

AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO DAS INSTALAÇÕES ESCOLARES NA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA. UMA METODOLOGIA BASEADA NA EMS 98.

**MÓNICA
AMARAL
FERREIRA**
Estudante
Doutoramento
ICIST/IST
Lisboa-Portugal

**JORGE MIGUEL
PROENÇA**
Prof. Auxiliar
ICIST/IST
Lisboa-Portugal

**CARLOS SOUSA
OLIVEIRA**
Prof. Catedrático
ICIST/IST
Lisboa-Portugal

**ANTON
ANDONOV**
Bolseiro
Investigação
ICIST/IST
Lisboa-Portugal

SUMÁRIO

O presente artigo apresenta a metodologia desenvolvida para a avaliação do risco sísmico das instalações escolares existentes na Área Metropolitana de Lisboa (AML), nomeadamente das Escolas Básicas dos 2º e 3º ciclos e das Escolas Secundárias. Face ao elevado número de instalações escolares existentes na AML decidiu circunscrever-se o estudo a um sub-conjunto de 211 instalações representativas existentes em 13 dos concelhos da AML.

A metodologia adoptada baseia-se no trabalho realizado por Giovinazzi e Lagomarsino com recurso à escala macrosísmica europeia (EMS 98). A intensidade considerada no procedimento original da metodologia de Giovinazzi e Lagomarsino foi determinada considerando o valor máximo da aceleração nas instalações escolares, tendo em conta o tipo de terreno e sismicidade do sítio, valor esse determinado considerando um período de retorno de 475 anos agravado por um factor de importância de 1,2. A metodologia original foi adaptada mediante a consideração de novas tipologias (correspondentes ao parque existente das construções escolares na AML) e inclusão de factores de agravamento (ou desagravamento) determinados mediante o trabalho de campo realizado. Esse trabalho de campo deu origem a uma ficha de avaliação que é também apresentada. Esta metodologia, dita de *avaliação generalizada* do risco sísmico, foi posteriormente aferida tendo em conta os resultados da avaliação, dita *discriminada*, do risco sísmico da Escola D. Luísa de Gusmão, em Lisboa. A análise da Escola D. Luísa de Gusmão recorreu a modelos de análise não linear com a consideração explícita do comportamento das paredes de alvenaria.

1. INTRODUÇÃO

Existe a percepção generalizada de que poderá ser inaceitavelmente elevado o risco sísmico existente nas instalações escolares nas zonas de maior sismicidade do país. Efectivamente, caso ocorra um sismo durante o período de aulas, os alunos poderão ficar sujeitos à queda de objectos, de elementos construtivos não estruturais, de equipamentos, podendo mesmo em alguns casos verificar-se o colapso do edifício com as consequentes perdas de vidas humanas. Mesmo que o sismo ocorra fora do calendário escolar, os possivelmente elevados danos nas instalações escolares poderão originar o encerramento dessas instalações, provocando uma perturbação irreversível no sistema escolar da região afectada.

Recorde-se para o efeito que as instalações escolares apresentam, genericamente, um risco sísmico acrescido em consequência dos seguintes factores:

- São instalações que apresentam uma elevada taxa de ocupação humana. Recorde-se ainda que os ocupantes das mesmas instalações apresentam uma esperança média de vida superior à média geral.

- As instalações escolares desempenham uma função social relevante, por via da instrução e educação dos alunos. Esta função social surge acrescida após a ocorrência de sismos intensos pois estas instalações podem servir de abrigo e de centros de coordenação local das operações de busca e salvamento.
- As instalações escolares apresentam um valor material significativo, nomeadamente no seu conteúdo, por meio dos equipamentos (laboratórios e sistemas mecânicos) e das suas instalações básicas.

Face a todas estas considerações a Secretaria-Geral do Ministério da Educação decidiu promover o Estudo Piloto do Programa de Redução do Risco Sísmico das Instalações Escolares, PRRSIE/EP. À data, os estudos realizados no âmbito deste Programa consistiram na avaliação generalizada de um universo de 211 estabelecimentos de ensino existentes na AML, ao que se seguiu a avaliação discriminada de uma das instalações escolares considerada representativa – a Escola Secundária com 3.º Ciclo do Ensino Básico de D. Luísa de Gusmão –.

2. SISMOS E DANOS EM INSTALAÇÕES ESCOLARES

Danos e colapso de instalações escolares podem ser encontrados em quase todos os sismos mundiais mais significativos, demonstrando, dessa forma, o risco sísmico potencialmente exibido por algumas dessas construções. O risco sísmico acrescido pode resultar de alguns factores agravantes como sejam o efeito do meio de fundação (e de sítio), a tipologia estrutural inapropriada, a má qualidade dos materiais estruturais, o deficiente estado de conservação e ainda o nível de protecção sísmica inadequado considerado no projecto.

Apresenta-se de seguida algumas das ocorrências sísmica mais recentes e os danos provocados nas instalações escolares existentes nas zonas mais directamente afectadas.

O terramoto de 31 de Outubro de 2002 que atingiu Molise (Itália), causou o colapso da escola primária Francesco Jovine, em San Giuliano di Puglia, provocando a morte a 27 crianças e uma professora. O sismo de magnitude 5.4 e intensidade máxima de VIII vitimou um total de 30 pessoas. Segundo Dolce [1] San Giuliano encontrava-se classificada como zona de reduzida sismicidade, tendo as construções existentes sido projectadas sem preocupações objectivas de comportamento sismo-resistente. Outro factor que contribuiu para o colapso desta estrutura foi a má qualidade do material construtivo (predominantemente alvenaria) e o aumento de massa provocado pela adição de um segundo piso (figs. 1 e 2).



