são condicionadas essencialmente pelo cenário de acção sísmica próximo, que as freguesias mais antigas são aquelas em que o risco relativo esperado anual é mais elevado e que as freguesias responsáveis pelos maiores valores de risco absoluto são as que apresentam a vulnerabilidade sísmica mais elevada e os maiores valores de exposição.

A apreciação do risco sísmico efectuada para esta cidade permite concluir que o risco de morte anual devido a sismos a que os habitantes de Lisboa estão expostos se situa na zona *ALARP (As Low As Reasonably Practicable)*.

quando se adoptam modelos não lineares de avaliação de danos. A perigosidade sísmica foi analisada de forma probabilística em todas as 53 freguesias da cidade de Lisboa, tendo em consideração as alterações das características do movimento sísmico induzidas pelas formações superficiais. Analisou-se ainda a exposição e a vulnerabilidade do parque habitacional e dos habitantes da cidade de Lisboa, tendo-se recorrido a um modelo mecanicista para avaliação de danos e a modelos actualizados de avaliação de perdas humanas. Traçaram-se curvas probabilísticas de risco sísmico para a cidade e estimaram-se as perdas esperadas anuais, para cada freguesia, obtidas em termos de indicadores de risco económico e social. Desta forma, é possível comparar o risco anual esperado entre freguesias de Lisboa e apreciar o risco sísmico individual dos seus habitantes.

2 Metodologia de avaliação do risco sísmico

2.1 Conceitos

A definição de conceitos é essencial num estudo de risco sísmico de modo a tornar o texto mais conciso, explícito e matematicamente consistente [5]. Com efeito, apesar de os principais conceitos já se encontrarem definidos por convenções internacionais, têm sido utilizados com diversos significados, quer em sentido lato quer em sentido estrito [3], provavelmente devido à interdisciplinaridade da matéria e ao facto de o tema ser relativamente recente.

Os conceitos principais de avaliação do risco sísmico são também comuns a outros tipos de catástrofes naturais. Os esforços para a harmonização destes conceitos culminaram em 1979, quando um grupo de trabalho patrocinado pelas Nações Unidas estabeleceu uma convenção que inclui um conjunto de definições básicas neste domínio [10].

Com base nas referências mencionadas, mas também em diversas aplicações efectuadas em Portugal no domínio dos fenómenos sísmicos [4, 5, 6, 7, 8, 9], apresentam-se as principais definições adoptadas neste trabalho, aplicáveis ao tema da avaliação do risco de qualquer tipo de fenómeno natural, mas aqui particularizadas para a temática do risco sísmico.

Seguindo a proposta de [11], o primeiro conceito a definir no âmbito de uma análise de risco sísmico é o de *ambiente* ou *sistema construído*. Este pode ser composto por estruturas individuais, como edifícios, ou englobar um sistema integrado que inclua diversas componentes como as redes de água, de energia, de comunicações e de transportes de uma região urbana. Neste caso, para além de se caracterizar os elementos constituintes do sistema, é também necessário localizá-los e identificar as suas funções e inter-relações.

Os *elementos em risco* ou *existências* são aqueles ou aquilo que poderá ser afectado adversamente em caso de sismo, devido ao desempenho do sistema construído. Os habitantes de uma determinada região são um exemplo de elementos em risco. Por outro lado, os edifícios são um exemplo de elementos em risco que se confundem com o próprio sistema construído. A definição dos elementos em risco condicionará a forma como é avaliado o risco e terá implicações nas variáveis que o quantificam. Num estudo de risco sísmico é necessário quantificar a *exposição*, E , desses elementos, ou seja, o seu valor. Para o efeito, procede-se a um inventário georreferenciado das existências e do seu valor, evidenciando-se factores capazes de caracterizar a vulnerabilidade dos elementos em risco face à acção sísmica.

A *vulnerabilidade*, V , e a *fragilidade sísmicas* reflectem a capacidade que um determinado elemento em risco tem para resistir, ou para ser afectado, pelo fenómeno natural, sendo condicionada pela acção de um sismo de dada severidade (ver definição de perigosidade sísmica a seguir). Os *danos*, D , correspondem aos efeitos físicos adversos causados por um sismo de determinada intensidade sobre o elemento em risco e directamente observados num levantamento após a ocorrência do evento [11]. Importa desde já distinguir o conceito de fragilidade e vulnerabilidade. Assim, uma curva de fragilidade sísmica fornece a probabilidade condicional de um determinado nível de dano, ou perda, ser igualado ou excedido, para uma dada severidade da acção sísmica, enquanto que uma curva de vulnerabilidade sísmica é definida pelos valores esperados da variável dano, ou perda, em função da severidade da acção sísmica. As curvas de fragilidade e vulnerabilidade são normalmente específicas de uma determinada tipologia construtiva.

Tipologias são subconjuntos de sistemas construídos com características idênticas em termos da sua vulnerabilidade à acção sísmica. No caso de o sistema construído ser um conjunto de edifícios, as tipologias identificam-se pelo respectivo desempenho sísmico, o qual é condicionado basicamente pelas respectivas soluções estruturais. Nesta perspectiva, as classes de edifícios serão também designadas de tipologias estruturais ou de tipologias construtivas.

As *perdas*, L , correspondem aos efeitos económicos e sociais adversos estimados a partir do conhecimento dos níveis da acção sísmica ou

dos níveis de dano. Os indicadores de perdas medem a severidade das consequências adversas produzidas pela ocorrência de um sismo sobre os elementos em risco. São exemplos de indicadores de perdas o número de mortos, de feridos ou de desalojados, o valor de reposição dos danos em edifícios, os custos da interrupção de uma dada actividade económica, os custos da rotura do funcionamento de uma infra-estrutura, etc., números estes avaliados face a um determinado nível de severidade da acção sísmica.

A análise da perigosidade sísmica, H , consiste na estimativa, para um dado local e período de tempo de exposição, da probabilidade de excedência de um determinado nível da acção sísmica, traduzido geralmente por variáveis que medem o movimento do solo (intensidade macrossísmica, aceleração máxima do solo, etc.), ou a resposta estrutural dos edifícios (espectro de resposta, etc.). Em muitas aplicações, a perigosidade sísmica é quantificada de forma aproximada, não pela probabilidade, mas pela frequência (ou número de eventos por unidade de tempo) com que se espera que níveis especificados da acção sísmica sejam excedidos [3].

Finalmente, o risco sísmico específico, R_s , é definido como a probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas, L , relativas em consequência da ocorrência de sismos na região e num período de exposição especificado, sendo uma função da perigosidade e da vulnerabilidade sísmica.

Por outro lado, o risco sísmico ou risco absoluto, R , exprime a probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas (L) absolutas em consequência da ocorrência de sismos na região e num período de tempo de exposição especificado, sendo uma função da perigosidade, da vulnerabilidade e do valor dos elementos em risco (exposição).

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

Para clarificar os conceitos apresentados, refira-se que perigosidade sísmica, ou ameaça, deve ser entendida como o perigo potencial, ou factor de risco externo aos elementos expostos, enquanto que a vulnerabilidade, consistindo na propensão intrínseca para os elementos em risco serem danificados, deve ser entendida como um factor de risco interno ao sistema em análise [12]. Nesta situação, o que distingue a fragilidade sísmica do risco sísmico específico é que a primeira é avaliada pela probabilidade de ser excedido um determinado grau de dano, para um dado nível de acção sísmica, enquanto que o risco específico integra a probabilidade de serem excedidos os danos esperados para todos os níveis da acção sísmica, tendo em consideração a respectiva probabilidade de ocorrência, ou seja, a função densidade de probabilidade da perigosidade sísmica [13].

2.2 Modelação probabilística do risco sísmico e das perdas esperadas anuais

De acordo com os conceitos atrás definidos, a modelação probabilística do risco sísmico recorre à expressão seguinte [5]:

$$P(L > l) = \int_D \int_H P(L > l | d) P(D > d | h) f_H(h) dh dd \quad (1)$$

Esta expressão é ilustrada graficamente na Figura 1 para uma tipologia construtiva de vulnerabilidade v . Note-se que as cores da figura são consentâneas com as da expressão anterior, em que, a perigosidade é identificada a verde, a vulnerabilidade e fragilidade a azul e o risco a encarnado.

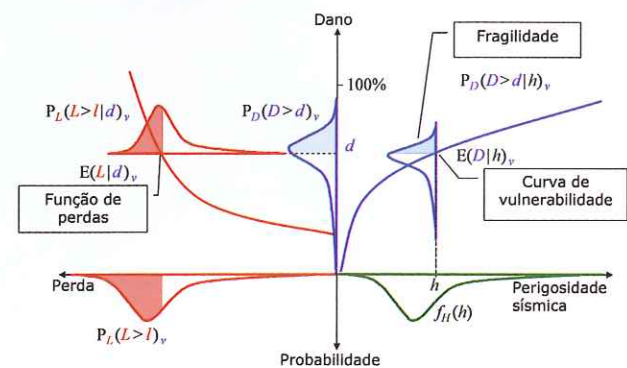


Figura 1 Modelação probabilística do risco sísmico [5]

Assim, na expressão 1, $f_H(h)$ representa a função densidade de probabilidade da perigosidade sísmica e $P(D > d | h)$ representa a distribuição de probabilidade da variável aleatória dano, condicionada por um determinado nível de perigosidade sísmica, ou seja, a fragilidade sísmica. Na mesma expressão existe uma terceira distribuição $P(L > l | d)$, condicionada pelo dano, que permitiria calcular a curva de risco. Como esta distribuição dificilmente é conhecida, o cálculo restringe-se à avaliação de $P(D > d)$. Posteriormente, para se obter uma estimativa das perdas económicas devidas aos danos físicos no edificado causados por sismos, associou-se um custo de reparação e reconstrução a cada estado de dano, utilizando uma grandeza adimensional, ou um índice económico, designado de *factor de dano*, DF_d , definido como a razão entre o custo de reparação ou reconstrução de um edifício, num determinado estado de dano, e o valor global de reposição do edifício [14]. De uma forma aproximada, os factores de dano podem ser entendidos como a percentagem de área perdida do edifício para cada estado de dano. Os factores de dano utilizados encontram-se reunidos no Quadro 1, sendo os adoptados pela metodologia HAZUS [15] para serem aplicados aos cinco estados de dano aí estabelecidos. Diferentes autores preconizam diferentes correlações entre os graus de danos e os custos de reparação e reconstrução. Estas correlações baseiam-se em levantamentos de danos após sismo ou em opiniões de especialistas. Uma compilação de diferentes correlações publicadas na literatura internacional pode ser encontrada em [16].

