
ESTUDO DE ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE RISCO SÍSMICO DE ÂMBITO REGIONAL



Alfredo Campos
Costa

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



Maria Luísa Sousa

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

SUMÁRIO

Estudam-se estratégias de mitigação de risco sísmico aplicadas à Área Metropolitana de Lisboa (AML), pois esta é a região de Portugal com maiores valores expostos ao risco sísmico. Actualizou-se o Simulador de Cenários Sísmicos, LNECloss, implementando-se medidas conceptuais de reabilitação sísmica no parque habitacional da AML. Estimam-se os danos e as perdas para uma situação de referência e para várias hipóteses de mitigação.

Palavras-chave: risco sísmico, estratégias de mitigação, Área Metropolitana de Lisboa (AML).

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projecto LESSLOSS, *Risk mitigation for earthquakes and landslides*, [1] do 6º Programa Quadro Europeu, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) esteve envolvido no sub-projecto SP10 *Disaster scenarios predictions and loss modelling for urban areas* que tinha como objectivo principal estabelecer estratégias para a mitigação do risco sísmico, tendo sido seleccionadas três cidades Europeias como casos de estudo: Lisboa, Istambul e Salónica.

A contribuição do LNEC incidiu sobre a Área Metropolitana de Lisboa e concelhos limítrofes (AML), pois esta é a região de Portugal com maiores valores expostos ao risco sísmico, tanto demográficos como económicos.

A metodologia adoptada envolveu a actualização do Simulador de Cenários Sísmicos, LNECloss, de forma a este poder contemplar a reabilitação sísmica das tipologias construtivas que integram as bases de dados do Simulador. Simulou-se o impacto de diversas estratégias de mitigação do risco sísmico da região em estudo, tendo por referência a situação existente no terreno, à data dos Censos 2001. Para o efeito, foram ensaiadas diversas hipóteses de redução da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional dessa região.

Para avaliar os benefícios das estratégias de mitigação simuladas recorreu-se a dois tipos de indicadores de risco, o primeiro avaliado a partir dos danos e perdas económicas no parque habitacional da AML e o segundo decorrente de estimativas de perdas humanas resultantes dos danos mencionados. Identificaram-se ainda as tipologias construtivas que, em simultâneo com determinadas condições geotécnicas, são responsáveis pelos maiores valores de perdas absolutas e relativas.

2. VULNERABILIDADE SÍSMICA E AVALIAÇÃO DE DANOS E PERDAS

2.1 Modelação de danos no edificado

O Simulador LNECloss utiliza o *método do espectro de capacidade* [2], para estimar o *ponto de desempenho*, ou seja, o ponto de resposta máxima da estrutura na eminência do colapso, quando actuada por uma dada acção sísmica. Esta metodologia encontra-se bastante divulgada ao nível mundial, pois está implementada no conhecido pacote informático designado de HAZUS¹. Em termos práticos, o ponto de resposta máxima é determinado por um procedimento gráfico expedito que identifica a intersecção da curva de capacidade resistente da estrutura com um espectro de resposta representativo da solicitação sísmica para um determinado valor de amortecimento. Grosso modo, o movimento sísmico conduz a estrutura para um regime não linear o que pode levar à degradação de alguns dos seus elementos estruturais pelo que a sua rigidez secante global decresce, provocando não só a alteração da frequência natural da estrutura como do amortecimento viscoso. Este é equivalente à dissipação da energia decorrente dos mecanismos de histerese formados na estrutura. A aplicação do método do espectro de capacidade requer que o espectro de resposta e a curva de capacidade estejam representados num espaço de aceleração

¹ A metodologia FEMA & NIBS [3] tem por objectivo principal estabelecer procedimentos e orientações para a obtenção, a uma escala regional, de estimativas de perdas resultantes da ameaça sísmica, ou de estimativas de perdas após a ocorrência de um desastre desta natureza, que serão utilizadas para fundamentarem estratégias de mitigação do risco sísmico e decisões relativas ao planeamento e à gestão da emergência. Esta metodologia é correntemente conhecida por HAZUS, pois esta é a designação do pacote informático que a implementa e que recorre a dados e variáveis com valores de defeito válidos para o território dos EUA.

espectral, SA , versus deslocamento espectral, SD . Para o efeito, é necessário normalizar as curvas de capacidade em relação à massa do edifício convertendo a resistência em aceleração, conforme pormenorizado no relatório ATC-40 [2]. Neste novo formato as curvas de capacidade passam a ser designadas de *espectros de capacidade*. O Simulador LNECloss recorre a um procedimento operacional inovador, baseado na teoria dos processos estocásticos, para avaliar o ponto de resposta máximo, e que tem a vantagem de aumentar a eficiência e precisão dessa avaliação [4].

Por outro lado, a metodologia FEMA & NIBS [3] apresenta regras simples para definir curvas de capacidade num espaço de aceleração espectral, SA , versus deslocamento espectral, SD , considerando aspectos ligados ao dimensionamento sísmico das estruturas. Assim, 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), conforme se exemplifica na Fig. 1 e se exprime pelas seguintes equações:

$$SA_y = Cs \gamma / \alpha \quad SD_y = SA_y T_e^2 / (2\pi)^2 \quad (1)$$

$$SA_u = \lambda SA_y \quad SD_u = \lambda \mu SD_y \quad (2)$$

em que, Cs é o coeficiente sísmico que corresponde ao valor estimado para a resistência de cálculo a forças horizontais, normalizada pelo peso total dos edifícios de dada tipologia (fracção do peso do edifício), T_e é o período do modo de vibração fundamental dos edifícios de dada tipologia, α_1 é a fracção do peso dos edifícios de dada tipologia que participa no seu modo de vibração fundamental, γ é o factor de sobre-resistência que relaciona a capacidade de cedência real com a capacidade de cálculo, λ é o factor de sobre-resistência que relaciona a capacidade última com a capacidade de cedência e μ é o factor de ductilidade que relaciona o deslocamento último com λ vezes o deslocamento correspondente à cedência.