Figura 1: Escola Primária Francesco Jovine.



Figura 2: Efeitos do sismo na escola.
(Fonte: <http://www.poroton.it/user/articoli/n5/crolloscuola.asp>)

O evento de magnitude 6.4 que abalou a província de Bingöl (Turquia) no dia 1 de Maio de 2003, às 03.27 h vitimou 177 pessoas. O colapso mais trágico ocorreu na escola primária de Çeltiksuyu, construída em 1998, em que tanto o edifício escolar como o dormitório colapsaram, provocando a morte a 87 crianças. Quatro escolas ficaram totalmente destruídas, nove tiveram de ser demolidas e onze sofreram danos moderados a severos. Mais de 31000 alunos ficaram sem aulas a partir de 1 de Maio. Os danos que se verificaram justificam-se pela ocorrência de efeitos de sítio, má qualidade dos materiais de construção e projectos inadequados.

Em Portugal os danos ocorridos pelo sismo de 9 de Julho de 1998 (Faial) nos equipamentos escolares foram estruturais e não estruturais (fig. 3). Algumas estruturas recentes de betão armado ficaram danificadas ao nível dos pilares, enquanto que nos edifícios de alvenaria os danos foram geralmente superiores [2]. Não se verificou o

colapso de nenhuma instalação escolar, embora após inspecção do parque [2, 3] se tenha sugerido a demolição de duas escolas.



Figura 3: Escola de Espalhafatos. Separação entre a alvenaria e os elementos de betão armado.
(Fonte: <http://www.oecd.org/dataoecd/43/42/33629167.pdf>)

3. CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE ESCOLAR EXISTENTE NA AML

3.1. Universo dos equipamentos de ensino

O universo dos equipamentos de ensino analisados no PRRSIE é composto por 211 instalações escolares que são tuteladas directamente pelo Ministério da Educação, incluindo as Escolas Básicas do 2º e 3º ciclo e as Escolas Secundárias localizadas em 13 concelhos da AML, nomeadamente: Amadora, Cascais, Lisboa, Loures, Odivelas, Oeiras, Sintra, Alcochete, Almada, Barreiro, Montijo e Seixal.

Das 211 instalações escolares que constituem o universo de estudo, 157 situam-se no distrito de Lisboa e as restantes 54 no distrito de Setúbal. O total de alunos a frequentar essas escolas é de 169745 (dados de 2004).

3.2. Tipologia de projecto de arquitectura

No Ministério da Educação as instalações escolares existentes são comumente referenciadas pela *tipologia do projecto de arquitectura*, tendo dado origem a um conjunto de 25 designações distintas que reflectem sobretudo as diferentes campanhas temporais de construção de escolas. O agrupamento e classificação das instalações escolares de acordo com a tipologia do projecto de arquitectura serviu de base à tipificação dessas instalações, tendo sido complementada por informações que decorrem, directa ou indirectamente, desse facto. Entre essas informações complementares referem-se o período de construção, os materiais estruturais e o sistema estrutural. Procedeu-se ainda a um agrupamento da classificação original do Ministério da Educação, reduzindo o número de classes, inicialmente superior a 20. Nas circunstâncias anteriores as tipologias de projecto de arquitectura mais representativas nos concelhos em análise são as seguintes:

- *Blocos Quadrados* (28m x 28m, 21m x 21m ou “3x3”) – datam de meados dos anos 70 e início dos anos 80. Caracterizam-se por apresentar planta quadrada, 1 ou 2 pisos e estrutura de betão armado.
- *MOP/MOPTC/MOPT* – engloba as construções que aparecem entre 1930 a 1960, anteriormente à obrigatoriedade de consideração da acção sísmica.
- *Tipo “Liceus”* – projecto-tipo de 1968 destinado aos liceus. Blocos de 1 piso e eventualmente 1/2 piso elevado. Estrutura de betão armado dimensionadas com uma acção sísmica inferior.
- *Pré-fabricados* – frequentes na década de 70 e 80. Consideram-se três situações distintas: a) pavilhões de pré-fabricação pesada (estrutura e painéis de parede em betão armado – Novobra, Indubel, etc.); b) pavilhões de pré-fabricação ligeira construídos geralmente em madeira, de um só piso com uma, duas ou mais salas de aula (com estrutura e painéis de parede em madeira, aço ou fibrocimento – Seicla, Casvel, etc.); e c) pavilhões de pré-fabricação mista (conjunto dos dois tipos anteriores - Clasp). Tratam-se de estruturas que apresentarão à priori um desempenho sísmico inferior.

- *Outros* – existem outras tipologias fruto de projectos especiais elaborados especificamente para cada caso e reúne construções do séc. XIX ao séc. XX.

Apresentam-se nas figuras seguintes (figuras 4 a 9) algumas tipologias de projecto referenciadas anteriormente:



Figura 4: Blocos 21x21



Figura 5: Tipo "Liceus"



Figura 6: Projecto Luís Pacheco



Figura 7: Projecto Especial, anterior a 1945



Figura 8: MOP



Figura 9: Projecto Especial posterior a 1945

4. AVALIAÇÃO GENERALIZADA DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DAS INSTALAÇÕES ESCOLARES

4.1. Ficha de avaliação

Foi elaborada uma ficha de caracterização das instalações escolares (fig. 10) que resultou da conjugação de fichas desenvolvidas em trabalhos anteriores pelo Instituto Superior Técnico e pelo Ministério da Educação [4]. A ficha comporta numa primeira parte uma descrição sumária do estabelecimento de ensino, do espaço que engloba o conjunto de edifícios, das condições gerais de evacuação dos edifícios, entre outras informações, e numa segunda parte, que caracteriza o edifício em si no que respeita à época de construção, ao material estrutural

predominante, ao número de pisos, à tipologia de projecto de arquitectura, e outras informações julgadas relevantes.