Quadro 1 Conversão de indicadores de dano em perdas económicas [15]

Estados de dano	Factor de dano [%]
Ausência de dano	0
Dano ligeiro	2
Dano moderado	10
Dano severo	50
Dano total	100

Na prática, a tradução dos estados e graus de dano em percentagens de valores de reposição conduz à obtenção de um índice de perdas, que não é mais do que um valor médio das perdas, condicionado por um nível de perigosidade sísmica, obtido pela ponderação, através dos factores de dano, dos quantitativos dos edifícios que se encontram num dado estado de dano e que pertencem a uma determinada tipologia construtiva de vulnerabilidade $V = v$, conforme se equaciona na expressão 2 [5, 7]:

$$E(L|h) = Ne_T \cdot \sum_d \sum_v A_v \cdot DF_d \cdot P_D(D=d|h) \cdot P_V(V=v) \quad (2)$$

em que:

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

A_v representa a superfície média dos edifícios pertencentes à tipologia de vulnerabilidade v na região em análise;

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

$P_V(V=v)$ é a probabilidade de os edifícios da região em análise pertencerem à tipologia com vulnerabilidade $V = v$, assumida igual à frequência dessas tipologias na região.

A introdução da superfície média dos edifícios pertencentes à tipologia construtiva, de vulnerabilidade v , na expressão 2 resulta na avaliação da exposição, E , em termos da área total habitada da região em análise [5, 7]:

$$E = Ne_T \times \sum_v A_v \cdot P_V(V=v) \quad (3)$$

Neste trabalho estima-se o valor médio das perdas, condicionado por diversos níveis de perigosidade sísmica (expressão 2) correspondentes a determinados períodos de retorno (ou probabilidades anuais de excedência), obtendo-se assim uma curva de risco para o local em análise. Nestas curvas, o risco é analisado para um único local, Lisboa, para obviar os problemas da correlação espacial entre as perdas de uma região.

A diferenciação da curva de risco cumulativa (expressão 1) permite obter a função densidade de probabilidade das perdas e estimar o valor anual¹ esperado dessas perdas:

1 O conhecimento da correlação espacial atrás mencionada não é necessário para a obtenção do valor esperado das perdas acumuladas para um conjunto de elementos em risco distribuídos numa região, mas antes para a compreensão da distribuição das perdas em torno desse valor esperado e para a determinação da variância das perdas agregadas [17].

$$E(L) = \int_L \frac{d(I - P(L > I))}{dI} dI \quad (4)$$

Desta forma, obtêm-se as perdas anualizadas em consequência de sismos, que são indicadores de longo prazo dos valores anuais esperados do risco sísmico (absoluto) numa região. As perdas anualizadas podem ser normalizadas pelos valores da exposição, obtendo-se indicadores de longo prazo do risco sísmico específico da região.

A transformação da área do parque habitacional danificado em valores monetários, assumindo um determinado custo de reparação e reconstrução por metro quadrado, permitirá avaliar, de uma forma simplista, as perdas económicas anualizadas em consequências de sismos no edificado habitacional da região analisada, identificadas ao longo deste trabalho por AEL^2 .

No que concerne ao risco social, e tratando-se ainda de um indicador de risco absoluto, se, em lugar de edifícios, forem analisados os indivíduos que neles habitam, tem-se, por analogia com AEL , o valor anual esperado das perdas humanas, designado de AHL .

No que diz respeito às perdas relativas, vão ser estimados três indicadores de risco específico: $AELR$, $AELC$ e $AHLR$. Neste contexto, $AELR$ traduz os valores anuais esperados das perdas económicas normalizados pelo valor de reposição do parque habitacional da região, enquanto que $AELC$ traduz os valores anuais esperados das perdas económicas normalizados pela população total residente na região, ou seja, as perdas económicas *per capita*, e $AHLR$ traduz os valores anuais esperados das perdas humanas também normalizados pela população total residente na região.

No Quadro 2 exhibe-se uma matriz que organiza os indicadores de risco que serão utilizados neste trabalho.

Quadro 2 Matriz dos indicadores do risco sísmico esperado anual

Risco	Absoluto	Específico
Económico	AEL	$AELR$ e $AELC$
Humano	AHL	$AHLR$

3 Apreciação do risco sísmico em Lisboa

3.1 Identificação do risco

3.1.1 Enquadramento

No território português, a região de Lisboa é aquela em que as descrições dos efeitos dos sismos ao longo da história se encontram mais bem documentadas. É sobejamente conhecido que Lisboa

2 Na literatura inglesa o acrónimo AEL reúne as iniciais de *Annualized Earthquake Loss* e o acrónimo $AELR$ reúne as iniciais de *Annualized Earthquake Loss Ratio* [18]. No entanto, neste trabalho, a designação escolhida para estas variáveis pretende distinguir o valor anual esperado das perdas económicas, em consequência de sismos, do valor anual esperado das perdas humanas. Os acrónimos escolhidos para as variáveis reflectem assim as iniciais das seguintes designações inglesas: *Annualized Economic Loss (AEL)*, *Annualized Economic Loss Ratio (AELR)*, *Annualized Human Loss (AHL)* e *Annualized Human Loss Ratio (AHLR)*.

sofreu os efeitos devastadores do sismo de 1755 e do seu *tsunami*, mas também, e entre outros, os efeitos dos sismos de 1356, 1531, 1858, 1909 e 1969. Assim, é possível identificar que o parque edificado da cidade de Lisboa e os seus habitantes têm sofrido, ao longo dos anos, perdas em consequência de sismos e dos seus efeitos colaterais, como sejam, por exemplo, tsunamis e incêndios.

Em Portugal, existe o mito de que os sismos têm um período de recorrência de 200 anos. Se bem que este mito decorra da nossa memória colectiva, ele não chega a ser compreendido de uma forma fundamentada. Se se analisar a sequência temporal de sismos com intensidade macrossísmica superior a VII que afectaram a cidade de Lisboa no último milénio [19], verifica-se a existência de uma periodicidade média próxima de 170 anos. De realçar que este nível de intensidade foi seleccionado, como exemplo, não só por ser elevado, como também por ser aquele que conduz a um intervalo de tempo de recorrência próximo dos 200 anos. Acresce que a listagem utilizada corresponde a uma amostra reduzida de eventos (6 sismos) e que o perigo sísmico identificado tem origem em fontes de sismogénese diversificadas. Naturalmente se compreende que não é suficiente o conhecimento grosseiro da sismicidade de uma região para caracterizar o seu risco sísmico. De facto, para quantificar as incertezas associadas aos fenómenos sísmicos e às suas consequências é indispensável efectuar uma análise probabilística da perigosidade e do risco sísmico para uma região que inclua o concelho de Lisboa [4, 5, 6, 7, 8, 9].

No presente artigo actualizam-se as estimativas do risco sísmico para a cidade de Lisboa com base (i) numa análise probabilística da perigosidade sísmica avaliada espectralmente para dois cenários de acção sísmica [20], (ii) num modelo mecanicista de danos do edificado [15, 21] e (iii) num modelo de avaliação de perdas humanas revisto [21] relativamente a modelos utilizados anteriormente. Recorde-se que, em trabalhos precedentes [4, 5, 7, 9], os valores anuais esperados das perdas tinham sido estimados com base em modelos de perigosidade e/ou de avaliação de danos menos sofisticados, nomeadamente (i) numa análise probabilística da perigosidade sísmica realizada para intensidades macrossísmicas e para um único cenário de acção sísmica, (ii) em modelos de avaliação de danos estatísticos [22] e (iii) num modelo de avaliação de perdas humanas menos recente [23].

3.1.2 Perigosidade sísmica

Na sequência dos trabalhos desenvolvidos no âmbito dos projectos *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (ERSTA)* [24], promovido pela Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC), e *Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE)* [25], do 7º Programa Quadro da União Europeia, a análise probabilística da perigosidade sísmica de Portugal está actualmente a ser revista. Não estando essa revisão ainda consolidada e não se pretendendo neste artigo efectuar um estudo original sobre perigosidade sísmica,

adoptaram-se os dados, os modelos probabilísticos e os programas de cálculo que estiveram na base do zonamento sísmico presente no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 [20, 26]³.

Desta forma, estimou-se a perigosidade sísmica para 12 períodos de retorno, em afloramento rochoso e nas sedes das 53 freguesias da cidade de Lisboa, considerando os cenários de acção sísmica do tipo 1 e 2, também designados de "afastado" e "próximo" (referentes a sismos de magnitude mais elevada e epicentro localizado maioritariamente na região Atlântica ou a sismos localizados no território continental, respectivamente).

Na Figura 2 apresentam-se os espectros de resposta elásticos, num terreno do tipo A (rocha), preconizados no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (AN - EC8) para as zonas 1.3 e 2.3 deste Anexo, que são aquelas em que Lisboa se integra, e que correspondem à acção sísmica do tipo afastado e próximo, respectivamente, possuindo os valores de 1,5 e 1,7 m/s² para a aceleração máxima de referência, a_{gR} . Na mesma figura também se apresentam os espectros de resposta uniformes para o período de retorno de 475 anos (período adoptado no Anexo Nacional do EC8 para a exigência de não colapso), avaliados em afloramento rochoso em duas freguesias exemplificativas da cidade de Lisboa. Importa sublinhar que as acelerações estimadas para cada frequência do espectro têm igual probabilidade de serem excedidas no local em análise, daí os espectros representados serem designados de *espectros de resposta uniformes*. Note-se ainda que, no caso do cenário de acção sísmica do tipo 1, se verifica uma diferença acentuada entre o espectro de resposta regulamentar e o espectro resultante da análise probabilística da perigosidade sísmica para a cidade de Lisboa. Esta diferença decorre das opções adoptadas no zonamento sísmico presente no Anexo Nacional.