A metodologia FEMA & NIBS classifica os danos físicos estruturais e não estruturais das tipologias construtivas em quatro estados de dano descritos qualitativamente: *Dano Ligeiro*, *Moderado*, *Severo* e *Total*. Para efeitos de modelação adicionou-se um quinto grau, designado de *Ausência de Dano*, permitindo assim completar a distribuição de probabilidade da variável dano em edifícios. No estado de dano *Dano Total* espera-se que cerca de 10 a 25% dos edifícios colapsem totalmente, enquanto que a parte remanescente espera-se colapse parcialmente.

As curvas de fragilidade, representadas na Fig. 1, assumem, nesta metodologia, a forma de funções de distribuição lognormais (expressão 3) que visam exprimir a probabilidade de uma determinada tipologia se encontrar em, ou exceder um determinado estado de dano, d , dada uma acção sísmica de determinada severidade. Como foi referido, o valor condicional da

ação sísmica é fornecido pelo deslocamento espectral, SD_{max} , correspondente à resposta máxima do edifício atrás referida. Para simplificar a formulação matemática desta secção omite-se o sufixo *max* na variável deslocamento espectral, ou seja, $SD_{max} \equiv SD$.

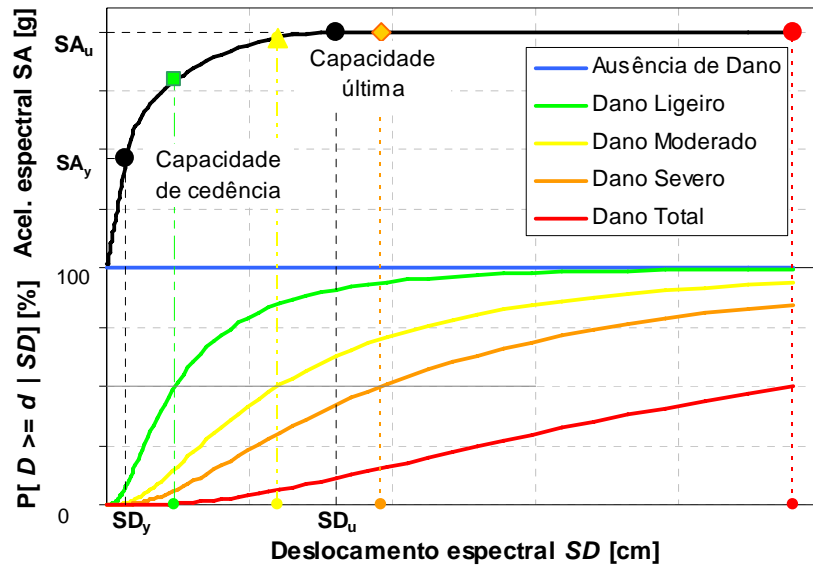


Figura 1. Exemplo de curva de capacidade (em cima a preto) e de curvas de fragilidade para 5 estados de dano.

$$P_D(D \geq d | SD) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_d} \ln \left(\frac{SD}{SD_d} \right) \right] \quad (3)$$

em que, Φ , representa a função cumulativa de uma distribuição Gaussiana reduzida, $\overline{SD_d}$, é o valor mediano do deslocamento espectral para o qual o edifício representativo de dada tipologia tipo atinge o limiar do estado de dano d ; β_d , representa o desvio padrão do logaritmo neperiano do deslocamento espectral para o estado de dano d . Para as componentes estruturais dos edifícios, o valor mediano de uma curva de fragilidade para um estado de dano d , é estimado a partir do deslocamento relativo entre pisos correspondente ao limiar desse estado de dano, sendo convertido em deslocamento espectral por:

$$\overline{SD_d} = \delta_d \alpha_2 h \quad (4)$$

em que, δ_d , representa o coeficiente de deslocamento relativo entre pisos correspondente ao estado de dano d . Na metodologia FEMA & NIBS os valores de defeito deste coeficiente são diferentes para cada tipologia estrutural e variam com o nível de dimensionamento sísmico, α_2 , é a fracção da altura dos edifícios de dada tipologia que participa no seu modo de

vibração fundamental, h , representa a altura média dos edifícios pertencentes a uma dada tipologia construtiva.