Ficha de Registo das Características do Conj. Edificado

ESCOLA: _____

1.1. TOPONÍMIA: _____

_____ Data

1.2. Nº ALUNOS

1.3. Nº EDIFÍCIOS

1.4. TOPOGRAFIA DO CAMPUS ESCOLAR

Plano	Acidentado	M ^o . acid.
-------	------------	------------------------

1.5. LOCALIZAÇÃO RELATIVA/ AO AGLOM. URBANO

Perto	Longe
-------	-------

1.6. TIPOLOGIA URBANA

Banda	Isolado
-------	---------

1.7. RISCO EXTERIOR

Des.Taludes	Liquef.	Maremotos
-------------	---------	-----------

1.8. CAPACIDADE OPERACIONAL BOMBEIROS

Boa	Razoável	Má
-----	----------	----

1.9. CONDIÇÕES GERAIS DE EVACUAÇÃO

Boas	Razoáveis	Más
------	-----------	-----

Ficha de Registo das Características do Edifício

2.1. Nº PISOS

2.2. DATA DE CONSTRUÇÃO ANO:

Época:

1- < 1755	4- 1941 - 1958
2- 1755 - 1880	5- 1959 - 1983
3- 1881 - 1940	6- >1983

2.3. MATERIAL PREDOMINANTE

1- Paredes de alvenaria de pedra c/ pavim. de madeira	6- Pré-fabricado misto est. metálica
2- Paredes de alvenaria de pedra c/ pavim. de betão	7- Pré-fabricado ligeiro de madeira
3- Paredes resistentes de betão	8- Pré-fabricado ligeiro metálico
4- Estrutura de betão armado	9- Pré-fabricado ligeiro misto
5- Pré-fabricado pesado de betão	

2.4. TIPOLOGIA PROJ. ARQUIT. _____

2.5. COBERTURA

Telha	Fibrocimento	Terraço
-------	--------------	---------

2.6. REGULARIDADE EM PLANTA

Regular	Intermédia	Irregular
---------	------------	-----------

2.7. RELAÇÃO COMP/LARGURA

Baixa	Média	Alta
-------	-------	------

2.8. CONTRACÇÃO EM PLANTA

$R < 0,5$	$0,5 \leq R < 0,8$	$R \geq 0,8$
-----------	--------------------	--------------

2.9. ÁTRIO OU PÁTIO INTERIOR

$Rap < 0,1$	$0,1 \leq Rap < 0,3$	$Rap \geq 0,3$
-------------	----------------------	----------------

2.10. EXISTÊNCIA DE CAVES

$Ras < 0,5$	$0,5 \leq Ras < 1$	$Ras \geq 1$
-------------	--------------------	--------------

2.11. EXCENTRICIDADE C.MASSA vs C.RIGIDEZ

Baixa/Média	Alta
-------------	------

2.12. REGULARIDADE EM ALTURA

Normal	Irregular
--------	-----------

2.13. RELAÇÃO DE VÃOS

M ^o . aberto	Equilibrado	M ^o . fechado
-------------------------	-------------	--------------------------

2.14. RISCO INTERIOR (Tectos falsos e/ou ilum. suspensa)

S	N
---	---

2.15. ELEMENTOS SALIENTES FORA DO EDIFÍCIO

1- Chaminés na Fachada	4- Aparelhos de Ar Condicionado
2- Vasos ou elem. decorativos	5- Candeiros ilum. Púb.
3- Algeroz	

2.16. ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Bom	Razoável	Mau	Ruína
-----	----------	-----	-------

2.17. ESTADO DE DANOS ESTRUTURAIS

N Det	Pouco Det	Deteriorado
-------	-----------	-------------

Figura 10: Ficha de avaliação das instalações escolares

4.2. Metodologia da avaliação da vulnerabilidade sísmica

A avaliação generalizada da vulnerabilidade sísmica das instalações escolares foi determinada com base em métodos empíricos desenvolvidos por Giovinazzi e Lagomarsino [5, 6] a partir dos conceitos da Escala Macrossísmica Europeia-98 (EMS-98, Grunthal [7]). A escala EMS-98 é referida neste estudo pela qualidade e detalhe com que são definidas as tipologias construtivas e os graus de dano. Esta metodologia permite, numa 1ª

fase associar a cada uma das tipologias construtivas (material de construção) um valor numérico denominado V_i – índice de vulnerabilidade [$0 \leq V_i \leq 1$], o qual é calibrado para reproduzir a informação disponibilizada pela EMS-98 (fig. 11).