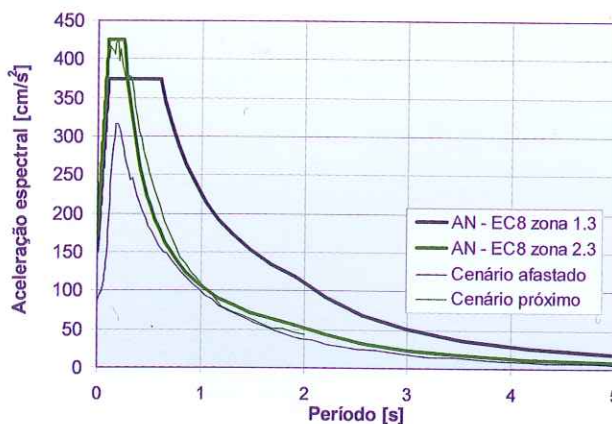


Figura 2 Espectros de resposta elásticos regulamentares (AN - EC8) e espectros de resposta uniformes resultantes da análise probabilística da perigosidade sísmica para o período de retorno de 475 anos na cidade de Lisboa

³ Posteriormente à realização dos estudos de perigosidade sísmica que estiveram na base da acção sísmica definida no Anexo Nacional do Eurocódigo 8, e para além do trabalho que está a ser desenvolvido actualmente no âmbito do projecto SHARE, já foram revistos alguns dos modelos que estiveram na base dos estudos de perigosidade referidos, nomeadamente as zonas de sismogénese [27] e as leis de atenuação [28], contemplando, respectivamente, critérios de natureza sismotectónica e modelos actualizados de rotura na falha [29].

Com efeito, os níveis de perigosidade sísmica correspondentes a um período de retorno de 475 anos no concelho de Lisboa apresentam valores inferiores ao quantilho adoptado para traçar o espectro de resposta do Anexo Nacional, reflectindo as diferenças da distribuição geográfica da perigosidade no interior de cada zona sísmica. Efectivamente, a tradução de isolinhas de perigosidade sísmica em níveis constantes, para cada zona, conduz necessariamente à sobre estimativa da perigosidade imposta pelo código em determinados locais e à sua sub-estimativa noutros [30]. No caso do Anexo Nacional do EC8, para além das diferenças atrás mencionadas que decorrem da distribuição geográfica da perigosidade, escolheu-se um quantilho elevado para traduzir a perigosidade sísmica da zona 1.3. Esta opção integra-se numa estratégia conservativa adoptada naquele Anexo Nacional que visa mitigar o risco sísmico da região de Lisboa.

A Figura 3 ilustra as curvas de perigosidade sísmica obtidas para duas freguesias da cidade de Lisboa, em afloramento rochoso, para 12 períodos de retorno e para a aceleração máxima do movimento do terreno (*PGA*). As linhas contínuas nesta figura representam os ajustes de uma função de distribuição de probabilidade inversa, lognormal, às curvas de perigosidade sísmica de cada freguesia. As curvas representadas na Figura 3 foram obtidas para as freguesias de Santa Maria dos Olivais e da Sé e para a acção sísmica próxima e afastada, respectivamente. A função de distribuição de probabilidade inversa, lognormal, possui, nas freguesias exemplificadas, os seguintes parâmetros: $\mu_{\text{Olivais}} = 1,67$, $\sigma_{\text{Olivais}} = 1,21$, $\mu_{\text{Sé}} = -1,20$ e $\sigma_{\text{Sé}} = 2,00$. Estas duas freguesias foram escolhidas para ilustrar graficamente a perigosidade sísmica do concelho de Lisboa, pois, entre as 53 analisadas, é nelas que se observa o erro de ajuste mais elevado da distribuição de probabilidade inversa, para a aceleração correspondente ao período nulo do espectro (*PGA*). De facto, exceptuando-se a região das curvas de perigosidade correspondente a períodos de retorno mais baixos (5 e 10 anos), conseguiu-se um ajuste muito razoável para as curvas de todas as freguesias da cidade de Lisboa e em todas as frequências que descrevem o espectro. O conhecimento destas distribuições de probabilidade para descrever as curvas de perigosidade sísmica, para cada frequência espectral

analisada, também poderá ser útil, por exemplo, na realização de estudos de avaliação probabilística da segurança sísmica de estruturas.

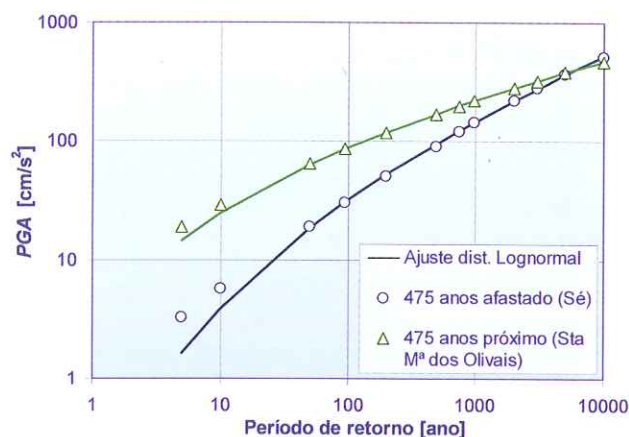


Figura 3 Curvas de perigosidade sísmica e ajuste de uma distribuição de probabilidade inversa, lognormal, para duas freguesias da cidade de Lisboa

Finalmente, na Figura 4, apresenta-se a distribuição geográfica da acção sísmica à superfície, na cidade de Lisboa, para um período de retorno de 475 anos. Estes mapas foram traçados a partir dos espectros de resposta uniformes resultantes da análise probabilística da perigosidade sísmica para o período de retorno de 475 anos, impostos ao nível do substrato rochoso da sede de cada freguesia, considerando-se, adicionalmente, as alterações das características do movimento sísmico induzidas pelas formações superficiais existentes, recorrendo-se, nestes cálculos, ao Simulador de Cenários Sísmicos LNECloss, adiante descrito (secção 3.2.1). Efectivamente, em trabalhos anteriores [31] realizou-se a caracterização geotécnica dos terrenos da cidade de Lisboa, que forneceu a informação necessária para avaliar a resposta não linear dos solos e modelar a acção sísmica à superfície [38].

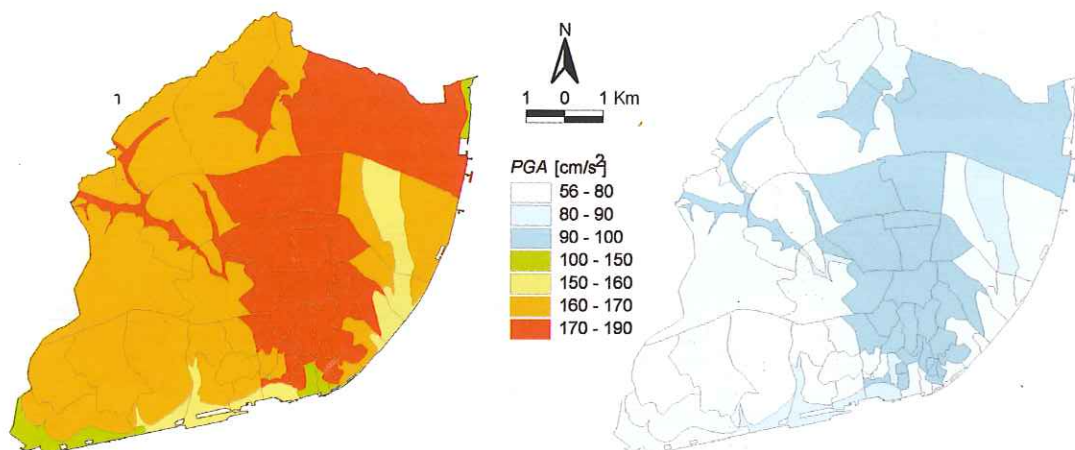


Figura 4 Mapas da acção sísmica à superfície para o período de retorno de 475 anos, na cidade de Lisboa; esquerda: cenário próximo; direita: cenário afastado

3.1.3 Exposição dos elementos em risco e classificação da sua vulnerabilidade

Os elementos expostos, que serão considerados na presente análise de risco sísmico, encontram-se armazenados em bases de dados que incluem a informação apurada nos Censos 2001 [32] sobre o edificado habitacional e seus ocupantes, com a desagregação geográfica da freguesia.

A informação constante destas bases de dados está organizada em função das variáveis relevantes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica dos elementos em risco, nomeadamente a *época de construção*, o *tipo de estrutura* e o *número de pisos dos edifícios*, que se passam a designar neste trabalho de «factores de vulnerabilidade». É assim possível conhecer o número de edifícios pertencentes a 315 tipologias construtivas diferentes (9 épocas de construção, por 5 tipos de estrutura e por 7 classes de número de pisos dos edifícios), bem como a distribuição, pelas mesmas tipologias, dos indivíduos que residem nesse parque habitacional.

No Quadro 3 apresentam-se as estatísticas globais dos elementos expostos ao risco sísmico no concelho de Lisboa. Na segunda coluna do quadro, entre parêntesis, têm-se os valores relativos às existências totais de Portugal Continental. Adoptou-se o valor de 215 m² para a superfície média dos pavimentos dos edifícios, tendo este valor sido recolhido em [33] para a NUT II de Lisboa e Vale do Tejo. No que toca aos valores de reposição, tomaram-se os preços indicativos da construção da habitação estabelecidos pela Portaria n.º 1240/2008, de 31 de Outubro, que fixa, para Lisboa (zona I), o valor de 741,48 € / m². Para facilitar a percepção dos valores monetários expostos, estes foram normalizados pelo valor do PIB de 2008 (166 128,6 × 10⁶ € [34]).

Quadro 3 Estatísticas globais dos elementos em risco no concelho de Lisboa

Freguesias	53 (1,3%)
Edifícios residenciais	53 387 (1,8%)
Alojamentos familiares clássicos	288 481 (6,0%)
Residentes	553 113 (5,7%)
Área habitacional [m ²]	41 297 904
Valor económico exposto [% PIB 2008]	18,4

Assim, de acordo com os Censos 2001, existem 53 387 edifícios clássicos no concelho de Lisboa, constituindo 1,8% dos edifícios do parque habitacional do Continente, nos quais residem 553 113 indivíduos, que representam 5,7% da população que vive no território continental.

A informação recolhida nos Censos 2001 encontra-se referenciada geograficamente, ilustrando-se, na Figura 5, o número de edifícios, ocupantes e área exposta, por freguesia de Lisboa, evidenciando-se um maior número de edifícios nas maiores freguesias da cidade, como as de Santa Maria dos Olivais, Benfica e Lumiar, mas também nas freguesias da Ajuda, Santo Condestável e Campolide. Relativamente ao número de habitantes, dever-se-á adicionar às três grandes freguesias referidas as freguesias de S. Domingos de Benfica e Marvila. Em termos de área habitacional, as freguesias de Santa Maria dos Olivais e Benfica são as responsáveis pelos maiores valores de exposição. No centro da cidade, destaca-se ainda a freguesia de S. Jorge de Arroios, por ter valores de exposição mais elevados do que os das freguesias envolventes. Por fim, as freguesias da Baixa lisboeta são as responsáveis pelos menores valores de elementos expostos (edifícios, habitantes e área habitacional).

