

Caracterização do parque habitacional de Portugal Continental para estudos de risco sísmico

Characterization of the building stock in Mainland Portugal to study seismic risk

Maria Luísa Sousa

Investigadora Auxiliar
LNEC
Lisboa

Carlos Sousa Oliveira

Professor Catedrático
ICIST / IST
Lisboa

Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
LNEC
Lisboa

RESUMO

A caracterização do parque habitacional existente em Portugal Continental no que respeita à sua vulnerabilidade sísmica e a sua classificação em tipologias construtivas são os principais objectivos do presente artigo.

Esta caracterização e classificação estão enquadradas num estudo de âmbito mais vasto que é o de avaliação do risco sísmico de Portugal Continental [Sousa, 2005] que, por sua vez, requer o conhecimento prévio da vulnerabilidade sísmica do seu parque habitacional.

Neste contexto, apresenta-se o panorama da construção existente em Portugal Continental, caracteriza-se a evolução das práticas construtivas ao longo do tempo, identificam-se os principais tipos de construção que subsistem e se praticam no Continente, descrevem-se, de forma sumária, os respectivos sistemas estruturais, mencionando as suas principais vulnerabilidades face à acção dos sismos (entendidas como as deficiências do seu desempenho sísmico), e tipificam-se as soluções construtivas mais correntes enquadrando-as nas tipologias identificadas nos Censos 2001.

ABSTRACT

The main goals of this work are to characterize the residential building stock existing in Mainland Portugal, as far as seismic resistance is concerned, and to classify it in building typologies.

These characterization and classification were developed in the framework of a broader study dealing with seismic risk assessment in Mainland Portugal [Sousa, 2005], that requires a previous evaluation of the seismic vulnerability of this building stock.

In this context, the building construction panorama in Mainland Portugal is presented, showing the evolution of the constructive practices along the time. In a summarized way, the main types of construction and structural systems that subsist and are practiced in this territory are referred and their main seismic vulnerabilities are discussed.

The most current constructive solutions are classified according to typologies identified in the Censos 2001 (national database).

1. INTRODUÇÃO

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

O primeiro regulamento português dos tempos recentes sobre projecto de estruturas sísmo-resistentes [RSCCS, 1958] data do final da década de 50 do século XX. Este regulamento foi posteriormente actualizado, sendo de esperar que os edifícios projectados e construídos segundo as disposições do regulamento presentemente em vigor [RSA, 1983] apresentem um desempenho sísmico adequado à perigosidade do nosso território. No entanto, é difícil avaliar o quantitativo de edifícios que cumprem as disposições regulamentares, ou que não sofreram alterações que tenham comprometido o seu desempenho face à acção dos sismos. Por outro lado, a grande maioria dos edifícios construídos em data anterior à do primeiro regulamento é sísmicamente mais vulnerável.

Na prática, estudos para a mitigação do risco sísmico exigem um conhecimento prévio da vulnerabilidade do parque construído.

De uma forma geral, os principais factores que condicionam a vulnerabilidade sísmica das construções são, em primeiro lugar, os seus elementos resistentes, mas também a configuração dos sistemas estruturais (dimensões e forma em planta, número de pisos e configuração em altura, distribuição da massa), as disposições de dimensionamento do projecto, a qualidade da construção, o seu estado de conservação, a época de construção e ainda os materiais, métodos e tecnologias construtivas da região onde se localiza a construção [Coelho, 2003].

Neste trabalho apresenta-se um panorama global e sintético do parque habitacional existente em Portugal Continental, tipificando as soluções construtivas mais correntes e enquadrando-as em tipologias identificadas nos Censos 2001. Realçam-se os sistemas estruturais destas tipologias, que se espera mostrarem desempenhos sísmicos semelhantes, e referem-se as suas principais deficiências face à acção dos sismos.

Artigo recebido em 2006-03-28

2. TIPOLOGIAS IDENTIFICADAS NOS CENSOS 2001

O XIV Recenseamento Geral da População e o IV Recenseamento Geral da Habitação (Censos 2001) realizados pelo Instituto Nacional de Estatística em 2001 [INE, 2002] foram analisados para se construir uma base de dados exaustiva sobre o parque habitacional do continente português e dos seus ocupantes.