As curvas de fragilidade são assim funções que distribuem um conjunto de edifícios pertencentes a uma dada tipologia por cinco estados de dano, conhecida a severidade da acção sísmica [3]. Neste contexto, procede-se à diferenciação das distribuições de probabilidade cumulativas condicionais $P_D(D < d | SD)$ para se obter, de forma aproximada, a probabilidades de uma dada tipologia se encontrar num determinado estado de dano, em que $d = 0$ corresponde ao estado *Ausência de Dano* e $d = ND$ corresponde ao estado *Dano Total*. Em estudos de risco sísmico a função massa de probabilidade da variável aleatória dano, D , condicionada pela acção sísmica de severidade SD , válida para uma dada tipologia construtiva com vulnerabilidade V , é vulgarmente descrita por uma matriz de probabilidade de dano, MPD , definida por:

$$P_D(D=d | SD) = \begin{cases} 1 - P_D(D \geq d+1 | SD) \\ P_D(D \geq d | SD) - P_D(D \geq d+1 | SD) \\ P_D(D = ND | SD) \end{cases} \quad (5)$$

Dependendo do tipo de método de avaliação da vulnerabilidade sísmica escolhido, os valores das probabilidades da expressão anterior são obtidos pelo processamento da informação sobre levantamentos de danos pós sismo e/ou pelo recurso à opinião de especialistas, ou ainda como resultados de modelos analíticos de análise estrutural, etc. O conceito de uma matriz de probabilidade de dano está associado à ideia de que os edifícios pertencentes a uma dada tipologia estrutural têm a mesma probabilidade de se encontrar num determinado estado de dano, face ao mesmo nível de acção sísmica.

2.2 Modelação de perdas

Para se obter uma estimativa das perdas económicas devidas aos danos dos edifícios, associou-se um custo de reparação a cada estado de dano, utilizando a grandeza adimensional *factor de dano*, DF_d , definida como a razão entre o custo de reparação de um edifício, num determinado estado de dano, e o valor global de reposição do edifício. Adoptaram-se os factores de dano propostos por [3] que correspondem a valores de 2, 10, 50 e 100% para os estados de dano *Dano Ligeiro*, *Moderado*, *Severo* e *Total*, respectivamente.

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

dano e que pertencem a uma determinada classe de vulnerabilidade, conforme a seguir se equaciona:

$$E(L|h) = Ne_T \cdot \sum_d \sum_v A_v \cdot DR_d \cdot P_D(D=d|h) \cdot P_V(V=v) \quad (6)$$

em que, Ne_T é o número total de edifícios na região em análise, A_v , representa a superfície média dos edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade v 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 dos edifícios da região em análise pertencerem à tipologia com vulnerabilidade V , assumida igual à frequência das classes de vulnerabilidade nessa região.

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

$$E = Ne_T \times \sum_v A_v \quad (7)$$

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

Finalmente, refira-se que o LNECloss avalia as perdas humanas tendo em consideração os danos por classe de vulnerabilidade e o número de ocupantes por tipologia. Mais detalhes sobre os métodos de avaliação de perdas humanas integrados no Simulador podem ser encontrados em [5].

A estimativa de perdas humanas que irão ser realizadas assumem que os indivíduos presentes na região afectada pelo cenário sísmico se encontram todos na sua habitação, o que, de uma forma simplificada, obriga à suposição de que o cenário sísmico ocorre durante um período nocturno.

2.3 Modelação de estratégias de reabilitação sísmica

Em termos gerais, qualquer sistema estrutural pode ser reabilitado do ponto de vista sísmico, se melhorarmos a sua capacidade para resistir a forças horizontais, ou seja, se aumentarmos a sua capacidade resistente, ou se melhorarmos a sua capacidade de sofrer deslocamentos crescentes sem colapsar, ou seja, se aumentarmos a sua capacidade dúctil [6]. Ambas as abordagens foram consideradas neste estudo, reflectindo-se, no que toca à

implementação prática no Simulador LNECloss: (i) por factores de sobre-resistência mais elevados entre os parâmetros que definem as curvas de capacidade (λ e γ) e/ou (ii) por valores medianos do deslocamento espectral $\overline{SD_d}$ mais elevados, que decorrem do aumento do deslocamento relativo entre pisos, correspondente a um estado de dano d , ou seja, de δ_d .

No quadro 1 listam-se as intervenções de reabilitação simuladas.

Quadro 1. Parâmetros adoptados para a reabilitação [7].

Str #	Alvenaria		Aumento da capacidade resistente		Aumento da capacidade dúctil	Str #	Alvenaria		Aumento da capacidade resistente		Aumento da capacidade dúctil
	BA	Alvenaria	λ	γ	δ_d		BA	Alvenaria	λ	γ	δ_d
1	✓	✓	-	25%	25%	7	✓	✓	-	75%	50%
2	✓	✓	-	50%	25%	8	✓	✓	75%	75%	50%
3	✓	✓	-	75%	25%	9		✓	-	25%	75%
4	✓	✓	75%	75%	25%	10		✓	-	50%	75%
5	✓	✓	-	25%	50%	11		✓	-	75%	75%
6	✓	✓	-	50%	50%	12		✓	75%	75%	75%

Os critérios que estão na base da selecção destes valores são os seguintes:

- No caso das estruturas de alvenaria o reforço sísmico é realizado, em geral, à custa da melhoria da sua capacidade de resistir a forças horizontais e não tanto da melhoria da sua capacidade dúctil. Por isso, aumentou-se δ_d no máximo em 50% e as estratégias 9 a 12, correspondentes a aumentos mais substanciais da capacidade dúctil, apenas foram aplicadas a estruturas de Betão Armado. Deste modo, as intervenções em estruturas de betão armado designadas de Str #9, Str #10, Str #11 e Str #12 serão combinadas com as intervenções em estruturas de alvenaria designadas de Str #5, Str #6, Str #7 e Str #8.
- Considera-se que não é viável aumentar a capacidade de uma estrutura resistir a forças horizontais sem aumentar a sua capacidade dúctil, pelo que o valor mínimo assumido para o aumento da capacidade dúctil é de 25%, independentemente da tipologia em causa.
- O aumento da capacidade resistente última SA_u foi limitado superiormente por um factor de 3 (1.75×1.75).

3. EXPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS EM RISCO

Na Fig. 2 apresenta-se a localização geográfica da região estudada, a Área Metropolitana de Lisboa e concelhos limítrofes (AML) bem como as suas estatísticas globais relativamente ao número de habitantes, edifícios habitacionais, importância económica, etc.

Os elementos em risco, que constituem dados de entrada para o Simulador, encontram-se armazenados em Bases de Dados que incluem a informação apurada nos Censos 2001 [8] sobre o edificado habitacional e seus ocupantes e que se encontra referenciada geograficamente. A análise da informação constante dos Censos 2001, efectuada com a desagregação geográfica da freguesia da AML, permitiu 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 o número de indivíduos que reside neste parque habitacional.

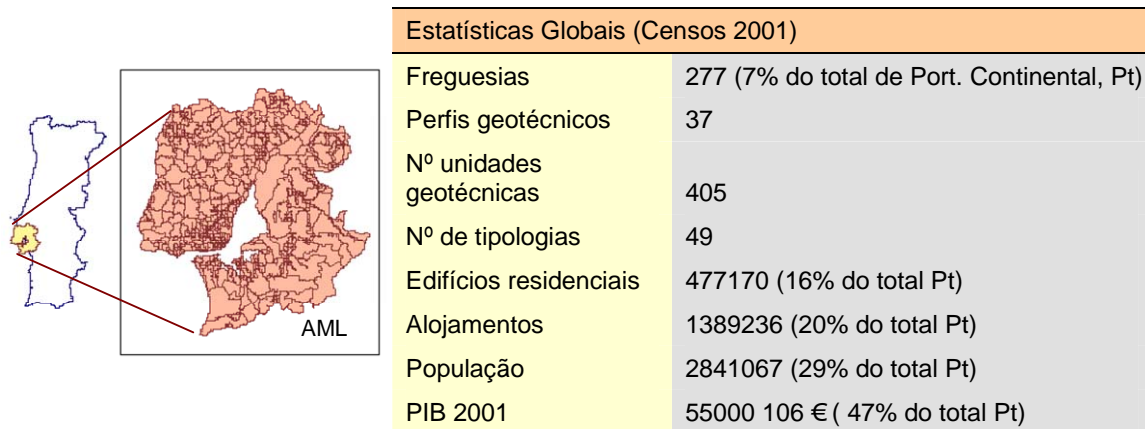


Figura 2. Localização geográfica da AML e estatísticas respectivas [7].

No entanto, para realçar eventuais correlações existentes entre tipologias construtivas e danos e perdas as 315 tipologias apuradas foram agrupadas em 7 classes de vulnerabilidade, cada uma delas subdividida em outras 7 correspondentes ao número de pisos, ou seja num total de 49 tipologias. Importa sublinhar que o Simulador LNECloss continua a operar com as 315 tipologias originais, e que a agregação referida apenas foi necessária para o efeito de análise dos resultados. Assim foram consideradas 4 classes de vulnerabilidade de edifícios de alvenaria e 3 de betão armado conforme se especifica no quadro 2.

Por outro lado, é sabido que a presença de formações superficiais induz alteração das características da propagação do movimento sísmico, produzindo a amplificação ou de-amplificação espectral do mesmo, o que poderá ter influência sobre os danos em determinadas tipologias construtivas. Assim, o Simulador considera o efeito de formações superficiais reproduzindo a solução adoptada no programa SHAKE91, recorrendo, no entanto, a uma abordagem estocástica [4 e 9] para efectuar a estimativa dos valores

máximos da resposta ao longo do tempo, seguindo uma metodologia idêntica à da avaliação da resposta máxima das estruturas

Na região da AML foi possível identificar 37 perfis geotécnicos principais [4]. Porém, tal como foi efectuado na classificação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios, para efeitos de análise de resultados e para enfatizar a correlação entre o tipo de terreno e eventuais danos e perdas, os 37 perfis originais foram agrupados em três classes mais abrangentes. Essas classes foram traçadas em função da velocidade média de propagação das ondas de corte, v_s , nos primeiros 30 metros de profundidade, ou seja, na primeira classe estamos perante terrenos correspondentes a afloramentos rochosos ou solos rijos, com $v_s > 350$ m/s, segue-se uma classe intermédia em que $v_s > 200$ m/s, mas $v_s < 350$ m/s e uma classe correspondente a solo mole com $v_s < 200$ m/s.

No quadro 2 apresenta-se a distribuição dos elementos em risco pelas classes de vulnerabilidade e de tipo de terreno atrás descritas. Note-se que os elementos pertencentes à classe de vulnerabilidade *BA 1961-85* são aqueles que apresentam maior exposição na AML, independentemente do tipo de terreno.

Quadro 2. População, edifícios e área total dos edifícios da AML por classes de vulnerabilidade e de tipo de terreno.