O Quadro 4 reúne toda a informação apurada nos Censos 2001 sobre a vulnerabilidade sísmica dos habitantes de Lisboa, apresentando, de uma forma sintética, os quantitativos de indivíduos obtidos a partir dos cruzamentos dos três factores de vulnerabilidade analisados. Algumas das tipologias identificadas não possuem existências no parque habitacional de Lisboa e consequentemente não estão presentes os habitantes correspondentes, sendo assinaladas pela cor de fundo das respectivas células.

De acordo com os Censos 2001, e conforme se especifica no Quadro 4, o *tipo de estrutura da construção ou reconstrução dos edifícios* foi classificada em 5 modalidades: «estrutura de Betão Armado» (BA), «paredes de Alvenaria argamassada Com Placa» (ACP), «paredes de Alvenaria argamassada Sem Placa» (ASP), «paredes de Adobe, Taipa ou Alvenaria de Pedra Solta» e «Outros».

A análise do parque habitacional realizada em trabalhos anteriores [35, 36, 37] conduziu ao estabelecimento de sete classes de vulnerabilidade com base nos factores de vulnerabilidade *época de construção* e *tipo de estrutura*. Estas sete classes de vulnerabilidade enquadram quatro classes correspondentes a edifícios com estrutura de alvenaria, «ATAPS + Outros», «Alvenaria ≤ 1960», «Alvenaria 1961-85» e «Alvenaria 1986-01» e três classes correspondentes a edifícios com estrutura de betão armado, repartidas por grandes

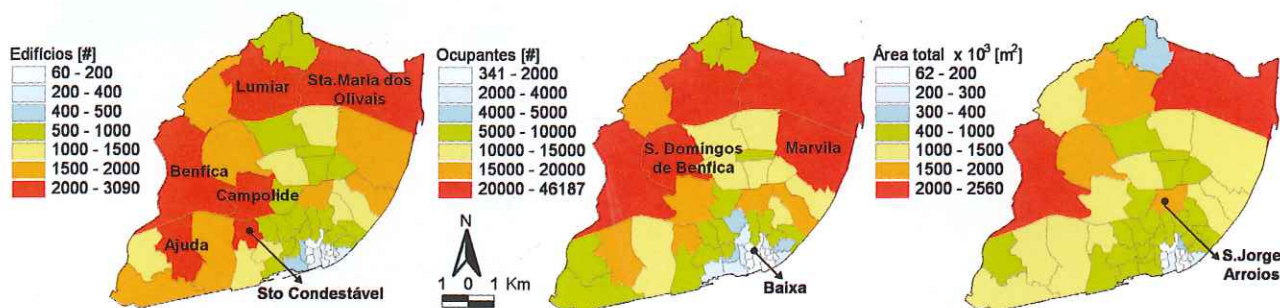


Figura 5 Número de edifícios, habitantes e área habitacional exposta, por freguesia da cidade de Lisboa

Quadro 4 Número de indivíduos por época de construção, número de pavimentos e tipo de estrutura (Censos 2001)

Época	N.º pavimentos	BA	ACP	ASP	ATAPS	Outros
Antes de 1919	1	0	0	5 185	1 406	39
	2	0	0	5 772	1 784	59
	3	0	0	8 027	2 493	39
	4	0	148	13 281	0	225
	5 a 7	0	75	9 748	0	145
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
Total =	12240	0	223	42 013	5 683	507
1919 a 1945	1	1 083	2 404	3 722	305	40
	2	987	2 361	4 573	347	12
	3	1 998	4 130	7 495	373	43
	4	3 405	5 719	10 154	0	67
	5 a 7	5 649	17 838	8 435	0	42
	8 a 15	2 817	0	0	0	19
	+ de 15	0	0	0	0	0
Total =	17916	15 939	32 452	34 379	1 025	223
1946 a 1960	1	1 987	1 336	1 327	190	34
	2	3 605	3 277	2 038	114	9
	3	4 558	4 558	2 236	405	11
	4	12 209	7 455	3 780	0	0
	5 a 7	21 805	13 792	2 449	0	26
	8 a 15	14 089	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
Total =	14517	58 253	30 418	11 830	709	80
1961 a 1970	1	1 700	1 284	1 021	119	122
	2	2 046	1 547	816	52	3
	3	3 045	1 375	1 070	66	2
	4	11 399	2 420	1 000	0	0
	5 a 7	28 596	7 079	664	0	12
	8 a 15	40 358	0	0	0	0
	+ de 15	2 173	0	0	0	0
Total =	16386	89 317	13 705	4 571	237	139
1971 a 1980	1	2 010	1 409	567	70	85
	2	3 070	2 664	340	2	0
	3	1 901	1 541	189	31	0
	4	4 002	1 088	342	0	0
	5 a 7	18 186	4 830	107	0	11
	8 a 15	37 993	0	0	0	0
	+ de 15	2 431	0	0	0	44
Total =	26885	69 593	11 532	1 545	103	140
1981 a 1985	1	618	247	61	16	75
	2	792	190	129	12	6
	3	516	137	101	24	0
	4	1 494	715	142	0	0
	5 a 7	6 050	1 241	460	0	0
	8 a 15	9 393	0	0	0	0
	+ de 15	2 755	0	0	0	0
Total =	19431	21 618	2 530	893	52	81
1986 a 1990	1	444	140	457	8	13
	2	650	153	114	8	3
	3	958	333	121	0	1
	4	1 112	418	137	0	0
	5 a 7	5 725	2 173	225	0	0
	8 a 15	13 632	0	0	0	34
	+ de 15	1 489	0	0	0	0
Total =	20390	24 010	3 217	1 054	16	51
1991 a 1995	1	510	204	70	5	2
	2	771	231	128	38	0
	3	1 006	348	207	6	0
	4	1 150	286	189	0	8
	5 a 7	8 242	3 346	139	0	0
	8 a 15	18 639	0	0	0	0
	+ de 15	2 101	0	0	0	0
Total =	16519	32 419	4 415	733	49	10
1996 a 2001	1	276	163	68	0	0
	2	1 060	303	159	7	0
	3	795	421	318	21	20
	4	2 185	652	385	0	37
	5 a 7	12 692	1 522	281	0	52
	8 a 15	13 901	0	0	0	33
	+ de 15	1 998	0	0	0	0
Total =	16259	32 907	3 061	1 211	28	142
Totais	Tipo de estrutura	344 056	101 553	98 229	7 902	1 373
1 pavimento	2 pavimentos	3 pavimentos	4 pavimentos	5 a 7 pavimentos	8 a 15 pavimentos	+ de 15 pavimentos
30822	40232	50919	85604	181637	150908	12991

épocas de construção idênticas às da alvenaria, ou seja, «BA ≤ 1960», «BA 1961-85» e «BA 1986-01». Por sua vez, cada classe de vulnerabilidade foi subdividida em sete subclasses, correspondentes às sete categorias em que se agrupou o número de pisos dos edifícios e que se especificam na Figura 6. Desta forma, classificou-se o parque habitacional da região de Lisboa em 49 tipologias construtivas, cuja distribuição é apresentada na Figura 6.

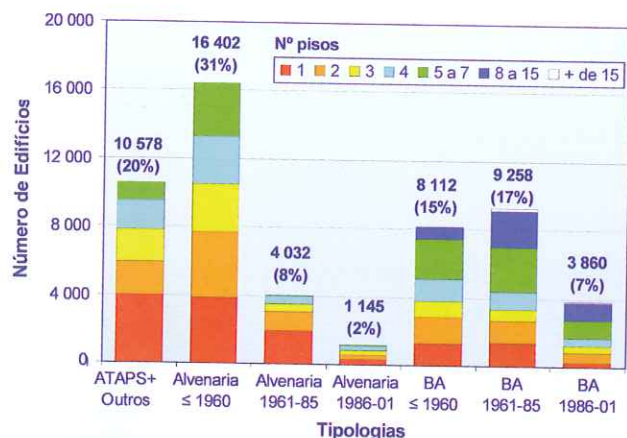


Figura 6 Número de edifícios por tipologia construtiva na cidade de Lisboa, de acordo com os Censos 2001

A distribuição do número de ocupantes pelo número de pisos e pelas 7 classes de vulnerabilidade é exibida no gráfico da Figura 7.

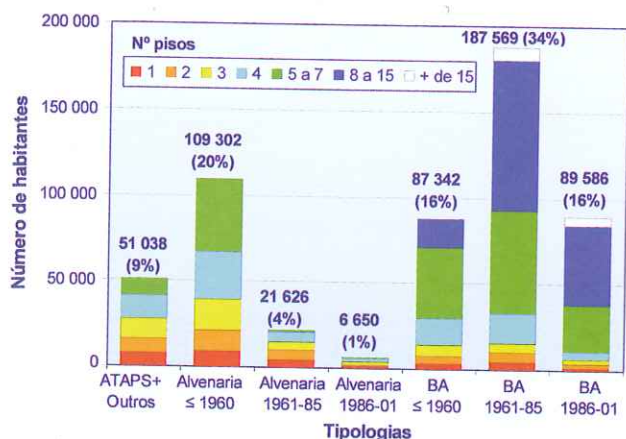


Figura 7 Número de indivíduos por tipologia construtiva na cidade de Lisboa, de acordo com os Censos 2001

Analisando as duas últimas figuras, pode afirmar-se que, no concelho de Lisboa, predominam os edifícios com estrutura de Alvenaria construídos antes de 1960 em conjunto com os edifícios de Adobe, Taipa ou Alvenaria de Pedra Solta (51%), enquanto que a maioria (66%) dos habitantes deste concelho reside em edifícios de Betão Armado.

A distribuição geográfica das sete classes de vulnerabilidade adoptadas é representada na Figura 8, em que se apresentam mapas da percentagem de edifícios, por tipologia, relativamente ao total de edifícios existentes em cada freguesia do concelho de Lisboa.