No que toca ao parque habitacional de Portugal Continental identificaram-se no "Questionário de Edifício" dos Censos 2001 as variáveis consideradas pertinentes para a caracterização da sua vulnerabilidade sísmica. Foi assim solicitado ao Instituto Nacional de Estatística o apuramento do *número de edifícios (clássicos)*, segundo a *época de construção ou reconstrução do edifício* por *número de pavimentos* e por *tipo de estrutura da construção do edifício*. O questionário referido e as definições de conceitos associados à unidade estatística primária (edifício) e variáveis mencionadas podem ser encontrados em INE [2002].

De acordo com o Programa Global dos Censos 2001 [INE, 2003] a (i) *época de construção ou reconstrução do edifício* é o "período de construção do edifício propriamente dito, ou o período de construção da parte principal do edifício, isto é, aquela que corresponde à estrutura, quando diferentes partes de um edifício correspondem a épocas distintas, ou o período de reconstrução, para os edifícios que sofreram uma transformação completa", (ii) *os pavimentos* são "cada um dos planos habitáveis ou utilizáveis do edifício, qualquer que seja a sua relação com o nível do terreno, sendo considerados como *pavimento* o rés-do-chão, assim como as caves e águas-furtadas habitáveis ou utilizáveis com funções complementares à habitação" e (iii) *o tipo de estrutura da construção do edifício* "identifica os elementos utilizados na construção ou reconstrução dos edifícios, no que respeita à estrutura que os suporta, devendo ser identificados os elementos resistentes do edifício, ou seja, os materiais que servem de estrutura à própria construção e que servem de suporte aos pavimentos, independentemente dos materiais empregues nas paredes exteriores".

No Quadro I reúnem-se as modalidades das variáveis seleccionadas do "Questionário de Edifício" dos Censos 2001 com o objectivo de se caracterizar a vulnerabilidade sísmica

destes elementos em risco. Neste quadro as variáveis são identificadas pelo número da pergunta deste questionário. Para simplificar a análise, a variável *número de pavimentos* foi classificada nas 7 classes constantes do Quadro I. Também por uma questão de simplificação de linguagem as variáveis *época de construção ou reconstrução do edifício* e *tipo de estrutura da construção do edifício* passarão a ser designadas simplesmente por *época de construção* ou *época* e por *tipo de estrutura*, respectivamente.

O Quadro II condensa toda a informação apurada nos Censos 2001 mostrando os quantitativos de edifícios obtidos dos cruzamentos das variáveis analisadas, ou seja, 9 modalidades de *época de construção*, por 7 classes de *número de pavimentos* e por 5 *tipos de estrutura*. De acordo com esta classificação seriam apurados nos Censos 2001 os quantitativos de 315 tipologias, a que se chamaram *tipologias Censos 2001*.

Porém, algumas destas tipologias não possuem existências no parque habitacional de Portugal Continental, sendo assinaladas pelo fundo cinzento das respectivas células, tendo como consequência a redução do número de tipologias representadas nos Censos 2001 de 315 para 221.

A utilização das variáveis seleccionadas nos Censos 2001 para traduzir as técnicas construtivas com maior representatividade no parque habitacional do País apresentou algumas dificuldades pois, naturalmente, os recenseamentos da habitação não estão directamente vocacionados para serem utilizados em estudos de caracterização da vulnerabilidade sísmica.

Por exemplo, as modalidades mais antigas da variável *época de construção* ("Antes de 1919" e "De 1919 a 1945") não se adequam aos principais períodos históricos construtivos nacionais identificados na secção 3.

Também as modalidades da variável *tipo de estrutura* dos Censos 2001, se bem que bastante mais próximas dos processos construtivos utilizados no País do que as modalidades da variável *elementos resistentes* dos Censos anteriores (e.g. os Censos 91), fornecem informação necessariamente generalista, não traduzindo integralmente as soluções estruturais utilizadas no nosso território ao longo do tempo.

Acresce que os recenseadores deverão ter tido dificuldades em classificar o *tipo de estrutura* dos edifícios. Talvez

Quadro I – Modalidades das variáveis apuradas nos Censos 2001 consideradas pertinentes para a caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional

6. Número de pavimentos
1
2
3
4
5 a 7
8 a 15
+ de 15

13. Época de construção ou reconstrução dos edifícios
Antes de 1919
1919 a 1945
1946 a 1960
1961 a 1970
1971 a 1980
1981 a 1985
1986 a 1990
1991 a 1995
1996 a 2001

14. Tipo de estrutura da construção do edifício
Estrutura de betão armado (BA)
Paredes de alvenaria argamassada, com placa (ACP)
Paredes de alvenaria argamassada, sem placa (ASP)
Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta (ATAPS)
Outros (madeira, metálica, etc.)