Tipo terreno		ATAPS	Alv, ≤ 1960	Alv, 1961-85	Alv, 1986-01	BA ≤ 1960	BA 1961-85	BA 1986-01	Total
População	Rijo	59 712 (2,1 %)	111 830 (3,9%)	156 982 (5,5 %)	59 405 (2,1 %)	106 484 (3,7 %)	661 860 (23,3 %)	426 200 (15,0%)	1 582 474 (55,7 %)
	Interm.	34 142 (1,2 %)	96 879 (3,4 %)	89 418 (3,1 %)	37 892 (1,3 %)	97 031 (3,4 %)	374 806 (13,2 %)	196 818 (6,9 %)	926 988 (32,6 %)
	Mole	16 788 (0,6 %)	29 965 (1,1 %)	38 874 (1,4 %)	21 050 (0,7 %)	23 464 (0,8 %)	122 190 (4,3 %)	79 274 (2,8 %)	33 1605 (11,7 %)
	Total	110 642 (3,9 %)	238 674 (8,4 %)	285 275 (10,0%)	118 347 (4,2 %)	226 980 (8,0 %)	1 158 856 (40,8 %)	702 293 (24,7%)	2 841 067 (100 %)
Edifícios	Rijo	25 488 (5,3 %)	33 665 (7,1%)	48 750 (10,2 %)	20 352 (4,3 %)	14 470 (3,0 %)	70 757 (14,8 %)	42 566 (8,9 %)	256 048 (53,7 %)
	Interm.	9 808 (2,1 %)	20 623 (4,3 %)	28 305 (5,9 %)	13 437 (2,8 %)	11 487 (2,4 %)	42 078 (8,8 %)	28 939 (6,1 %)	154 677 (32,4 %)
	Mole	7 464 (1,6 %)	10 227 (2,1 %)	13 082 (2,7 %)	7 196 (1,5 %)	3 712 (0,8 %)	14 660 (3,1 %)	10 105 (2,1 %)	66 445 (13,2 %)
	Total	42 760 (9,0 %)	64 515 (13,5 %)	90 137 (18,9 %)	40 985 (8,6 %)	29 669 (6,2 %)	127 494 (26,7 %)	81 610 (17,1 %)	477 170 (100 %)
Área total [m ² × 10 ⁶]	Rijo	8 (3,5 %)	12 (5,2%)	16 (6,9 %)	7 (3,1 %)	8 (3,6 %)	45 (19,0 %)	30 (12,7%)	128 (53,9 %)
	Interm.	4 (1,8 %)	10 (4,2 %)	9 (3,8 %)	5 (2,1 %)	8 (3,4 %)	26 (10,9 %)	18 (7,4 %)	80 (33,6 %)
	Mole	3 (1,1 %)	4 (1,5 %)	4 (1,6 %)	2 (1,0 %)	2 (0,9 %)	9 (3,6 %)	7 (2,8 %)	30 (12,5 %)
	Total	15 (6,3 %)	26 (10,9%)	29 (12,4%)	15 (6,3 %)	19 (7,8 %)	80 (33,5 %)	54 (22,9%)	238 (100 %)

Para caracterizar a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da AML foi necessário definir, para cada uma da 49 tipologias identificadas uma curva de capacidade e 5 curvas de fragilidade. Detalhes relativos a essa caracterização da vulnerabilidade podem ser encontrados em [10].

4. AVALIAÇÃO DAS PERDAS PARA UMA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA

Avaliaram-se as perdas na AML para uma situação de referência, anterior à implementação das acções de mitigação no Simulador e que corresponde à a situação existente no terreno, à data dos Censos 2001. Simulou-se o impacto de um sismo afastado, com um nível de acção compatível com um período de retorno de 475 anos [10] (Fig. 3), que actuou sobre o parque habitacional da AML e os seus ocupantes.

Analisaram-se os resultados em termos de perdas humanas e económicas para determinar quais as combinações de classes de vulnerabilidade e tipos de terreno que eram responsáveis pelas maiores perdas na AML (quadro 3). Neste quadro assinala-se, em cada linha, a **negrito** a classe de vulnerabilidade em que se verificam perdas de valores mais elevados.

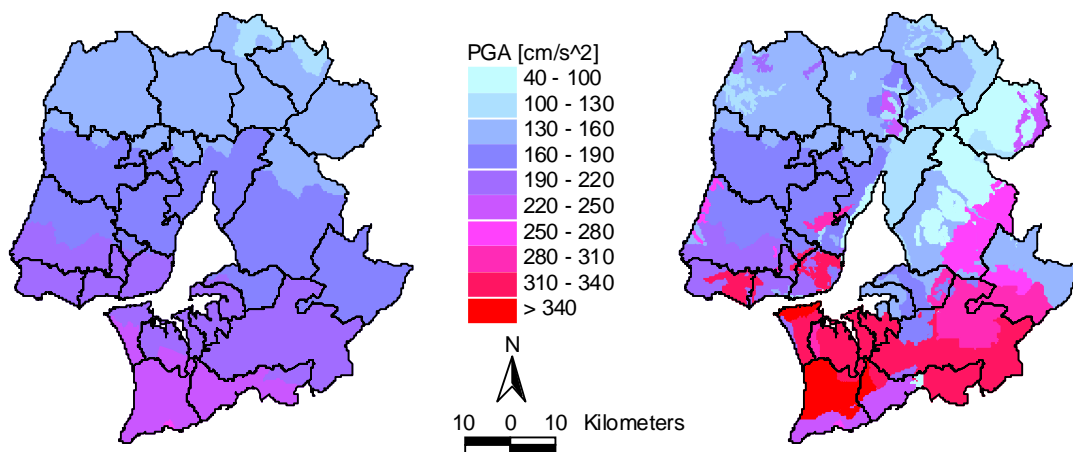


Figura 3. Aceleração de pico (PGA) nas freguesias da AML e concelhos limítrofes, para um cenário de acção sísmica com 475 anos de período de retorno. Esquerda: aceleração no substrato rochoso; direita: aceleração à superfície [10].