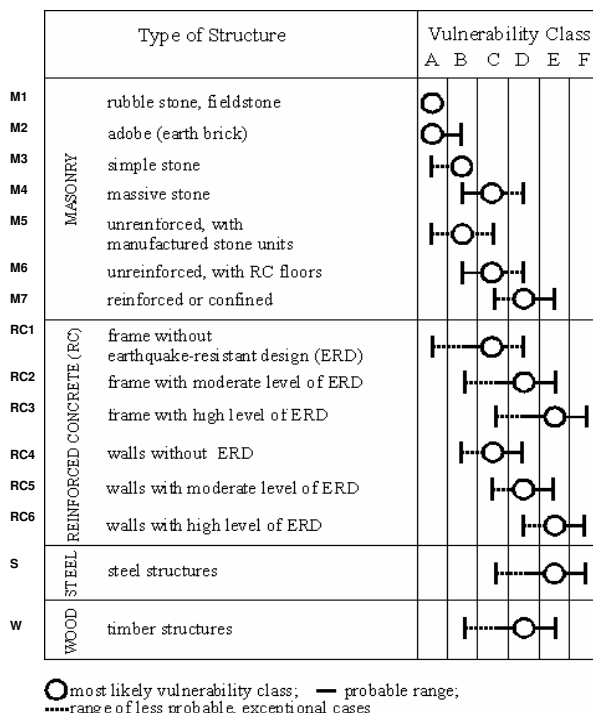


Figura 11: Classes de vulnerabilidade segundo a EMS-98. Classe A - maior vulnerabilidade; Classe F- menor vulnerabilidade.

A identificação de outros factores, como o estado de conservação dos edifícios, o número de pisos, a existência de rés-do-chão vazado, de tectos falsos, etc., auxiliaram na avaliação do comportamento sísmico do edifício e na calibração dos índices de vulnerabilidade, agravando-os ou desagravando-os, tornando o estudo mais aprofundado e, eventualmente calculando o risco edifício a edifício. Desta forma e como o levantamento contemplou a identificação destes factores de agravamento ou desagravamento, foram calculados novos índices de vulnerabilidade consoante a tipologia de projecto e ano de construção, como se demonstra na tabela 1.

Tabela 1 - Classes de vulnerabilidade finais para cada tipologia de projecto arquitectónico

Projecto Arquit.	1881-1940	1941-1958	1958-1970	1970-1983	> 1983
Proj. Especial (séc. XIX)	0,700				
Proj. Especial < 1945	0,616				
Proj. Especial/MOP		0,716	0,669	0,467	0,386
MOP			0,532		
Tipo “Liceus”			0,553	0,454	
Blocos (28mx28m)			0,553		
Conj. Pavilhões Brandão			0,553	0,447	
Pré-fabricados madeira			0,644		
Blocos 3x3 compacto			0,447	0,447	0,373
Pré-fabricado Proclasp				0,573	
Pré-fabricado de betão				0,553	
Blocos (21mx21m)				0,454	0,382
Proj. Luís Pacheco					0,373
Pré-fabricado ligeiro			0,553	0,553	

Na tabela acima apresentam-se os resultados obtidos para os vários tipos de estruturas encontrados neste estudo. É possível descrever uma função de vizinhança, para cada tipologia, como sendo uma função do índice de vulnerabilidade. Para a função de vizinhança de cada tipologia são definidos 5 valores de V_i utilizando um modelo de lógica difusa (*fuzzy set*) e, assim o valor do índice de vulnerabilidade descreve cada uma das categorias construtivas em termos da percentagem que ocupa nas classes A a F da escala EMS-98.

Os valores próximo de 1 (tabela 1) indicam estruturas mais vulneráveis e valores próximos de 0 revelam os menos vulneráveis, ou seja, estruturas que apresentam um melhor comportamento sísmico.

Estes resultados são fruto da análise cuidada das 53 instalações escolares visitadas. Obtidos os valores das vulnerabilidades para estas instalações, atribui-se um valor de vulnerabilidade às restantes que fazem parte do universo de estudo, consoante a tipologia de projecto e ano de construção a que pertencem.

4.2.1. Consideração dos solos

O estudo e conhecimento dos solos onde as construções se localizam são de vital importância para a realização de um trabalho desta índole. Relativamente à influência dos solos de fundação nos efeitos da acção sísmica, adoptou-se no presente estudo a classificação considerada pelo Eurocódigo 8 na sua versão mais recente (prEN 1998-1, 2003, [8]). Esta norma europeia provisória considera genericamente 5 tipos de solos (A a E, do mais rijo ao mais brando), identificados em termos de alguns parâmetros geotécnicos, de que se refere pela importância a velocidade da propagação das ondas de corte. O estudo do risco sísmico das escolas foi realizado para uma acção sísmica correspondente à definida pela regulamentação sísmica. Os valores de a_g considerados são de 2,7 m/s² (sismo tipo 1, *intraplaca*) e a aceleração espectral determinada foi afectada por um factor de importância de 1,2. Esta diferenciação do risco aceitável nas instalações escolares só veio a surgir mais recentemente com a norma europeia provisória prEN 1998-1 [8].

O cálculo de intensidades I (EMS-98) foi obtido a partir das acelerações máximas de acordo com a seguinte expressão (1):

$$I = 0,4254 \cdot (\log(S_a))^3 - 1,496 \cdot (\log(S_a))^2 + 4,1869(\log(S_a)) + 0,1495 - 0,5 \quad (1)$$

sendo, S_a a aceleração espectral (cm/s²).

4.2.2. Grau médio de dano

Com base no índice de vulnerabilidade, V_i é possível calcular as probabilidades de ocorrerem ou de serem excedidos cada um dos diversos graus de danos propostos na EMS-98 (Giovinazzi e Lagomarsino, 2002 e 2003): *negligenciáveis, moderados, severos, muito graves e colapso*.

Com efeito, considerando, tal como proposto por estes autores, ter-se-á que o grau médio de danos é dado pela equação (2):

$$\mu_d = 2,5 \cdot (I + \tanh(I + 6,25 \cdot V_i - 13,1) / 2,3) \quad (2)$$

Em que μ_d simboliza o grau médio de dano esperado, segundo as definições EMS-98 (grau 1=danos negligenciáveis a leves, ..., grau 5=colapso), I é a intensidade e V_i a vulnerabilidade esperada para edifícios de tipologia i .