Quadro II – Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos (Censos 2001)

Época	Nº pavimentos	Betão	ACP	ASP	ATAPS	Outros
Antes de 1919	1	0	0	51 216	74 859	918
	2	0	0	49 290	45 294	834
	3	0	0	8 257	4 627	99
	4	0	54	3 588	0	33
	5 a 7	0	8	1 434	0	17
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
Total = 240 528	0	62	113 785	124 780	1 901	
1919 a 1945	1	12 659	34 763	73 782	61 185	841
	2	7 732	28 882	51 566	27 852	664
	3	1 842	5 274	7 709	2 623	84
	4	776	1 448	2 263	0	23
	5 a 7	636	1 656	894	0	6
	8 a 15	232	0	0	0	2
	+ de 15	0	0	0	0	0
Total = 325 394	23 877	72 023	136 214	91 660	1 620	
1946 a 1960	1	24 277	56 209	65 409	35 055	781
	2	19 219	46 337	41 998	15 999	385
	3	5 687	7 907	4 517	1 443	67
	4	3 864	2 661	1 158	0	11
	5 a 7	2 699	1 780	322	0	5
	8 a 15	792	0	0	0	1
	+ de 15	0	0	0	0	0
Total = 338 583	56 538	114 894	113 404	52 497	1 250	
1961 a 1970	1	44 074	81 122	38 225	12 961	818
	2	42 974	75 985	26 266	7 703	327
	3	11 795	11 245	2 518	709	68
	4	8 483	2 916	499	0	11
	5 a 7	6 474	1 756	108	0	3
	8 a 15	2 242	0	0	0	0
	+ de 15	87	0	0	0	1
Total = 379 370	116 129	173 024	67 616	21 373	1 228	
1971 a 1980	1	63 927	106 048	23 909	7 846	3 135
	2	86 592	141 423	15 992	5 574	442
	3	22 408	22 572	1 721	629	53
	4	10 495	3 693	329	0	13
	5 a 7	9 454	1 781	90	0	5
	8 a 15	3 814	0	0	0	1
	+ de 15	179	0	0	0	2
Total = 532 127	196 869	275 517	42 041	14 049	3 651	
1981 a 1985	1	38 850	59 432	10 018	3 992	1 047
	2	66 419	93 422	5 920	2 692	210
	3	18 919	17 739	678	343	49
	4	5 957	2 168	131	0	10
	5 a 7	6 340	1 241	29	0	3
	8 a 15	2 282	0	0	0	4
	+ de 15	110	0	0	0	0
Total = 338 005	138 877	174 002	16 776	7 027	1 323	
1986 a 1990	1	31 371	45 298	6 633	3 564	562
	2	55 185	71 590	4 002	2 213	176
	3	17 939	14 954	509	323	15
	4	6 386	2 071	104	0	1
	5 a 7	6 988	1 196	23	0	1
	8 a 15	2 574	0	0	0	1
	+ de 15	91	0	0	0	0
Total = 273 770	120 534	135 109	11 271	6 100	756	
1991 a 1995	1	28 049	43 378	5 998	4 192	635
	2	50 913	67 227	4 059	2 661	177
	3	18 367	14 921	557	375	22
	4	6 458	2 004	125	0	4
	5 a 7	7 963	1 423	36	0	3
	8 a 15	3 053	0	0	0	0
	+ de 15	90	0	0	0	0
Total = 262 690	114 893	128 953	10 775	7 228	841	
1996 a 2001	1	31 206	46 115	6 085	5 231	474
	2	61 761	76 154	4 151	3 610	230
	3	24 548	17 778	634	561	48
	4	9 107	2 716	171	0	4
	5 a 7	11 050	1 542	47	0	5
	8 a 15	3 815	0	0	0	1
	+ de 15	148	0	0	0	0
Total = 307 192	141 635	144 305	11 088	9 402	762	
Total = 2 997 659	Tipo de estrutura	909 352	1 217 889	522 970	334 116	13 332
1 pavimento	2 pavimento	3 pavimento	4 pavimento	5 a 7 pavimentos	8 a 15 pavimentos	+ de 15 pavimentos
1 246 149	1 312 102	273 133	79 735	67 018	18 814	708

por isso o Quadro II exiba alguns valores inesperados, designadamente 333 edifícios de paredes de alvenaria argamassada, sem placa, posteriores a 1960 e com mais de 4 pavimentos. É provável que apuramentos deste tipo correspondam a uma classificação errada do tipo de estrutura dos edifícios, do número de pavimentos dos mesmos, ou ainda da sua época de construção. Contudo, estes números são irrelevantes face aos quantitativos globais apurados.