Quadro 3. Número de mortos, edifícios no estado de dano *Dano Total* e área perdida, por classe de vulnerabilidade e tipo de terreno, em consequência do cenário de acção sísmica com o período de retorno de 475 anos.

	Tipo terreno	ATAPS	Alv. ≤ 1960	Alv. 1961-85	Alv. 1986-01	BA ≤ 1960	BA 1961-85	BA 1986-01	Total
Número de mortos	Rijo	54 (20,0 %)	10 (3,7%)	10 (3,7 %)	2 (0,8 %)	1 (0,3 %)	2 (0,8 %)	1 (0,5 %)	80 (29,8%)
	Interm.	67 (24,9 %)	27 (9,9 %)	31 (11,6 %)	8 (3,1 %)	4 (1,3 %)	8 (2,9 %)	5 (1,7 %)	149 (55,4%)
	Mole	21 (7,9 %)	7 (2,5 %)	5 (1,7 %)	2 (0,6 %)	1 (0,4 %)	3 (1,1 %)	2 (0,7 %)	40 (14,8%)
	Total	142 (52,8 %)	43 (16,1 %)	46 (16,9 %)	12 (4,5 %)	6 (2,0 %)	13 (4,8 %)	8 (2,9 %)	269 (100 %)
Edifícios no estado de dano <i>Dano Total</i>	Rijo	2032 (10,9 %)	817 (4,4%)	922 (4,9 %)	196 (1,1 %)	37 (0,2 %)	102 (0,6 %)	64 (0,3 %)	4169 (22,3 %)
	Interm.	2379 (12,8 %)	2691 (14,4 %)	4221 (22,6 %)	1291 (6,9 %)	396 (2,1 %)	1005 (5,4 %)	737 (4,0 %)	12 721 (68,2 %)
	Mole	610 (3,3 %)	323 (1,7 %)	310 (1,7 %)	129 (0,7 %)	35 (0,2 %)	196 (1,1 %)	166 (0,9 %)	1769 (9,5 %)
	Total	5021 (26,9 %)	3831 (20,5 %)	5453 (29,2 %)	1616 (8,7 %)	468 (2,5 %)	1304 (7,0 %)	967 (5,2 %)	18 660 (100 %)
Área perdida [10 ⁶ m ²]	Rijo	1,5 (7,1 %)	1,2 (5,7%)	1,4 (6,2 %)	0,5 (2,3 %)	0,3 (1,5 %)	1,5 (7,0 %)	1,0 (4,9 %)	7,5 (34,7%)
	Interm.	1,4 (6,4 %)	2,1 (9,9 %)	2,4 (11,1 %)	1,1 (5,1 %)	0,7 (3,4 %)	2,1 (9,7 %)	1,5 (7,1 %)	11,4 (52,7%)
	Mole	0,5 (2,2 %)	0,5 (2,1 %)	0,3 (1,5 %)	0,2 (0,8 %)	0,2 (0,7 %)	0,6 (2,9 %)	0,5 (2,4 %)	2,7 (12,6%)
	Total	3,4 (15,7 %)	3,8 (17,6 %)	4,1 (19,0 %)	1,8 (8,3 %)	1,2 (5,6 %)	4,2 (19,4 %)	3,1 (14,4 %)	21,6 (100 %)

As perdas elevadas nas classes de vulnerabilidade atrás mencionadas são consequência da:

1. vulnerabilidade elevada de algumas dessas tipologias, por exemplo, os edifícios de adobe taipa ou alvenaria de pedra solta que causam perdas humanas significativas;
2. a exposição elevada de algumas dessas classes de vulnerabilidade, por exemplo, os edifícios de betão armado construídos entre 1960 e 1985, em terrenos do tipo intermédio, que representam cerca de 9% dos edifícios da AML.
3. A influência das formações superficiais sobre a propagação do movimento sísmico, nomeadamente a sua amplificação nos terrenos classificados como do tipo intermédio.

A Fig. 4 ilustra a desagregação das perdas económicas, por estados de dano, para o cenário da acção sísmica referido. As perdas, por estado de dano, são medidas em termos da área perdida nos edifícios danificados sendo posteriormente ponderadas pelos factores de dano correspondentes a cada estado. Os resultados são ainda desagregados por grandes classes de estruturas: alvenaria ou betão armado. Da análise da Fig. 4 é possível concluir que as perdas económicas são dominadas pelos edifícios severamente danificados.

Em particular, para os edifícios de betão armado as perdas nos edifícios que se encontram nos estados de dano *Dano Moderado* e *Severo* representam uma contribuição significativa para a perda económica global.

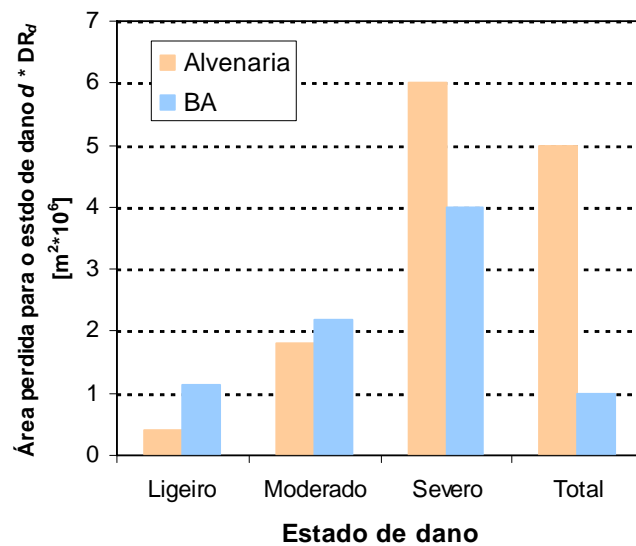


Figura 4. Desagregação das perdas económicas, por estado de dano e tipo de estrutura, para um cenário de acção sísmica com 475 anos de período de retorno. As perdas encontram-se multiplicadas pelos factores de dano.