Da análise desta figura conclui-se que a classe de vulnerabilidade «ATAPS + Outros» exibe uma maior incidência em algumas das freguesias mais antigas, como a Encarnação, São Miguel, Madalena, Mártires, Santiago, Castelo, Santa Catarina e Pena, mas também nos Prazeres, onde a percentagem de edifícios desta classe é superior a 50%. Relativamente às classes de «Alvenaria ≤ 1960» verifica-se que ocorre uma maior concentração destes edifícios em freguesias menos centrais, mas não periféricas, do concelho de Lisboa, tal como a freguesia do Alto do Pina. No que toca à distribuição dos edifícios pertencentes à classe de «Alvenaria 1961-85» destaca-se a incidência destes edifícios na freguesia da Ameixoeira, em que 40 a 50% dos seus edifícios pertencem a esta classe de vulnerabilidade. Quanto à classe de «Betão ≤ 1960», observa-se que esta possui uma maior representatividade nas freguesias de S. João de Brito, Alvalade, S. João de Deus e Penha de França. Por outro lado, nas freguesias de S. Francisco Xavier, Benfica e Santa Maria dos Olivais predominam os edifícios pertencentes à classe «Betão 1961-85». Finalmente, em 2001, a classe «Betão 1986-01» tinha pouca incidência na cidade de Lisboa (< 20%), exceptuando-se a freguesia do Lumiar.

3.2 Análise do risco sísmico

3.2.1 Simulador de cenários sísmicos

O Simulador de Cenários Sísmicos, LNECloss, é uma ferramenta computacional que permite modelar, numa qualquer parcela do território português, as perdas em consequência de um cenário sísmico especificado [37]. Esta ferramenta inclui vários módulos, sequenciais e independentes, dedicados à modelação da acção sísmica em afloramento rochoso, à avaliação dos danos no edificado e à avaliação das perdas económicas e humanas. Em algumas regiões do território continental, como a Área Metropolitana de Lisboa e alguns dos seus concelhos limítrofes, ou a região do Algarve [38], o Simulador também tem a capacidade de modelar a acção sísmica à superfície, pois, em projectos anteriores [24, 31, 38], foi efectuado um estudo de caracterização geotécnica específico para estas regiões.

O Simulador possui uma grande versatilidade em termos de metodologias e dados, devido à sua estrutura modular, facilidade de actualização e integração num Sistema de Informação Geográfico (SIG). Os elementos em risco, que constituem alguns dos dados de entrada para o Simulador, encontram-se armazenados em bases de dados, que incluem a informação apurada nos Censos 91 e 2001 sobre o edificado residencial e seus ocupantes. A informação encontra-se referenciada geograficamente e está organizada em função das variáveis relevantes para a caracterização da vulnerabilidade dos elementos em risco, tal como se ilustrou na secção 3.1.3.

Cada módulo do Simulador possui modelos alternativos de cálculo que podem ser seleccionados pelo utilizador.

Assim, no módulo de avaliação de danos, o utilizador pode optar por metodologias estatísticas ou mecanicistas [7], tendo sido a metodologia mecanicista a adoptada no presente artigo. Por oposição às metodologias estatísticas, as mecanicistas apresentam, entre outras vantagens, a possibilidade de se considerar as características espectrais da acção sísmica.

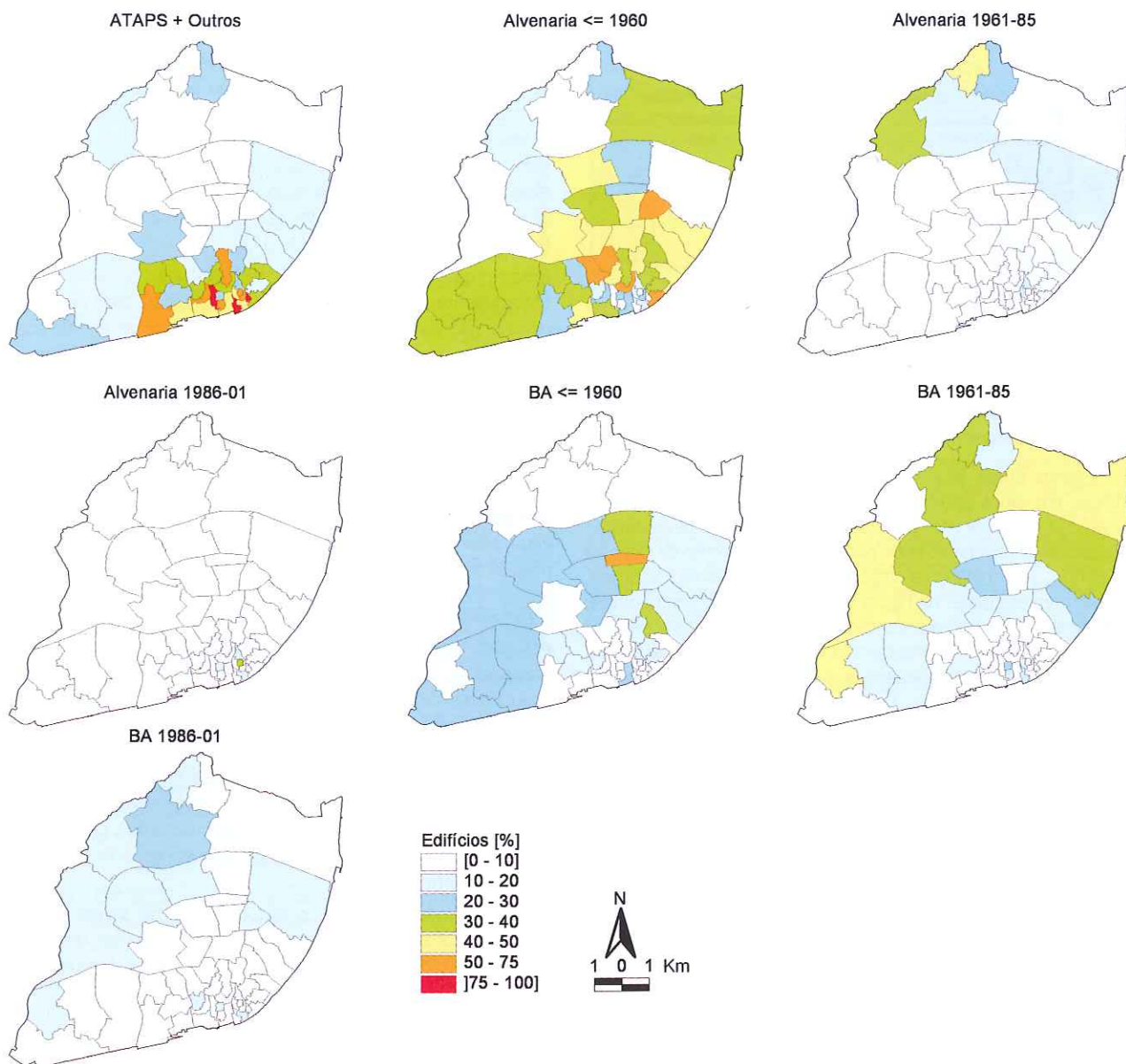


Figura 8 Mapas de vulnerabilidade sísmica da cidade de Lisboa

Na essência do módulo mecanicista de avaliação de danos físicos directos do Simulador tem-se duas etapas fundamentais. A primeira envolve a avaliação do desempenho sísmico de um edifício com base em análises estáticas não lineares com imposição de deslocamentos horizontais, que passa pela definição de curvas de capacidade resistente dos edifícios, de espectros de solicitação reduzidos e de um processo iterativo para a convergência de ambos. Este processo iterativo de avaliação da máxima resposta sísmica das estruturas baseia-se no método do espectro de capacidade [39, 40], que compara a resistência das estruturas a forças laterais com as exigências impostas pelo movimento sísmico do terreno. A sua

aplicação requer que o espectro de resposta e a curva de capacidade estejam representados num espaço de aceleração espectral, S_A , versus deslocamento espectral, S_D , conforme se exemplifica na Figura 9. Nesta metodologia, as curvas de capacidade são definidas por três troços distintos, delimitados por dois pontos de controlo representativos da capacidade de cedência (SD_y, SA_y) e da capacidade última (SD_u, SA_u). O Simulador LNECloss recorre a um procedimento operacional inovador, baseado na teoria dos processos estocásticos, para avaliar o ponto máximo de resposta, que tem a vantagem de aumentar a eficiência e precisão dessa avaliação [31].

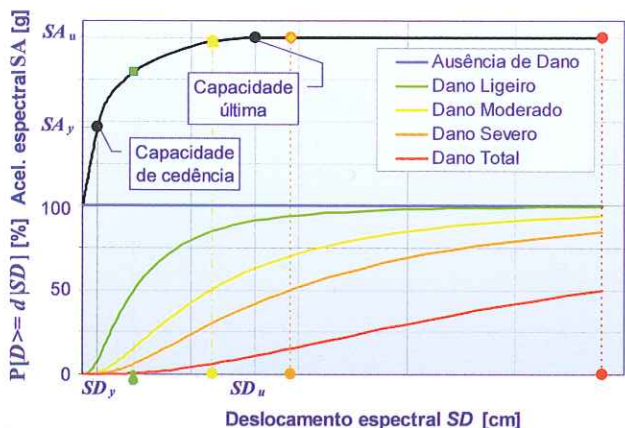


Figura 9 Exemplo de curva de capacidade (em cima a preto) e de curvas de fragilidade para 5 estados de dano

Na segunda etapa, procede-se à avaliação dos quantitativos de edifícios em vários estados de dano, o que envolve a definição de curvas de fragilidade sísmica para cada estado de dano, em função do deslocamento relativo entre pisos no ponto máximo de resposta do edifício, determinado na etapa anterior. As curvas de fragilidade, também representadas na Figura 9, assumem, nesta metodologia, a forma de funções de distribuição lognormais que visam exprimir a probabilidade de uma determinada tipologia se encontrar em, ou exceder, um determinado estado de dano, dada uma acção sísmica de determinada severidade. Desta forma, as curvas de fragilidade são funções que distribuem um conjunto de edifícios pertencentes a uma dada tipologia por cinco estados de dano, conhecida a severidade da acção sísmica. Estas curvas são exemplificadas de forma qualitativa na Figura 9. Os resultados do módulo de danos do Simulador incluem, por unidade geográfica e tipologia, as estimativas do número e percentagem de edifícios nos estados de dano *Ausência de Danos*, *Danos Ligeiros*, *Moderados*, *Severos* e *Totais*, sendo os totais sintetizados para a região analisada.

Para cada uma das 49 tipologias identificadas na secção 3.1.3, definiu-se uma curva de capacidade e 5 curvas de fragilidade, seguindo-se os critérios preconizados em [15].