No recenseamento da habitação efectuado em 2001, e graças à participação do LNEC nos seus trabalhos preparatórios, para além das variáveis exibidas no Quadro I, foram apuradas outras variáveis pertinentes para caracterizar a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional, tais como a configuração do rés-do-chão, o posicionamento do edifício relativamente a edifícios adjacentes, a altura relativa face aos edifícios adjacentes ou ainda a variável derivada estado de conservação do edifício.

3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DO PARQUE HABITACIONAL DE PORTUGAL CONTINENTAL

A tipificação do parque e das técnicas construtivas pode ser efectuada seguindo diferentes abordagens das quais se destacam as classificações, segundo critérios de localização geográfica, de materiais empregues na construção, de características dos processos construtivos e de evolução da construção ao longo do tempo.

Na descrição da evolução da construção é usual delimitar períodos históricos construtivos e identificar as tipologias construtivas específicas de cada época. Naturalmente, e tal como Cardoso [2002] salienta, os principais marcos históricos não constituem fronteiras rígidas e, na maior parte dos casos, a transição entre tipologias não se processa de forma repentina, favorecendo o aparecimento de soluções de continuidade entre épocas.

No entanto, identificam-se alguns momentos marcantes, embora de índole distinta, que assinalam o início de alterações mais rápidas que o usual nos hábitos construtivos das edificações em Portugal e no que concerne à sua vulnerabilidade sísmica: o terramoto de 1755, a massificação do betão armado no final da década de 40 do século XX [Appleton, 1991] e a entrada em vigor dos regulamentos de construção sísmo-resistente modernos [RSCCS, 1958 e RSA, 1983].

O advento do betão armado no final do século XIX* [Appleton, 1991; Ferreira, 1989; Ferreira, 1991] marcou o início do declínio da construção em alvenaria. Efectivamente, no início do século XX, o emprego da alvenaria como sistema estrutural encontrava-se consagrado, sendo praticamente o sistema construtivo exclusivo dos edifícios de Portugal Continental. Gradualmente, durante o século XX, a

percentagem de edifícios com estrutura em alvenaria diminuiu para pouco mais de 50% do número global de edifícios existente neste território.

Estes quantitativos decorrem da análise da Fig. 1 em que se retratam as existências de edifícios do parque habitacional de Portugal Continental, à data dos Censos 2001, em função da época em que foram construídos e evidenciando o peso relativo dos vários tipos de estrutura. Nesta figura acrescentou-se uma série suplementar que contabiliza o total dos edifícios de alvenaria, ou seja, o resultado da adição dos edifícios construídos, numa mesma época, com tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, com placa, ou Paredes de alvenaria argamassada, sem placa ou Paredes de adobe taipa ou alvenaria de pedra solta (ACP + ASP + ATAPS).

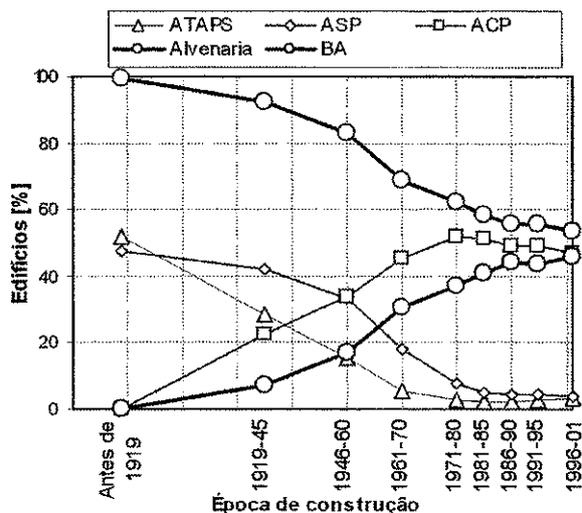


Fig. 1 – Percentagens de edifícios com tipo de estrutura de alvenaria e de betão armado existentes no parque habitacional de Portugal Continental, à data dos Censos 2001, e construídos em épocas distintas.

Note-se que a evolução do parque habitacional não pode ser inferida desta figura, uma vez que os números respeitantes às demolições e reconstruções de edifícios não estão incluídos. No entanto, relativamente aos edifícios construídos nas últimas décadas, que provavelmente sofreram um número menor de demolições e reconstruções, é possível efectuar uma análise pouco enviesada da sua evolução.