5. AVALIAÇÃO DAS PERDAS APÓS INTERVENÇÕES DE MITIGAÇÃO

No quadro 4 apresentam-se os resultados da simulação de 12 intervenções de mitigação sobre o parque habitacional da AML, considerando uma acção sísmica correspondente a um período de retorno de 475 anos. A mitigação é traduzida pelos respectivos benefícios que são definidos, em termos percentuais, como a diferença entre as perdas simuladas para a situação de referência e as perdas simuladas após as intervenções, sendo essa diferença normalizada pela primeira estimativa.

Quadro 4. Impacto das estratégias de mitigação.

Intervenção de Mitigação	Melhoria da capacidade		Tipo de estrutura	Mortos (noite)		Edifícios colapsados (total e parcialmente)		Área perdida	
	Resist.	Dúctil		Mitigação	Perdas	Mitigação	Perdas	Mitigação	Perdas
				[%]	[#]	[%]	[#]	[%]	[m ² × 10 ⁶]
Referência	1	1	Alvenaria BA	0	243	0	15921	0	13,1
				0	26	0	2739	0	8,5
Str.#1	1,25	1,25	Alvenaria	37,1	153	36,7	10080	28,4	9,4
			BA	49,1	13	48,6	1409	31,4	5,9
Str.#2	1,50		Alvenaria	40,4	145	40,2	9526	31,1	9,0
			BA	50,5	13	55,9	1208	31,4	5,9
Str.#3	1,75		Alvenaria	42,4	140	42,3	9183	32,7	8,8
			BA	50,9	13	60,0	1096	31,3	5,9
Str.#4	3,06		Alvenaria	56,6	105	67,0	5255	47,0	6,9
			BA	48,4	14	66,6	915	28,4	6,1
Str.#5	1,25	1,50	Alvenaria	54,1	112	53,5	7405	43,3	7,4
			BA	71,7	7	69,1	846	51,2	4,2
Str.#6	1,50		Alvenaria	56,6	105	56,1	6987	45,5	7,1
			BA	73,0	7	74,0	711	51,3	4,2
Str.#7	1,75		Alvenaria	58,1	102	57,7	6728	46,8	7,0
			BA	73,4	7	76,7	639	51,3	4,2
Str.#8	3,06		Alvenaria	69,0	75	76,7	3713	58,8	5,4
			BA	72,0	7	80,9	523	49,3	4,3
Str.#9	1,25	1,75	BA	83,6	4	80,4	536	53,8	6,0
Str.#10	1,50		BA	84,4	4	83,8	444	63,9	3,1
Str.#11	1,75		BA	84,8	4	85,5	396	55,7	5,8
Str.#12	3,06		BA	84,4	4	88,4	319	64,1	3,1

A análise deste quadro permite concluir que:

1. A melhoria da capacidade dúctil desempenha um papel mais importante nos benefícios da mitigação do que o aumento da capacidade de resistir a forças horizontais. Esta conclusão decorre de se verificar uma redução de perdas muito mais acentuada quando se mantêm a resistência e aumenta a capacidade dúctil (eg. transição da intervenção *Str#1* para a *Str#5*), do que quando se mantem a

capacidade dúctil e aumenta a resistência (eg. transição da intervenção *Str #1* para a *Str #2*).

2. A reabilitação dos edifícios de betão armado resulta, em geral, em benefícios (mitigação) mais elevados do que a reabilitação dos edifícios de alvenaria. Quando os benefícios são medidos em termos económicos são excepção as intervenções em que a capacidade resistente dos edifícios de alvenaria é melhorada até valores muito elevados (*Str #3*, *Str #4*, *Str 8*). Quando os benefícios são medidos em termos de edifícios colapsados ou em termos de perdas humanas é excepção a intervenção *Str #4*, em que a capacidade resistente dos edifícios de alvenaria é melhorada até ao máximo considerado.
3. Como seria de esperar os benefícios mínimos foram obtidos na sequência da aplicação da intervenção *Str #1* tanto a edifícios de alvenaria como de Betão Armado. Por outro lado, a intervenção *Str #8* aplicada a edifícios de alvenaria e à intervenção *Str #12* aplicada a edifícios de Betão Armado é aquela que apresenta benefícios mais elevados. Obviamente isto resulta de tanto a capacidade dúctil como a capacidade resistente serem melhoradas para até ao limite máximo considerado, sem se ter em conta os custos da intervenção.

Na ausência de um critério que permita escolher uma intervenção óptima, tal como um critério de custo-benefício, ou de custo por vida salva, apresentam-se, no quadro 5, os valores mínimos e máximos de toda a gama de intervenções simuladas.

Quadro 5. Síntese do impacto das intervenções simuladas.