No que toca à avaliação de perdas humanas, actualizou-se o Simulador com um novo modelo publicado em [21], coerente com a metodologia de danos utilizada neste artigo. De realçar que a formulação matemática subjacente a este novo modelo é idêntica à de um dos modelos previamente existentes no Simulador [15], tendo este sofrido alterações apenas ao nível dos coeficientes envolvidos. Como resultado destas actualizações, o Simulador estima valores mais elevados para as perdas humanas em cenários previamente testados. Por exemplo, para acções sísmicas semelhantes às dos terremotos de 1755 e de 1909, actuando sobre os elementos em risco levantados nos Censos 2001 para o território continental, a aplicação da nova metodologia [21] acarreta, respectivamente, um aumento do número de vítimas mortais de cerca de 220% e de 180%, quando comparado com os resultados apurados com a metodologia previamente integrada no Simulador [7, 15]. Saliente-se que, entre os vários modelos implementados no Simulador, o que corresponde à metodologia Hazus 99 [15] é o que conduz a valores mais reduzidos de perdas humanas.

3.2.2 Curvas de risco sísmico

As curvas de excedência de perdas, também designadas de curvas risco sísmico, foram traçadas recorrendo ao Simulador LNECloss, com o qual se modelaram os danos, as perdas económicas e as perdas sociais para a cidade de Lisboa. Para o efeito, correu-se o Simulador impondo 24 cenários de acção sísmica, traduzidos pelos espectros de resposta uniformes obtidos em Lisboa, para 12 períodos de retorno e para a perigosidade sísmica do tipo afastado e próximo, conforme se descreveu na secção 3.1.2.

Uma vez que o modelo mecanicista de avaliação de danos envolve procedimentos não lineares, as perdas totais, para cada período de retorno, não podem ser obtidas recorrendo a um cenário de acção sísmica resultante da envolvente dos espectros dos dois tipos de cenários sísmicos modelados. Acresce que o espectro envolvente dos dois cenários não é um espectro realista para reproduzir a acção sísmica imposta.

Desta forma, para cada período de retorno, T , calcularam-se as taxas médias de ocorrência de sismos nas zonas de geração responsáveis pela perigosidade sísmica próxima e afastada e que são capazes de gerar, anualmente, em Lisboa, perdas L superiores a um determinado nível de referência l :

$$(\lambda_{L>l})_{\text{Próximo}} = 1 / T_{\text{Próximo}} \quad \text{e} \quad (\lambda_{L>l})_{\text{Afastado}} = 1 / T_{\text{Afastado}} \quad (5)$$

Assumido que, tanto para o cenário próximo como para o cenário afastado, as perdas geradas por sismos em Lisboa seguem um processo de Poisson e que são independentes entre si, quer espacial quer temporalmente, ou seja, admitindo que o facto de ter ocorrido um sismo nas zonas de geração responsáveis pelo cenário próximo não condiciona o processo de ocorrências nas zonas de geração responsáveis pelo cenário afastado, e vice-versa, justifica-se a operação de adição das taxas de excedência dos dois cenários para se obter a taxa de ocorrência de um processo geral de Poisson do acontecimento $(\lambda_{L>l})_{\text{Total}}$.

Assim, o modelo estocástico de ocorrência de sismos permite estimar a probabilidade de ocorrer, pelo menos uma vez, um evento sísmico capaz de gerar, no local em análise, perdas L superiores a l_{Total} num intervalo de tempo unitário:

$$P[(L > l)_{\text{Total}}] = 1 - \exp [-(\lambda_{L>l})_{\text{Próximo}} + (\lambda_{L>l})_{\text{Afastado}}] \quad (6)$$

A probabilidade de excedência na unidade de tempo, apresentada na expressão 6, resulta da ocorrência aleatória de sismos em qualquer das zonas de geração que contribuem para as perdas geradas no local e baseia-se na propriedade do processo de Poisson de não ser afectado pela agregação de processos de Poisson independentes [41].

Na Figura 10 apresenta-se o gráfico das curvas de risco sísmico para os cenários próximo, afastado e total, medido em termos de perdas económicas absolutas e relativas, estimadas de acordo com a expressão 2 e admitindo os pressupostos apresentados nas secções 3.1.3 e 3.2.2, respectivamente, relativos à exposição dos elementos em risco e à agregação de processos de Poisson independentes. Importa sublinhar que este gráfico inclui duas escalas verticais, em que a escala da esquerda mede as perdas económicas em termos absolutos e a da direita em termos relativos.

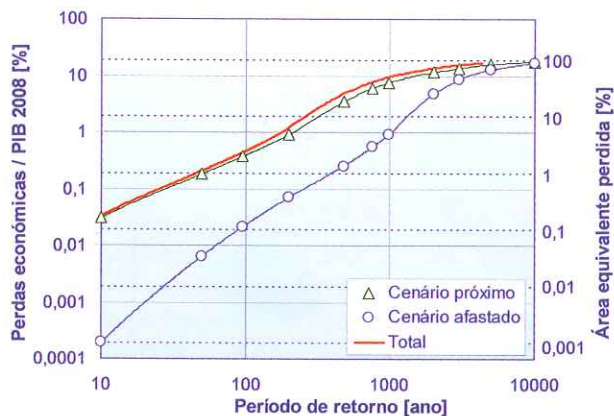


Figura 10 Curvas de risco sísmico para Lisboa medido em termos de perdas económicas absolutas (eixo vertical da esquerda) e relativas (eixo vertical da direita)

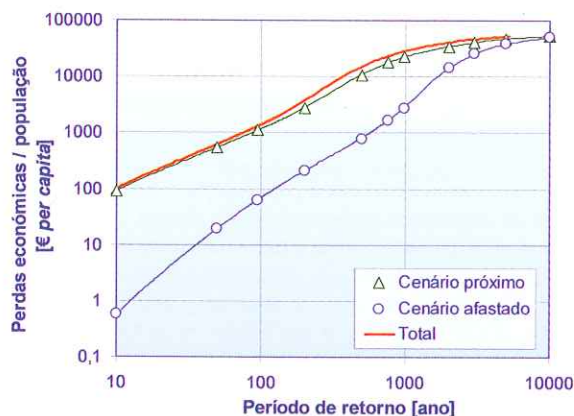


Figura 11 Curvas de risco sísmico para Lisboa medido em termos de perdas económicas *per capita*

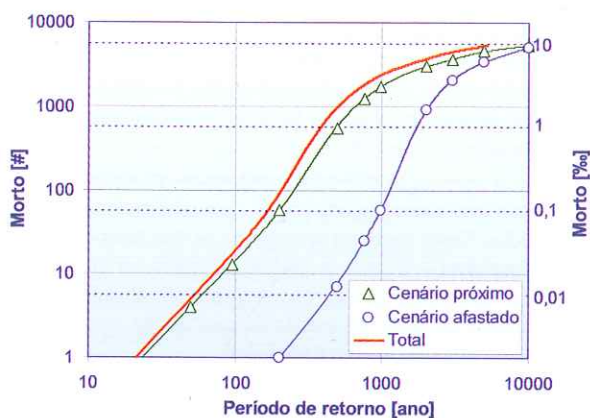


Figura 12 Curvas de risco sísmico para Lisboa medido em termos de perdas humanas absolutas (eixo vertical da esquerda) e relativas (eixo vertical da direita)

Assim, na escala da esquerda apresentam-se as perdas económicas absolutas obtidas para o concelho de Lisboa. Mais uma vez, para facilitar a percepção dos valores monetários envolvidos, normalizaram-se as perdas pelo valor do PIB de 2008. Na escala da direita apresentam-se as perdas relativas medidas pela percentagem da área equivalente perdida do parque habitacional do concelho analisado. Da observação da Figura 10 constata-se que as perdas totais são condicionadas essencialmente pelo cenário de acção sísmica próximo.

Na Figura 11 apresentam-se as curvas de risco sísmico medido em termos de perdas económicas *per capita* e, na Figura 12 apresentam-se as curvas de risco sísmico medido em termos de perdas humanas absolutas e relativas. Nesta análise seguiram-se os mesmos pressupostos e procedimentos operacionais adoptados no traçado das curvas de risco da Figura 10, verificando-se, mais uma vez a importância da acção sísmica próxima para a estimativa das perdas totais. Uma possível leitura da Figura 11 mostra que, em média, na cidade de Lisboa, se espera que sejam excedidas, pelo menos uma vez, perdas no seu parque habitacional com um valor próximo de 1 500 € *per capita*, em 100 anos, e de 30 000 € *per capita*, em 1 000 anos. Por sua vez, a Figura 12 indica que, em média, na cidade de Lisboa, se espera que sejam excedidas, pelo menos uma vez, perto de 20 vítimas mortais, em 100 anos, e cerca de 2500 vítimas mortais em 1000 anos.

3.2.3 Valores anuais esperados do risco sísmico

Em cada freguesia da cidade de Lisboa traçaram-se curvas de risco total semelhantes às exibidas nas Figuras 10 a 12. Conhecidas as distribuições cumulativas do risco aplicou-se a expressão 4 para obtenção dos valores anuais esperados do risco sísmico, por freguesia desta cidade, conforme se ilustra na Figura 13.

Sobre os valores esperados das perdas económicas anuais constantes da Figura 13 refira-se que a freguesia de S. Jorge de Arroios sobressai por possuir o indicador de risco absoluto *AEL* mais elevado. O risco elevado desta freguesia é consentâneo com o valor elevado da sua perigosidade sísmica para o cenário próximo (Figura 4), pela exposição relativamente elevada que apresenta (Figura 5) e por nela predominarem edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade da alvenaria com data de construção anterior a 1960 (Figura 8). O facto de esta mesma freguesia também sobressair no mapa do indicador de risco económico *per capita*, *AELC*, revela que o valor da população exposta não é suficientemente elevado para reduzir o valor das perdas económicas normalizadas pela população. Por outro lado, os traços mais salientes na carta de risco económico específico, *AELR*, são os seus valores elevados na freguesia de S. Nicolau, S. Paulo e Encarnação, apesar de a perigosidade sísmica do cenário próximo nas duas primeiras freguesias (Figura 4) apresentar valores mais reduzidos. Naturalmente, a vulnerabilidade sísmica destas freguesias deverá ser elevada, o que é consistente com o facto de nelas predominarem as tipologias mais vulneráveis do parque habitacional de Lisboa (ATAPS + Outros).