Constata-se, assim, que a construção de edifícios com estrutura de alvenaria decresceu ligeiramente nas últimas décadas, enquanto que o oposto se observou nos edifícios com estrutura de betão armado. Porém, um dos aspectos mais marcantes revelado pela Fig. 1 é que se a alvenaria como sistema estrutural predomina no parque habitacional construído nas últimas décadas (pouco mais de 50%), essa predominância é conseguida graças aos quantitativos elevados de edifícios de alvenaria com elementos de betão (ACP). Efectivamente, os edifícios com estrutura do tipo ASP e ATAPS apresentam, em cada época, percentagens de construção baixas e aproximadamente constantes, entre 3 e 4% e entre 2 e 3%, respectivamente.

Por outro lado, nos quantitativos do parque habitacional apurados em 2001 também sobressai o contraste entre a inexistência de edifícios de Betão Armado construídos no início do século XX e o seu crescimento para 46% dos edifícios construídos no período de 1995 a 2001.

* De acordo com Ferreira [1998 e 1991] as origens do betão armado em Portugal estão historicamente associadas ao início da produção em 1894 de cimento Portland na fábrica da Companhia do Cimento Tejo em Alhandra e ao processo de registo de patente da invenção de François Hennebique de "um vigamento ligeiro e de grande resistência, de formigação (betão) de cimento, com barras de ferro e estribos travessas metidas na massa". Este processo iniciou-se em 1894, em Lisboa, com a "Exposição do Invento" tendo o pedido de concessão do título de patente sido formalizado em 1895 e concedido no ano seguinte.

Deste modo, a principal conclusão a retirar das percentagens ilustradas na Fig. 1 é que o betão armado introduziu alterações profundas nos processos construtivos, não só pela massificação do seu emprego como solução estrutural, como também pela sua utilização nos sistemas construtivos de alvenaria.

Identificam-se, deste modo, três grandes grupos de sistemas construtivos presentes no parque habitacional de Portugal:

- (i) os edifícios de alvenaria anteriores à consolidação do uso do betão armado, denominados por Appleton [1991] de *edifícios antigos*, aos quais se adicionam os edifícios de alvenaria de épocas mais recentes, mas que continuaram a ser construídos recorrendo aos materiais e às tecnologias tradicionalmente usadas ao longo do tempo;
- (ii) os edifícios em que a alvenaria exerce funções estruturais mas que contam com alguns elementos de betão armado para a sua consolidação;
- (iii) os edifícios com estrutura de betão armado.

Na Fig. 2 enquadram-se os diversos sistemas construtivos existentes no parque habitacional de Portugal Continental nos três grandes grupos atrás referidos identificados por (i) a (iii).

Os edifícios pertencentes ao primeiro grupo são classificados nos Censos 2001 como tendo tipo de estrutura de Paredes de alvenaria argamassada, sem placa, ou de Paredes de adobe taipa ou alvenaria de pedra solta (ASP + ATAPS). Os edifícios pertencentes ao segundo grupo são classificados nos Censos 2001 como tendo tipo de estrutura Paredes de alvenaria argamassada, com placa (ACP). Finalmente, os edifícios pertencentes ao terceiro grupo correspondem aos edifícios com tipo de estrutura de Betão Armado (BA) dos Censos 2001.

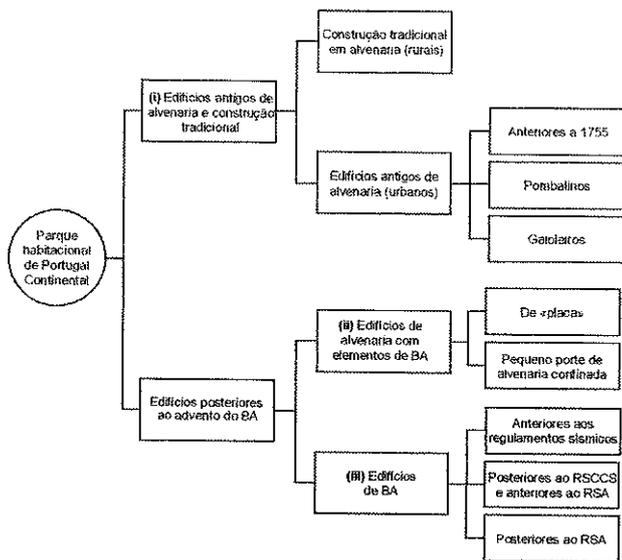


Fig. 2 – Sistemas construtivos existentes no parque habitacional de Portugal Continental