4.3. Resultados da avaliação generalizada

Da análise do universo das 211 instalações escolares seleccionadas para a realização deste estudo extraem-se algumas ilações que seguidamente se apresentam.

No distrito de Lisboa cerca de 40% das escolas apresentam grau médio de dano 2, ou seja, *danos moderados*, facto que está intimamente relacionado pela localização das estruturas em solos do tipo A (solos rijos) e por pertencerem a construções da década de 80, ou posterior, com projecto sismo-resistente mais actualizado. Uma fracção significativa destas escolas corresponde à classe Blocos 21m x 21m.

As instalações do tipo MOP e Projecto Especial, que dizem respeito a tipologias projectadas e construídas entre os anos 40 e finais de 1970, podem apresentar graus de danos superiores. Para além da sua maior vulnerabilidade intrínseca, a localização de alguns destes equipamentos em solos mais brandos teve o efeito de aumentar a vulnerabilidade destes edifícios e, conseqüentemente, do correspondente grau de dano.

Relativamente ao distrito de Setúbal, das 54 escolas seleccionadas, cerca de 41% apresentam grau médio de dano igual a 3, ou seja, *danos severos*. Referem-se ainda cerca de 20% das instalações escolares com *danos muito graves*. A presença de solos brandos conjugada com a existência de estruturas pertencentes a épocas construtivas mais antigas torna estas construções mais vulneráveis. Aqui, tal como se verifica no distrito de Lisboa, as tipologias de projecto MOP são as que registam graus de danos mais significativos (*danos severos e danos muito graves*). O Conjunto de Pavilhões-Brandão, os Pré-Fabricados de Madeira, de Betão ou Mistos bem como as construções Tipo “Liceu” também apresentam danos superiores.

Conjugando todas as informações coligidas e determinadas – tipologia de projecto, danos expectáveis, nível de ocupação, representatividade, capacidade, entre outros – apurou-se que a Escola Secundária com 3.º Ciclo do Ensino Básico de D. Luísa de Gusmão deveria ser alvo de avaliação individualizada da vulnerabilidade sísmica, prevista como constituindo a Fase 2 do PRRSIE/EP. Esta escola corresponde à tipologia de projecto de arquitectura referenciada por MOP.

5. AVALIAÇÃO INDIVIDUALIZADA DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DA ESCOLA D. LUÍSA DE GUSMÃO

5.1. Recolha documental, inspeção e ensaios experimentais

A Escola D. Luísa de Gusmão foi inaugurada em 1958, apresentando na altura uma capacidade para 1000 alunas (trata-se originalmente de uma escola industrial feminina). As construções do *campus* escolar consistem num corpo das salas de aula com uma planta sensivelmente em “L”, que comunica por meio de um corpo de ligação com o corpo do ginásio que apresenta planta rectangular (Figura 12).

O Estudo da Escola D. Luísa de Gusmão iniciou-se com a recolha de documentos de projecto (estruturas e arquitectura), ao que seguiu um conjunto de inspeções e ensaios experimentais. As inspeções realizadas foram dirigidas à confirmação dos elementos documentais disponibilizados, tendo, em acréscimo, servido para a identificação de potenciais riscos não estruturais (derrubamento de estantes e armários, queda de equipamentos suspensos, quebra de vãos envidraçados exteriores, etc.). Dessas inspeções resultou também a conclusão de que não existiam juntas estruturais entre o corpo das salas de aula, o corpo de ligação e o corpo do ginásio.

Os ensaios experimentais realizados consistiram na identificação modal das frequências mais baixas dos corpos em questão (fig. 13), tendo concluído que as frequências fundamentais eram genericamente superiores a 5,5 Hz. Conclui-se também que todos os três corpos eram mobilizados em cada modo, embora, em virtude da deformação das lajes de piso no seu próprio plano e da forma alongada da construção, esses modos se manifestavam predominantemente em um ou outro dos corpos.

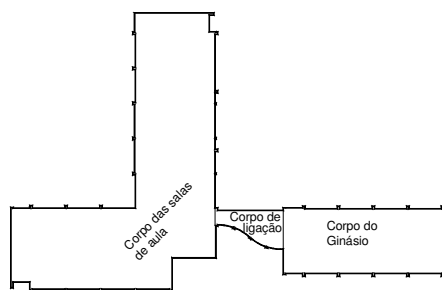


Figura 12: Planta

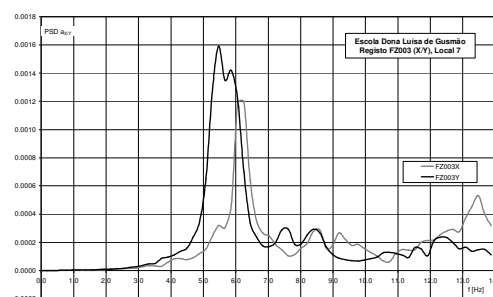


Figura 13: Densidade espectral de potência dos registos ambientais (corpo das salas de aula)

5.2. Modelos de análise estrutural

A avaliação da vulnerabilidade sísmica do edifício da escola foi realizada com modelos numéricos de análise estrutural com diferentes níveis de complexidade. Numa fase inicial procedeu-se ao desenvolvimento de um modelo elástico linear (fig. 14), com o qual foram determinadas as características modais da estrutura e feita a análise sísmica por espectros de resposta (decomposição modal). Esta análise serviu acessoriamente para a identificação das zonas críticas (nos pilares e paredes), o que foi considerado explicitamente num segundo modelo. Posteriormente, utilizando os resultados da análise elástica linear, procedeu-se ao desenvolvimento do segundo modelo de comportamento. Trata-se de um modelo de comportamento não linear (circunscrito aos elementos considerados críticos), tendo-se procedido a um conjunto de análises estáticas não lineares (*pushover analysis*).