A distribuição geográfica dos indicadores de risco social absoluto, *AHL*, ilustrada na Figura 13, em baixo à esquerda, mostra que os valores anuais esperados de vítimas mortais são mais elevados no

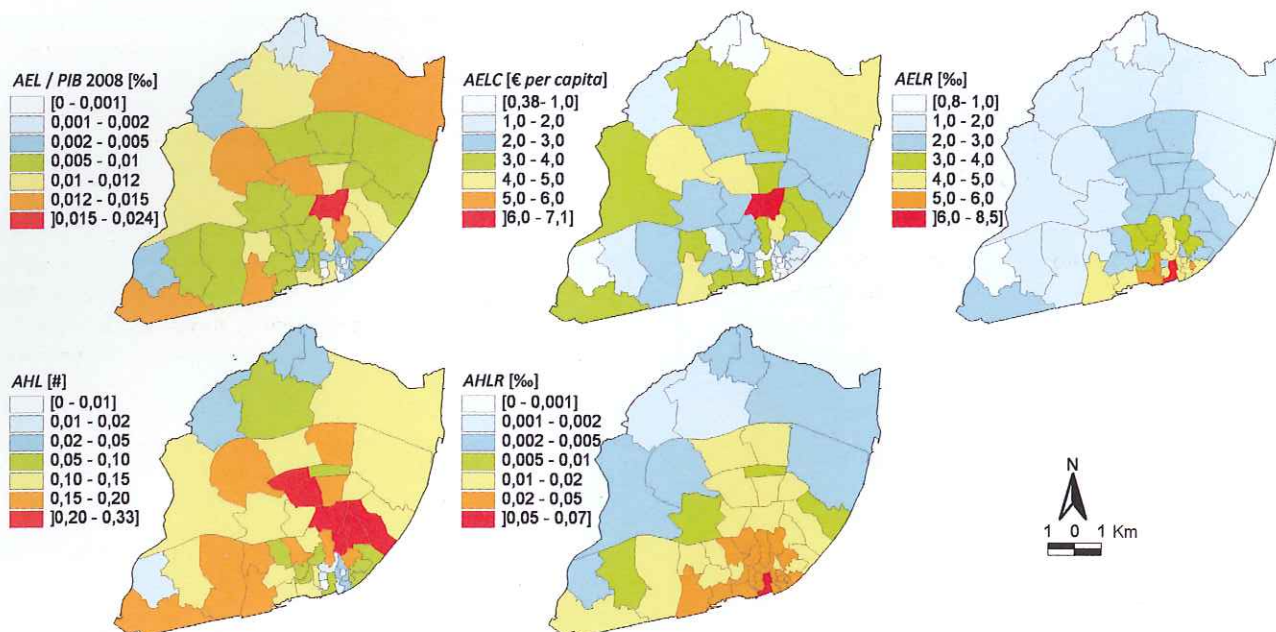


Figura 13 Valores anuais esperados do risco sísmico por freguesia de Lisboa

centro da cidade, nas freguesias de Nossa Senhora de Fátima, São Jorge de Arroios, Anjos, Penha de França e S. João. Nestas freguesias, a elevada perigosidade sísmica para o cenário próximo, aliada a uma moderadamente elevada população exposta, conduzem a valores elevados deste indicador de risco social absoluto. Em termos relativos, na Figura 13 em baixo à direita (*AHLR*), observa-se uma grande mancha laranja que corresponde aos valores mais elevados de *AHLR*. Verifica-se, no entanto, que os valores elevados deste indicador de risco relativo nem sempre coincidem com os valores mais elevados da perigosidade sísmica, o que revela uma vulnerabilidade elevada. Assim, no que toca ao risco social relativo, sobressai a freguesia de S. Nicolau, por ser a que apresenta os valores mais elevados de *AHLR*, à semelhança do que já tinha acontecido com *AELR*.

Quadro 5 Indicadores do risco sísmico anual esperado em Lisboa

Risco económico	Cenário próximo	Cenário afastado	Cenário total
<i>AEL</i> [€ × 10 ⁶]	59,8	11,0	70,3
<i>AEL</i> / PIB 2008 [%]	0,3599	0,0659	0,423
<i>AELC</i> [€ per capita]	108,1	19,8	127,2
<i>AELR</i> [%]	1,953	0,358	2,297
Área perdida [%]	0,195	0,036	0,230
Risco social	Cenário próximo	Cenário afastado	Cenário total
<i>AHL</i>	4,7	1,2	6,0
<i>AHLR</i> [%]	0,0085	0,0022	0,0108

No Quadro 5 resumem-se os valores dos indicadores do risco sísmico anual esperado em Lisboa para a ação sísmica tipo 1 e 2 resultantes da análise probabilística do risco sísmico. Note-se que as perdas anuais esperadas, obtidas a partir das curvas de risco total, com recurso às expressões 4 a 6, são aproximadamente iguais à soma das perdas esperadas para os cenários próximo e afastado. As cores das células e texto deste quadro são consentâneas com as propostas no Quadro 2 e nas Figuras 10 a 12.

3.3 Avaliação do risco sísmico

No Quadro 6 exibem-se os valores esperados do risco sísmico em termos de vítimas mortais, obtidos em estudos anteriores para várias regiões do globo e para Portugal Continental. No mesmo quadro apresenta-se ainda o risco de morte anual estimado para Lisboa neste artigo, ou seja, 1 / (6,0 / 553 113), em que se divide o número de mortes correspondente ao cenário total pela população de Lisboa, obtendo-se uma probabilidade de morte anual ligeiramente superior a 1:10⁵.

Com vista à apreciação do risco, compara-se o valor obtido com os critérios de tolerabilidade e de aceitabilidade geralmente considerados. Neste contexto distinguem-se dois tipos de medidas do risco aceitável – o risco individual, definido como o risco de morte por pessoa exposta num ano, e o risco social, definido como a probabilidade anual de um evento do qual resulta um número de mortos igual ou superior a um dado valor.

A apreciação do risco social é tipicamente realizada recorrendo a curvas *F-N* (frequência de um número de fatalidades não inferior a *N*), nas quais está presente a aversão da sociedade a eventos capazes de provocar um grande número de fatalidades, como os fenómenos sísmicos, e em que, simultaneamente, se desvalorizam eventos frequentes com o mesmo número total de vítimas [42]. Porém, o

estabelecimento de critérios de apreciação do risco social é ainda um tema controverso, pelo que, na sequência, apenas se aprecia o risco individual.

O limite de aceitabilidade proposto para o risco individual [43] deve estar compreendido entre 10^{-6} e 10^{-8} . Admite-se, em circunstâncias excepcionais, que o seu valor máximo anual (limite de tolerabilidade) possa descer para 10^{-5} em estruturas a construir, e para 10^{-4} em estruturas existentes, quando a redução do risco for impraticável ou os respectivos custos forem desproporcionais aos benefícios decorrentes (princípio *ALARP – As Low As Reasonably Practicable*).

Com base nestes limites, conclui-se que o risco sísmico anual para Lisboa, se situa entre os limites de aceitabilidade e de tolerabilidade para estruturas existentes, devendo ser aplicado o Princípio ALARP. Salienta-se, no entanto, que a quantificação do risco deverá ter em conta todas as suas origens, o que não se verifica no caso presente, onde apenas foi considerado o risco sísmico. Contudo, a disponibilização de estimativas do valor do risco sísmico anual esperado permite compará-lo com as perdas esperadas decorrentes de outros riscos naturais mais frequentes, como por exemplo cheias, facultando o seu enquadramento numa abordagem multi-risco.

Quadro 6 Probabilidade anual de um indivíduo morrer em consequência de sismos

Morte em consequência de sismos	Probabilidade anual
Irão ¹	1 : 23 000
Itália ²	1 : 68 000
Lisboa	1 : 93 000
Portugal Continental – mortes ocorridas entre 1755 e 2000 ²	1 : 105 000
Sismo no Arquipélago dos Açores (mortes no século XX) ²	1 : 252 000
Portugal Continental – análise de risco ²	1 : 694 000
Califórnia ¹	1 : 2 000 000
Portugal Continental – mortes ocorridas no século XX ²	1 : 13 400 000

¹ [13] ² [7]

Analisando estes resultados constata-se que o risco específico de morte (1 : 93 000), em consequência de sismos em Lisboa, possui um valor médio anual superior ao da Califórnia, mas inferior ao valor do mesmo risco anual em Itália ou no Irão.

Não obstante, alguns dos valores presentes neste quadro devem ser encarados como meramente indicativos, pois, com excepção da análise de risco efectuada para Portugal Continental em [7], os restantes valores apresentados na mesma publicação, resultaram meramente da divisão do número anualizado de vítimas mortais pela população média no período analisado. Importa sublinhar que o risco de morte obtido a partir de um intervalo de ocorrência de sismos confinado ao século XX é consideravelmente inferior ao obtido com a informação relativa a períodos de tempo mais vastos, ou com as metodologias probabilísticas. Em concreto, o risco específico de morte em Portugal Continental aumenta perto de 130 vezes quando se compara o risco obtido a partir de um intervalo

de observação limitado ao século XX com o risco estimado a partir de um intervalo de observação mais vasto e que inclua eventos extraordinariamente severos, como o sismo de 1755 [7]. Por outro lado, o risco específico de morte anual para o território Continental, obtido por métodos probabilísticos, é cerca de 20 vezes superior ao valor médio obtido com as ocorrências do século XX.

No Quadro 7 comparam-se os valores dos indicadores de risco obtidos para Lisboa no presente estudo com os valores obtidos em [7], em que se adoptaram modelos mais simplificados para a avaliação da perigosidade sísmica e danos nos edifícios (ver secção 3.1.1), verificando-se um aumento significativo de todos os valores dos indicadores analisados. No que toca ao risco económico absoluto esta variação justifica-se, não só pela alteração dos modelos aplicados, como também pelo aumento de cerca de 27% no valor de reposição por m² agora adoptado (ver secção 3.1.3).

Quadro 7 Comparação de indicadores de risco sísmico anual esperado no concelho de Lisboa

Indicador de risco	Estudo actual	Referência [7]
AEI [€ × 10 ⁶]	70,3	8,1
AELC [€ per capita]	127,2	14,7
AEIR [%]	2,297	1,216
AHL	6,0	1,8
AHLR [%]	0,0108	0,0032

Por fim, resta referir o estudo realizado para a Área Metropolitana de Lisboa (AML) e concelhos limítrofes [4], no qual foram traçadas curvas de risco económico com base num modelo mecanicista de danos, tal como no presente estudo, mas adoptando-se cenários, apenas afastados, resultantes da desagregação da perigosidade sísmica e correspondentes a vários períodos de retorno. Sabendo que a área habitacional exposta no concelho de Lisboa representa 18% da área exposta no território analisado em [4], verifica-se que as perdas agora obtidas para o concelho de Lisboa são relativamente superiores às então estimadas para o território da AML e concelhos limítrofes.