Indicador de impacto	Cenário de referência	Depois da mitigação	Benefícios
Mortos (noite)	269 (0,0095%)	79 (0,0028%) a 166 (0,0058%)	38% a 71%
Edifícios colapsados	18 660 (3,9%)	4 032 (0,8%) a 11 489 (2,4%)	38% a 78%
Área perdida [m ² × 10 ⁶]	21,6 (9,1%)	8,6 (3,6%) a 15,2 (6,4%)	30% a 60%

*as percentagens entre parêntesis representam as perdas normalizadas pelo total das existências da AML.

6. CONCLUSÕES

Simularam-se 12 medidas de intervenção conceptuais conducentes a melhorar a capacidade resistente e a capacidade dúctil das estruturas dos edifícios do parque habitacional da Área Metropolitana de Lisboa. O limiar inferior das medidas de intervenção simuladas correspondeu a um aumento de 25% da capacidade resistente e dúctil dos edifícios de alvenaria e de betão armado (*Str. #1*). O limiar superior dessas medidas correspondeu a um aumento de (i) 200% da capacidade resistente dos edifícios de alvenaria e de 50% da capacidade dúctil desses mesmos edifícios (*Str.# 8*) e de (ii) 200% da capacidade resistente dos edifícios de betão armado e de 75% capacidade dúctil desses

mesmos edifícios (Str. #12). As simulações foram efectuadas para um cenário da acção sísmica correspondente a um período de retorno de 475 anos

As principais conclusões obtidas são as seguintes:

1. as perdas económicas são dominadas pelos danos em edifícios severamente danificados. Acresce que nos edifícios de betão armado, aqueles que mais contribuem para as perdas globais encontram-se nos estados de dano *Dano Moderado* e *Severo* enquanto que nos edifícios de alvenaria encontram-se nos estados de dano *Dano Severo* e *Total*.
2. Na ausência de um critério para seleccionar a intervenção óptima o limiar superior das intervenções plausíveis (a opção de mitigação 2), Str #12 nos edifícios com estrutura de betão armado e Str #8 nos edifícios de alvenaria, corresponde, obviamente, aos maiores benefícios. Contudo, estas intervenções terão certamente custos excessivos de implementação.
3. A melhoria da capacidade dúctil dos edifícios contribui de uma forma mais importante para aumentar os benefícios da mitigação do que a melhoria da sua capacidade resistente.
4. A reabilitação dos edifícios de betão armado resulta, em geral, em benefícios mais elevados do que a reabilitação dos edifícios de alvenaria.

Acções de mitigação globais sobre as classes de vulnerabilidade mais fracas representam intervenções num número muito elevado de edifícios, pelo que um programa realista de mitigação deveria ser ensaiado numa pequena região, tal como uma freguesia de Lisboa. A escolha de uma freguesia piloto deverá ser baseada em critérios adicionais que tenham em conta, por exemplo, o estado de conservação dos edifícios ou permitam identificar uma estratégia óptima fundamentada, nomeadamente, numa análise de custo benefício ou de custo eficácia. Este tipo de critérios não foi tido em conta neste trabalho.

Como nota final, importa ressaltar que o estudo foi efectuado para um cenário de acção sísmica com 475 anos de período de retorno e que outras conclusões podem ser retiradas de curvas de risco que contemplem uma gama mais vasta de probabilidades de excedência, tal como foi realizado por [7]. Conclusões adicionais poderão ainda ser retiradas das estimativas dos valores esperados das perdas [5] e da sua variância.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto LESSLOSS *Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides* do 6º PQ Europeu, GOCE-CT-2003-505448.

Agradece-se a toda a equipa do projecto LESSLOSS que contribuiu para a realização deste trabalho. Agradece-se à Dra. Anabela Martins o auxílio prestado no processamento da informação, elaboração de elementos gráficos e formatação do texto do artigo.

7. REFERÊNCIAS

- [1] <http://www.lessloss.org/>, "Official web site of the Integrated R&D Project of the EC "LessLoss - Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides", consultado a 15 de Março de 2010.
- [2] ATC & SSC – "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings". Relatório nº SSC 96 01, Applied Technology Council, ATC 40, 1996, Redwood City, Califórnia.
- [3] FEMA & NIBS – "Earthquake loss estimation methodology – HAZUS 99". Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, 1999, Washington DC.
- [4] Carvalho, 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 276/99 — C3ES, LNEC, 1999, Lisboa.
- [5] Sousa, M.L. - *Risco sísmico em Portugal Continental*. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, 2006, 338 p.
- [6] Pinho, R. – *Selective retrofitting of RC structures in seismic areas*. Tese de Doutoramento, Imperial College, University of London, 2001.
- [7] Campos Costa 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 (BEE)*, vol. 8, 2010, pp. 119–134.
- [8] INE – "Recenseamento da População e da Habitação (Portugal) - Censos 2001". Instituto Nacional de Estatística, 2002. Lisboa.
- [9] Sousa et al. – "Simulação de cenários sísmicos no Algarve". *III Encontro Nacional de Risco Segurança e Fiabilidade*, pp. 227-242, Instituto Superior Técnico, 2009, Lisboa.
- [10] LESSLOSS – "Earthquake Disaster Scenario Prediction and Loss Modelling for Urban Areas". Editor Robin Spence, IUSS Press, 2007, Pavia, Itália, 165p.
- [11] Carvalho, E.C., & Coelho E. – "Seismic assesment strengthening and repair of structures". ECOEST2 and ICONS. Report nº 2, LNEC, 2001, Lisboa.