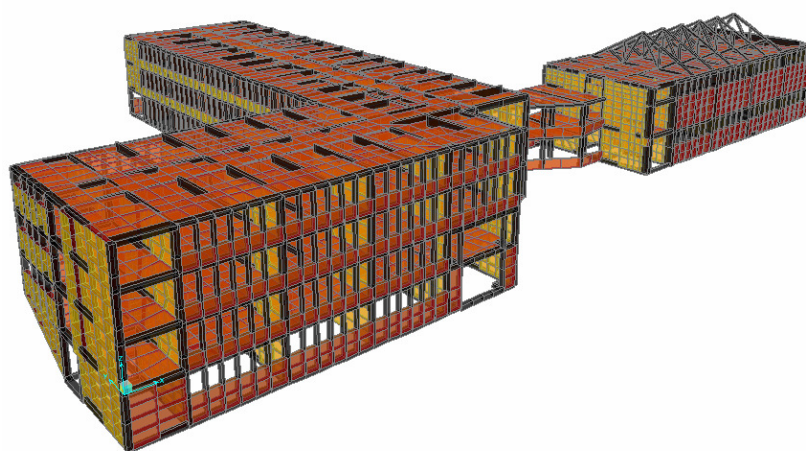


Figura 14: Modelo linear.

No segundo modelo o comportamento fisicamente não linear dos pilares identificados foi considerado mediante rótulas plásticas do tipo P-M-M (interacção entre o esforço axial e os momentos flectores segundo os eixos transversais). A definição das características das rótulas plásticas P-M-M dos pilares (fig. 15) foi realizada considerando as recomendações da *Japan Association for Building Disaster Prevention* [9] e da *Federal Emergency Management Agency* [10].

O comportamento fisicamente não linear das paredes de alvenaria (fig. 15) foi considerado mediante a utilização de colunas equivalentes com rótulas plásticas nas suas extremidades. Na modelação das paredes de alvenaria consideradas resistentes verificou-se que estas se assemelham a colunas de alvenaria (após a remoção das aberturas horizontais e verticais), que foram aqui idealizadas como colunas com o comportamento determinado pela compressão e corte (sem flexão).

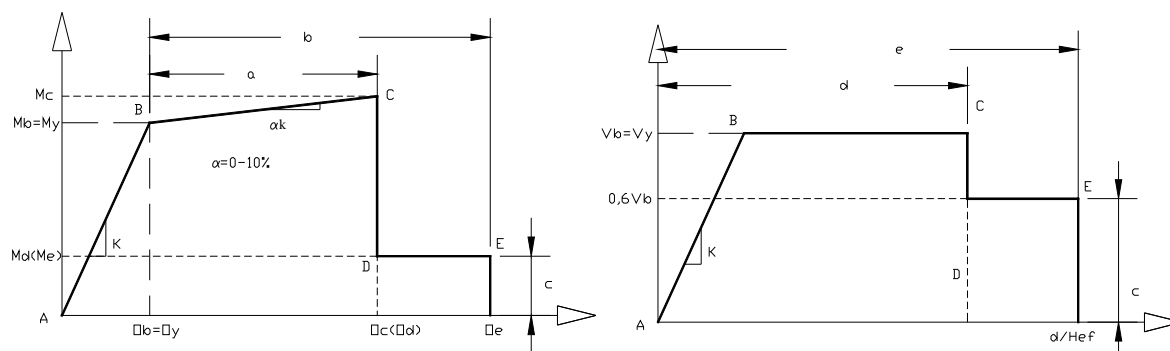


Figura 15: Curvas-esqueleto: Pilares (esquerda) e Paredes (direita)

Neste segundo modelo a acção sísmica foi assimilada a um conjunto de forças horizontais incrementadas monotonicamente de modo a simular as forças inércias. As forças foram consideradas aplicadas ao nível dos pisos, com uma distribuição espacial determinada de acordo com a distribuição de deslocamentos determinada previamente pela análise por espectros de resposta. A estrutura foi subdividida num conjunto sub-estruturas constituídas por diafragmas planos verticais coincidentes com os eixos estruturais.

5.3. Resultados da análise estrutural

A avaliação estrutural no segundo modelo foi baseada nos resultados das análises estáticas não lineares. Converteu-se a curva de capacidade da estrutura num espectro de capacidade que foi posteriormente representado no mesmo gráfico que o espectro de resposta (convertido para coordenadas espectrais). Dada a complexidade geométrica da estrutura e complexidade da resposta estrutural, não foi possível utilizar os procedimentos *standards* para a conversão da curva de capacidade no espectro de capacidade. Utilizou-se, alternativamente, o conceito de espectro de capacidade adaptativo (*adaptive capacity spectrum method*, [11]) em que a conversão da curva de capacidade é realizada considerando o perfil de deslocamentos apresentado pela estrutura, actualizando-o em cada passo da análise (em alternativa à consideração de uma determinada configuração modal). O ponto de desempenho da estrutura total é determinado através da intersecção do espectro de capacidade da estrutura total com o espectro da acção, amortecido com um valor apropriado. O valor do amortecimento real é determinado com o modelo de amortecimento de 1gl, baseando-se no modelo de Takeda para a degradação de rigidez devida ao amortecimento hysterético. Para representar as características espaciais da acção sísmica procedeu-se à combinação dos resultados das análises estáticas não lineares correspondentes à actuação das forças horizontais separadamente segundo as duas direcções principais da estrutura. Desta forma consideraram-se dois carregamentos sísmicos combinando os resultados correspondentes à actuação das forças horizontais separadamente segundo as direcções principais da estrutura. Os dois vectores de carregamento assim definidos fazem ângulos de 135° e 225° relativamente ao eixo global (principal) X. Estes dois carregamento são designados por – *NegXNegY* (combinação (-1).EqX.(-1).EqY) e *NegXPosY* (combinação (-1).EqX+(1).EqY).