4 Conclusões

Efectuou-se a apreciação do risco sísmico na cidade de Lisboa providenciando a informação de base para apoiar decisões fundamentadas relativas à mitigação deste risco.

As principais conclusões possíveis de retirar dos resultados alcançados são:

- as perdas totais na cidade de Lisboa são condicionadas essencialmente pelo cenário de acção sísmica próximo decorrente do modelo probabilístico de perigosidade sísmica adoptado na presente análise de risco;
- as freguesias antigas são aquelas em que o risco relativo anual esperado é mais elevado;

- iii. as freguesias responsáveis pelos maiores valores de risco absoluto são as que apresentam vulnerabilidades mais elevadas e maiores valores de exposição;
- iv. o risco de morte anual devido a sismos a que os habitantes da cidade de Lisboa estão expostos é ligeiramente superior $1:10^5$. Admitindo o valor de 10^{-4} para o limite de tolerabilidade do risco individual conclui-se que este risco se situa na zona ALARP, devendo-se realizar estudos económicos que permitam verificar a possibilidade de redução deste valor de risco para valores inferiores aos do limite de aceitabilidade.

Note-se, no entanto, que o presente estudo foi realizado a partir de um inventário do parque habitacional baseado nos Censos 2001 e que nos últimos 10 anos este parque poderá ter sofrido algumas alterações decorrentes, principalmente, da sua renovação natural. Acresce que os modelos de avaliação de perdas humanas possuem uma incerteza elevada, podendo conduzir a resultados muito díspares.

Desta forma, face aos níveis de risco estimados neste trabalho e ao facto de eles se situarem na zona ALARP, recomenda-se que, para além da realização de estudos sobre a viabilidade económica da redução do risco sísmico, este continue a ser monitorizado, recorrendo-se, se possível, a levantamentos actualizados dos elementos expostos no município de Lisboa.

O trabalho realizado nesta área até à presente data permite identificar alguns desafios de desenvolvimento associados a uma exploração mais aprofundada das ferramentas desenvolvidas. Propõe-se, assim, que em trabalhos futuros:

- i. se desagregue o risco na cidade de Lisboa por classe de vulnerabilidade e tipo de solo, à semelhança do que foi realizado em [36] para a Área Metropolitana de Lisboa e concelhos limítrofes;
- ii. se utilizem árvores lógicas para estimar a incerteza epistémica envolvida na análise de risco, em particular no que toca à avaliação de perdas humanas;
- iii. se dê os primeiros passos conducentes à obtenção de estimativas de perdas indirectas decorrentes de sismos nas principais regiões sísmicas de Portugal.

5 Agradecimentos

Agradece-se à Dra. Anabela Martins a colaboração prestada no processamento da informação, elaboração de elementos gráficos e formatação do texto do artigo.

6 Referências

[1] Lenhardt, W. – "Earthquakes – from cause to effect". *Geomechanik und Tunnelbau*, 2008, Vol.1 pp. 149-155, DOI: 10.1002/geot.200800012, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. Kg, Berlim.

[2] Smolka, A.; Hollnack, D. – "Risk management for Natural >Perils. The view of global reinsurer". *Geomechanik und Tunnelbau*, 2008, Vol. 1 pp. 103-111, DOI: 10.1002/geot.200800011, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. Kg, Berlim.

[3] McGuire, R. – *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute, 2004, EUA: EERI.

[4] Campos Costa, A. et al. – "Evaluation of seismic risk and mitigation strategies for the existing building stock: application of LNECloss to the Metropolitan Area of Lisbon". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, pp. 119-134, DOI: 10.1007/s10518-009-9160-3, Springer.

[5] Sousa, M.L. et al. – "Análise do risco sísmico de Portugal Continental". *II Encontro Nacional de Riscos, Segurança e Fiabilidade*, 2007, IST, pp. 209-223, Lisboa, Portugal.

[6] Campos Costa et al. – "Seismic risk: methods and application to Portugal", 11ECEE, 1999, Rotterdam: Balkema.

[7] Sousa, M.L. – *Risco Sísmico em Portugal Continental*. Tese de Doutoramento, 2006, IST, UTL, Lisboa.

[8] Sousa, M.L. et al. – "Modelos Probabilísticos para a Avaliação de Perdas Causadas por Sismos: Aplicação à Cidade de Lisboa". *3º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, pp.109-118, 1999, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

[9] Sousa, M.L. – "Hierarquização das regiões de Portugal Continental em função do seu risco sísmico", *7º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, 2007, FEUP, Porto.

[10] UNDRO – *Natural disasters and vulnerability analysis*. 1979, United Nations Disaster Relief Coordinator, Report of expert group meeting, Geneva.

[11] Sandi, H. – "Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems", *8th European Conference on Earthquake Engineering*, 1986, pp. 11-69, LNEC, Lisboa.

[12] Barbat, A.H.; Pujades, L. – "Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona", *6º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, 2004, pp. 229-252, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.

[13] Coburn, A.W. et al. – *Vulnerability and risk assesment*. 2ª Ed. Disaster Management Training Programme (DMTP), 1994, Department of Humanitarian Affairs (DHA), United Nations Development Programme (UNDP), Cambridge, Reino Unido.

[14] ATC – *Earthquake damage evaluation data for California*. ATC 13, 1985, Redwood City, Califórnia: Applied Technology Council.

[15] FEMA; NIBS – *Earthquake loss estimation methodology – HAZUS 99*. 1999, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC.

[16] Vicente, R. – *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra*. 2008, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.

[17] Wesson, R.L.; Perkins, D.M. – "Spatial correlation of probabilistic earthquake ground motion and loss". 2001, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 91, nº6: 1498-1515.

[18] FEMA – *HAZUS®MH Estimated annualized earthquake losses for the United States*. FEMA 366, 2008, Federal Emergency Management Agency, 500 C Street, SW Washington, DC 20472.

[19] Oliveira, C.S. – *A sismicidade histórica e a revisão do catálogo sísmico*. Relatório 99/86 – NDA, 1986, LNEC, Lisboa.

[20] Campos Costa, A. et al. – "Seismic Zonation for Portuguese National Annex of Eurocode 8", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008, Pequim, China.

- [21] FEMA – *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model. HAZUS@MH MR4*, Technical Manual. 2003, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC.
- [22] Giovinazzi, S.; Lagomarsino, S. – “Seismic risk analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas”. *European Safety and Reliability Conference*, 2003. Maastricht.
- [23] Coburn, A.W.; Spence, R. – *Earthquake protection*. John Wiley & Sons, LTD, 2002, Reino Unido.
- [24] Sousa, M.L., et al. – *Estudo do risco sísmico e de tsunamis do Algarve (ERSTA). Relatório final. WP11 – Definição com base probabilística de cenários sísmicos para o planeamento de emergência. WP12 – Caracterização da propagação da energia sísmica em rocha, desde a fonte até ao local. WP13 – Efeitos de sítio – caracterização geotécnica. WP15 – Parque edificado. WP16 – Pontos vitais. WP17 – Parque hoteleiro. WP19 – Avaliação de danos humanos*. Relatório 295/2008, DE/NESDE, 2008, LNEC, Lisboa.
- [25] SHARE – *Seismic Hazard Harmonization in Europe*, 2010. <http://www.share-eu.org/>, acessado em 2010.
- [26] Carvalho, E.C.; Correia, R. – “Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Partes 1 e 5”. *Seminário Eurocódigos Estruturais: O início da sua aplicação em Portugal*, 2010, LNEC, Lisboa.
- [27] Instituto de Meteorologia. – “Projecto ERSTA - Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve. Relatório de Execução Material”. 2008, Lisboa.
- [28] Carvalho, A. – *Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal Continental*. Tese de doutoramento, 2007, IST, UTL, Lisboa.
- [29] Motazedian, D.; Atkinson, G. – “Stochastic finite-fault model based on dynamic corner frequency”. 2005, *Bull. Seism. Soc. Am.*; Vol. 95, pp. 995-1010.
- [30] Weatherill, G. et al. – *Specification of Design Actions in Codes: Definitions needed for Structural Design Applications*. 2010, indicador de execução D2.2 do projecto Seismic Hazard Harmonisation in Europe (SHARE), Universidade de Pavia (UPAV), Itália.
- [31] Carvalho, E.C. et al. – *Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Relatório final*. Relatório 280/02 – G3ES, 2002, LNEC, Lisboa.
- [32] INE – *Recenseamento da população e da habitação (Portugal) - Censos 2001*. 2002, Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- [33] INE – *Estatísticas da construção de edifícios*. 2001, Instituto Nacional de Estatística. Lisboa.
- [34] MEID – *Principais indicadores económicos de Portugal*, 2010, Gabinete de Estratégia e Estudos, Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento.
- [35] Campos Costa, A. et al. – *Building Stock Inventory and Vulnerability Data for Lisbon Metropolitan Area*. Relatório 161/2005, DE/NESDE, Proc. 0305/17/1552, 2005, LNEC, Lisboa.
- [36] LESSLOSS – Deliverable 85 – *Report for each city containing reference loss estimates*. 2006, relatório do subprojecto SP10 Earthquake disaster scenario predictions and loss modelling for urban areas do projecto do 6º Programa Quadro Europeu LESSLOSS Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides, no.: GOCE CT 2003 505488.
- [37] LESSLOSS – *Earthquake Disaster Scenario Prediction and Loss Modelling for Urban Areas*. Editor Robin Spence, 2007, IUSS Press, Pavia, Itália.
- [38] Sousa, M.L. et al. – “Simulação de cenários sísmicos no Algarve”. *III Encontro Nacional de Risco Segurança e Fiabilidade*, 2009, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [39] ATC – *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Relatório nº SSC 96 01, 1996, Applied Technology Council, ATC 40. Redwood City, Califórnia.
- [40] Freeman, S.A. – “The capacity spectrum method as a tool for seismic design”. *11th European Conference on Earthquake Engineering*, 1999, Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.
- [41] Hillier, F.S. & Lieberman, J.G. – *Introduction to operation research* 5ª Edição, 1990, McGraw-Hill, New York.
- [42] Faber, M.H. & Stewart, M.G. – *Risk assessment for civil engineering facilities; critical overview and discussion*, 2003, Reliability Engineering and System Safety 80, pp. 173-184.
- [43] ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams) – *Guidelines on risk assessment*, 2003, ANCO