4. EDIFÍCIOS ANTIGOS DE ALVENARIA E CONSTRUÇÃO TRADICIONAL

Segundo Carvalho & Oliveira [1999], uma alvenaria corresponde à associação de várias unidades elementares, de um ou mais materiais, argamassadas ou não por um elemen-

to aglutinador, a que se chama ligante. Roque & Lourenço [2003] referem que desta associação resulta um compósito heterogéneo, utilizado para realizar elementos estruturais adequados para funcionar à compressão, mas com pouca capacidade para suportar esforços de flexão, de corte ou de tracção. Desta forma, nas construções com elementos estruturais de alvenaria, este material aparece apenas nos elementos verticais de suporte, enquanto que nos pavimentos e coberturas são utilizados outros materiais, como a madeira [Paiva *et al.*, 1985].

Nos edifícios antigos as paredes exteriores são os elementos resistentes fundamentais que suportam cargas verticais, por exemplo de natureza gravítica, mas também forças horizontais resultantes de sismos, do vento e de impulsos horizontais da própria estrutura [Appleton, 1991 e Costa, 2000]. Os pavimentos e cobertura têm o papel de assegurar a interligação entre elementos estruturais verticais, conferindo rigidez à estrutura e contribuindo para que esta resista a esforços horizontais [Farinha, 1955 e Mateus, 2002]. Nos edifícios antigos as paredes de compartimentação também concorrem para o travamento geral da estrutura, assegurando a ligação entre paredes, pavimentos e coberturas [Appleton, 1991 e Pinho, 2000a].

As paredes de alvenaria dos edifícios antigos possuem uma composição variada dependente dos materiais que compõem as unidades elementares e o ligante [Appleton, 1991]. Nas épocas mais antigas as variações geográficas das práticas construtivas estão correlacionadas com os próprios materiais empregues na construção, pois devido a limitações impostas pelas dificuldades de transporte e por questões de economia e rapidez da construção utilizavam-se os recursos disponíveis na região onde os edifícios eram construídos [Ramos, 2002].

De acordo com Pinho [2000a] e Appleton [1991], na região Norte e Beiras a construção tradicional em alvenaria recorre com frequência ao granito e ao xisto, construindo-se edifícios de pedra talhada e de pedra irregular assentes a seco ou com argamassas (ver Figs. 3, 4 e 6). Na região de Lisboa, na região Oeste e em certas zonas do Alentejo e da Beira Litoral predomina a alvenaria de pedra calcária e de tijolo (ver Figs. 5 e 7). A construção em alvenaria de terra sob a forma de taipa ou adobe surge nas regiões do Ribatejo, Alentejo e Algarve.

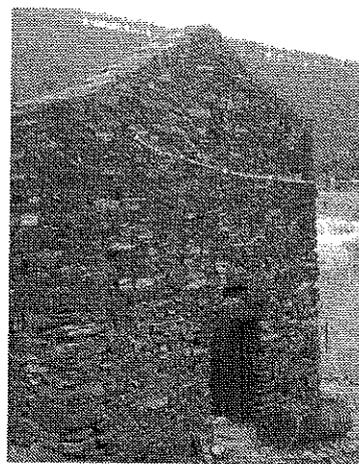


Fig. 3 – Exemplo de edifício com paredes em xisto no concelho de Manteigas; classificado nos Censos 2001 como ATAPS, anterior a 1919, dc 1 pavimento

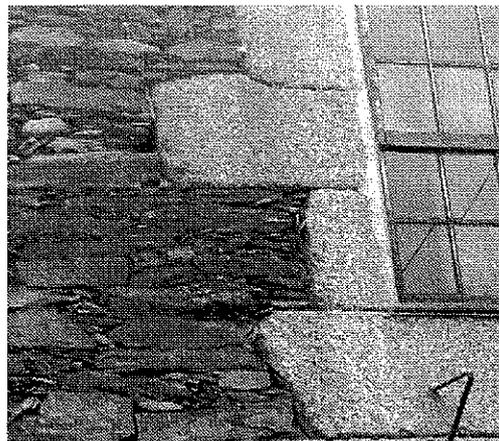


Fig. 4 – Exemplo e pormenor de edifício de habitação no concelho de Manteigas com paredes em granito e xisto argamassadas com barro vermelho; classificado nos Censos 2001 como ASP, anterior a 1919, de 2 pavimentos

A variação geográfica das técnicas construtivas também se correlaciona com uma classificação urbana ou rural da construção, que por sua vez se confunde com uma classificação da construção em popular ou erudita. De facto, é nos centros urbanos que surgem os materiais de maior qualidade aliados a processos construtivos com um nível mais elevado de tecnicidade, embora também se verifique construção de natureza pobre e de má qualidade. Por outro lado, nas regiões rurais, de menores possibilidades económicas, utilizam-se, em geral, materiais mais pobres sendo correntes os casos de autoconstrução.