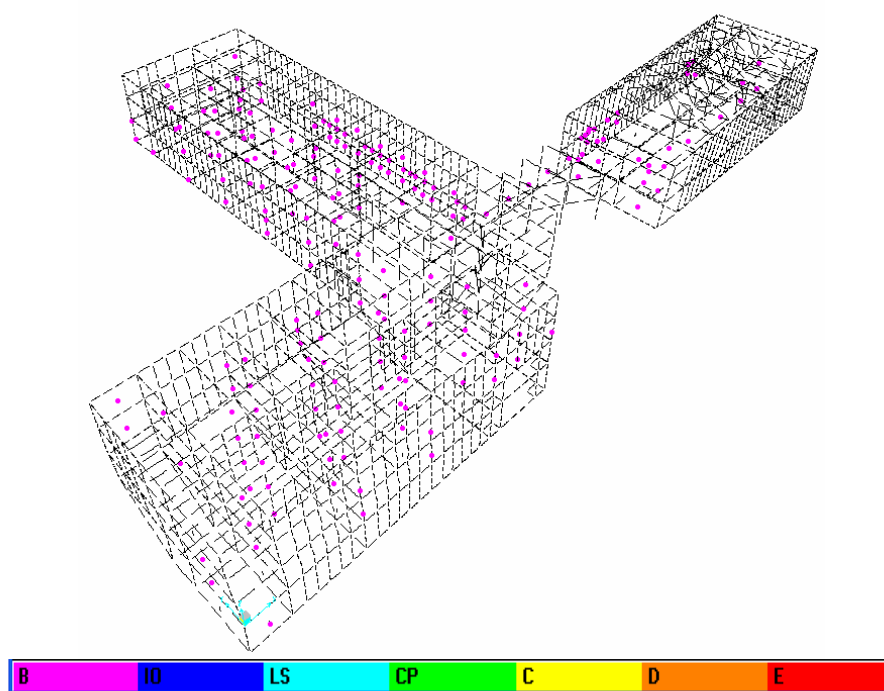


Figura 16: Distribuição de danos para combinação *NegXNegY* (no ponto de desempenho).

No exemplo dos danos representado na figura 16, as esferas representadas indicam o estado previsível das rótulas plásticas incluídas no modelo. Os níveis de danos “B”, “C”, “D” e “E” referem-se à curva esquelito adoptada para os pilares e paredes e os níveis “IO”, “LS” e “CP” correspondem aos níveis de desempenho

estruturais *Immediate Occupancy*, *Life Safety* e *Collapse Prevention*, respectivamente. Pode observar-se que as deformações pós-elásticas se encontram localizadas sobretudo nas paredes (as esferas internas referem-se a elementos de barra que reproduzem o comportamento das paredes de alvenaria) e apenas um reduzido número de pilares sobrecarregados existentes nas empenas desenvolveram rótulas plásticas. Pode também concluir-se que a extensão dos danos determinados é reduzida pois os elementos mais danificados ainda se encontram no patamar da resposta da correspondente curva-esqueleto (cor magenta), não se observando quaisquer rótulas próximas do colapso.

Após a determinação do ponto de desempenho da estrutura, a história da resposta obtida pela análise estática não linear foi utilizada para avaliar a extensão dos danos em cada sub-estrutura. Para esse efeito definiu-se o seguinte indicador de danos (expressão 3):

$$D_p = \frac{d_p - d_y}{d_u - d_y} \quad (3)$$

em que,

- d_p é o deslocamento no topo da sub-estrutura, determinado no ponto de desempenho
- d_u é o deslocamento último no topo da sub-estrutura, determinada pela análise não linear ou considerando a deriva máxima entre pisos estipulada na regulamentação
- d_y é o deslocamento no topo da sub-estrutura no início do comportamento não linear (cedência ou limite de proporcionalidade) da mesma sub-estrutura

O espectro de capacidade intersecta o espectro reduzido (acção) para um nível de deslocamentos para o qual já se verifica a entrada em regime pós elástico (cedência, em alguns casos) de muitos dos elementos estruturais. Desta forma é expectável que a estrutura apresente danos pronunciados. A avaliação da distribuição de danos foi realizada determinando os indicadores de danos separadamente para cada sub-estrutura. Na tabela seguinte apresentam-se os indicadores de danos determinados para cada uma das sub-estruturas e para um dos carregamentos.

Tabela 2 - Indicadores de danos para carregamento *NegXNegY*.

Bloco I (Aulas)									
	Empena AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	Empena A	B	C	Empena D
dy	0.0115	0.009	0.006	0.005	0.001	0.005	0.001	0.001	0.0008
dp	0.0128	0.0128	0.0127	0.0126	0.0126	0.015	0.014	0.013	0.01
du	0.0321	0.0321	0.0318	0.0318	0.0317	0.025	0.033	0.029	0.026
DI	0.06	0.16	0.26	0.28	0.38	0.5	0.41	0.43	0.37

Bloco II (Aulas)											
	EHD	EH17	EH18	EH19	EH20	EH21	Empena EH22	Empena E	F	G	Empena H
dy	0.001	0.0008	0.0008	0.0008	0.001	0.0018	0.006	0.005	0.0013	0.008	0.008
dp	0.011	0.011	0.011	0.011	0.009	0.009	0.007	0.015	0.013	0.012	0.014
du	0.031	0.034	0.034	0.034	0.026	0.019	0.016	0.025	0.034	0.034	0.037
DI	0.33	0.31	0.31	0.31	0.32	0.42	0.1	0.5	0.36	0.15	0.21

Bloco IV	
	D 7-11
dy	0.0008
dp	0.01
du	0.02
DI	0.48

Bloco V (Ginásio)										
	Empena AD11	AD12	AD13	AD14	AD15	Empena AD16	Empena A	B	C	Empena D
dy	0.001	0.0006	0.011	0.003	0.011	0.006	0.01	0.0004	0.0013	0.0011
dp	0.013	0.013	0.012	0.01	0.009	0.012	0.009	0.002	0.013	0.007
du	0.03	0.03	0.028	0.02	0.024	0.031	0.02	0.009	0.034	0.02
DI	0.41	0.42	0.06	0.41	0	0.24	0	0.19	0.36	0.31

A estrutura da Escola “Dona Luísa de Gusmão” apresenta um comportamento relativamente estável, demonstrando capacidade para suportar a acção sísmica considerada com danos limitados. Os indicadores de danos obtidos situam-se todos abaixo de 0,5, sendo geralmente inferiores a 0,3, o que denota um comportamento não linear contido. A amplitude dos danos e sua localização depende em larga medida da direcção do carregamento sísmico considerado (direcção do vector de carregamento), não podendo, conseqüentemente, serem formuladas conclusões absolutas relativamente à localização dos danos. Em geral a estrutura apresenta uma maior vulnerabilidade junto do seu centro, diminuindo os danos à medida que aumenta o afastamento

relativamente a esse mesmo centro. Este facto poderá ser justificado com o comportamento flexível do diafragma de piso que, indirectamente, faz com que as estruturas extremas estejam relativamente isoladas das restantes.

6. CONCLUSÕES

No presente artigo apresentam-se duas metodologias distintas – metodologias ditas *generalizada* e *individualizada* – de avaliação da vulnerabilidade sísmica de instalações escolares. Da análise comparativa dos resultados destas metodologias, infere-se que a metodologia generalizada, determinada tendo por base os modelos de Giovinazzi e Lagomarsino, tende a sobrestimar os danos em instalações escolares relativamente à metodologia, mais rigorosa, de avaliação discriminada. Esta discrepância poderá ficar a dever-se ao facto das instalações escolares serem construídas com cuidados acrescidos relativamente a construções contemporâneas, facto que não é explicitamente considerado na metodologia de avaliação generalizada. Esta conclusão, confirmada para uma construção representativa da tipologia MOP, pode, no entanto, não se estender a construções de outras épocas mais recentes em que terá deixado de haver uma diferença tão marcada entre a qualidade de construção das instalações escolares relativamente às restantes construções da mesma época.

7. AGRADECIMENTOS

O presente estudo resulta do trabalho desenvolvido no âmbito do Programa de Redução do Risco Sísmico das Instalações Escolares, PRRSIE, estabelecido por protocolo celebrado entre a Secretaria-Geral do Ministério da Educação e o ICIST/IST (Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção, do Instituto Superior Técnico). Nestas circunstâncias agradece-se publicamente à Secretaria-Geral do Ministério da Educação todo o apoio concedido ao ICIST/IST no decurso dos estudos relatados.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Dolce, M. (2004) *Seismic Safety of Italian Schools*, Keeping Schools Safe in Earthquakes, OECD, Paris, pp 52-63.
- [2] Azevedo, J., Bento, R., Guerreiro, L., Lopes, M. and Proença, J. (1998) *IST Mission to Faial and Pico after the July 9th of 1998 earthquake – Inspection of Schools and Churches* (in Portuguese), ICIST/IST Report DT N° 8/98, IST, Lisbon.
- [3] Proença, J. (2004) *Earthquake Damage in Portuguese Educational Buildings. The 9th of July of 1998 Faial earthquake in the Azores*, Keeping Schools Safe in Earthquakes, OECD, Paris, pp 131-139.
- [4] Maria do Carmo Matos (1986) *Metodologia de Avaliação da Concepção Arquitectónica dos Equipamentos Educativos*, ME, GEP.
- [5] Giovinazzi, S.; Lagomarsino, S. (2002) *A Method for the Vulnerability Analysis of Built-up Areas*, Proceedings, International Conference on Earthquake Losses and Risk Reduction, Bucharest.
- [6] Giovinazzi, S.; Lagomarsino, S. (2003) *Seismic Risk Analysis: a Method for the Vulnerability Assessment of Built-up Areas*, Proceedings, European Safety & Reliability Conference, Maastricht.
- [7] Grunthal, G. (1998) *European Macroseismic Scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol 15, Luxembourg.
- [8] prEN 1998-1 (12/2003) *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, CEN, Bruxelas, Bélgica.
- [9] *Standards for Seismic Capacity Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings*, Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), 2001.
- [10] FEMA 273 (1997) *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D. C., USA.
- [11] *An Adaptive Capacity Spectrum Method for Assessment of Bridges Subjected to Earthquake Action*, Chiara Casarotti, Rui Pinho, Bulletin of Earthquake Engineering (submissão em Março de 2006).