É o caso da construção em taipa e adobe, maioritariamente com um piso térreo e com paredes sem qualquer travamento [Farinha, 1955]. De forma a evitar o contacto com a água e a humidade do solo é usual construir estes edifícios sobre fundações de alvenaria de pedra [Ferreira, 1989]. A protecção exterior das paredes é normalmente feita com um reboco de cal e areia [Marécós & Castanheta, 1970]. A taipa resulta da compressão de terra húmida e argilosa entre taipais de madeira que são retirados após a secagem das paredes, que resultam homogéneas e monolíticas [Farinha, 1955 e Pinho, 2000a].

Por sua vez, Pinho [2002b] explica que o adobe, sendo constituído principalmente por argila, com misturas arenosas ou calcárias, resulta da cozedura ao sol, ou em fornos, de tijolos de barro amassado com água.

Na sequência do sismo de 1969, Marécós & Castanheta [1970] visitaram o Alentejo e o Algarve que foram as regiões mais afectadas pelo evento. Estes autores reportam que, nessa data, uma grande percentagem da construção rural era de adobe e taipa, sendo um material também utilizado em casas de um ou dois pisos de vários centros urbanos, armazéns e construções diversas. Marécós & Castanheta [1970] sublinham que este foi o tipo de construção mais severamente atingido pelo sismo de 1969. Testemunho idêntico sobre construções de adobe e taipa foi feito por Choffat [citado por Farinha, 1955] relativamente aos danos causados pelo sismo de 1909.

Segundo Appleton [2001], as técnicas tradicionais usadas na construção pobre e rural não variaram praticamente ao longo do tempo e os materiais empregues na construção de edifícios antigos continuaram a ser influenciados pela lo-

calização geográfica da região de implantação dos edifícios. No entanto, os edifícios assim construídos têm expressão reduzida no parque habitacional de Portugal Continental.

Já na evolução histórica da maioria dos edifícios antigos construídos em meios urbanos é possível identificar determinadas épocas marcadas pela incidência de tecnologias construtivas específicas, sendo usual admitir que os principais sistemas construtivos praticados em Lisboa e Porto eram também aplicados nos restantes centros urbanos do País [Pinho, 2000a].

Assim, no universo dos edifícios antigos do parque habitacional de Lisboa é frequente identificar três categorias de processos construtivos delimitados no tempo e espaço [Aguiar *et al.*, 1992; Appleton, 1991; Moreira & Cabrita, 1985; Oliveira, 1983; Oliveira *et al.*, 1985; Silva, 2001; Silva & Soares, 1996 e 1997], (i) os edifícios de alvenaria de pedra anteriores a 1755, (ii) os edifícios de alvenaria da época pombalina e (iii) os edifícios de alvenaria do tipo gaioleiro.

Edifícios pré-pombalinos

Os edifícios existentes em Lisboa que sobreviveram ao terramoto de 1755 são de dois tipos principais [Oliveira *et al.*, 1985 e Santos *et al.*, 1993]: (i) os edifícios nobres e apalaçados, de três e quatro pisos, com paredes de alvenaria, muitas vezes aparelhada, pelo menos nos cunhais e com alguns elementos de travamento caracterizados por uma grande volumetria e área de implantação, destacando-se assim da construção corrente que possuía dimensões exíguas; (ii) a construção em alvenaria pobre, sem elementos de travamento e com pavimentos de madeira, pé-direito baixo, grande densidade de paredes e poucas aberturas para o exterior.

Inclui-se nesta última categoria um pequeno número de edifícios que ainda subsiste nos bairros mais antigos de Lisboa, como as casas de frente estreita com escada de tiro, as de cobertura de duas águas formando fachadas em bico e as de estrutura mista com paredes exteriores de alvenaria de pedra e com tabique nos andares superiores, criando uma fachada lisa ou com um ou mais ressaltos sobre a rua (ver Fig. 5).

Estas tipologias são testemunhos de tipos construtivos medievais no parque habitacional de Portugal. Fernandes [1991] levanta a hipótese esquemática de (i) os prédios com

estrutura mista de alvenaria e madeira terem a sua origem na “arquitectura de madeira” do Norte Europeu surgindo com frequência no Porto, Lamego, Guimarães, Vila Real e Chaves, apresentando elementos de madeira cruzados em fachadas e em paredes resistentes (ver Fig. 6) e (ii) a “arquitectura de alvenaria” ser originária do Sul mediterrânico encontrando-se representada, por exemplo, em Setúbal e Alcácer do Sal, recorrendo a paredes portantes espessas em alvenaria argamassada.

No Norte do Continente, e à semelhança do resto do País, os edifícios urbanos antigos empregam os materiais construtivos correntemente utilizados na região em que se inserem, predominando neste caso o granito e o xisto, formando alvenarias de pedra seca ou argamassada. Por exemplo, na zona de Bragança os materiais usados na construção das paredes exteriores dos edifícios são fundamentalmente a pedra e o barro, sendo o granito, mas principalmente o xisto, as pedras mais abundantes na região [Luso *et al.*, 2003].

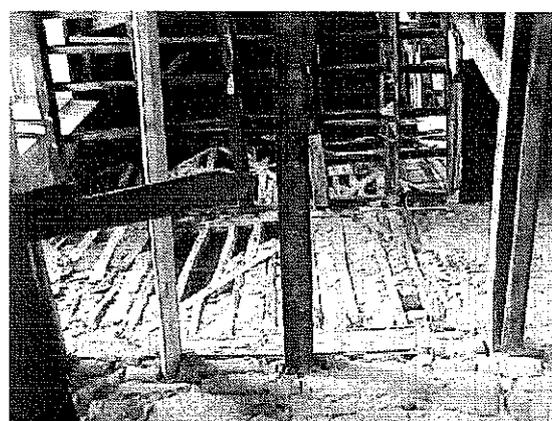
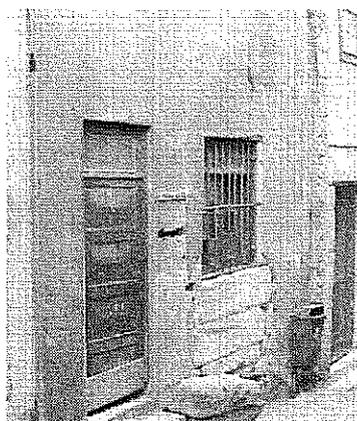
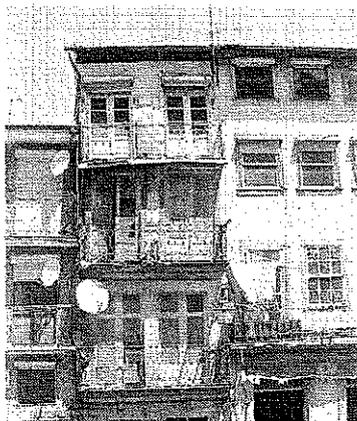


Fig. 6 – Exemplo de edifícios da zona histórica do Porto; centro e direita: edifício com fachada principal realizada em alvenaria de pedra e taipa e pormenor de parede de travamento com elementos de madeira e taipa [Costa, 2001]; classificadas nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919, em mau estado de conservação.

No Porto os edifícios mais antigos que ainda subsistem caracterizam-se por serem estreitos e altos, com estrutura resistente em alvenaria de pedra irregular na qual se apoiam elementos horizontais de madeira que suportam os pavimentos, também em madeira (ver Fig. 6) [Costa, 2001]. No centro histórico do Porto, em edifícios antigos que se supõem anteriores à época pombalina, surgem exemplos de soluções construtivas variáveis ao longo da altura dos edifícios, nomeadamente paredes resistentes em que o primeiro troço é de alvenaria de pedra e a parte superior é constituída por um conjunto de vigas, prumos e diagonais de travamento em madeira, cujos vazios são preenchidos por taipa (ver Fig. 6 centro e direita).

Edifícios pombalinos

A reconstrução pombalina da cidade de Lisboa, depois do terramoto de 1755, é tema incluído em inúmeras publicações pelo carácter inovador de algumas técnicas arquitectónicas e construtivas, em particular a concepção anti-sísmica da gaiola, e pela normalização e aplicação sistemática do projecto de edifícios, da qual é expoente a Baixa pombalina (ver Fig. 7) [e.g. Appleton, 1991 e 1994; Cardoso, 2002; Farinha, 1955 e 1997; França, 1977 e 2000; Mascarenhas, 1994



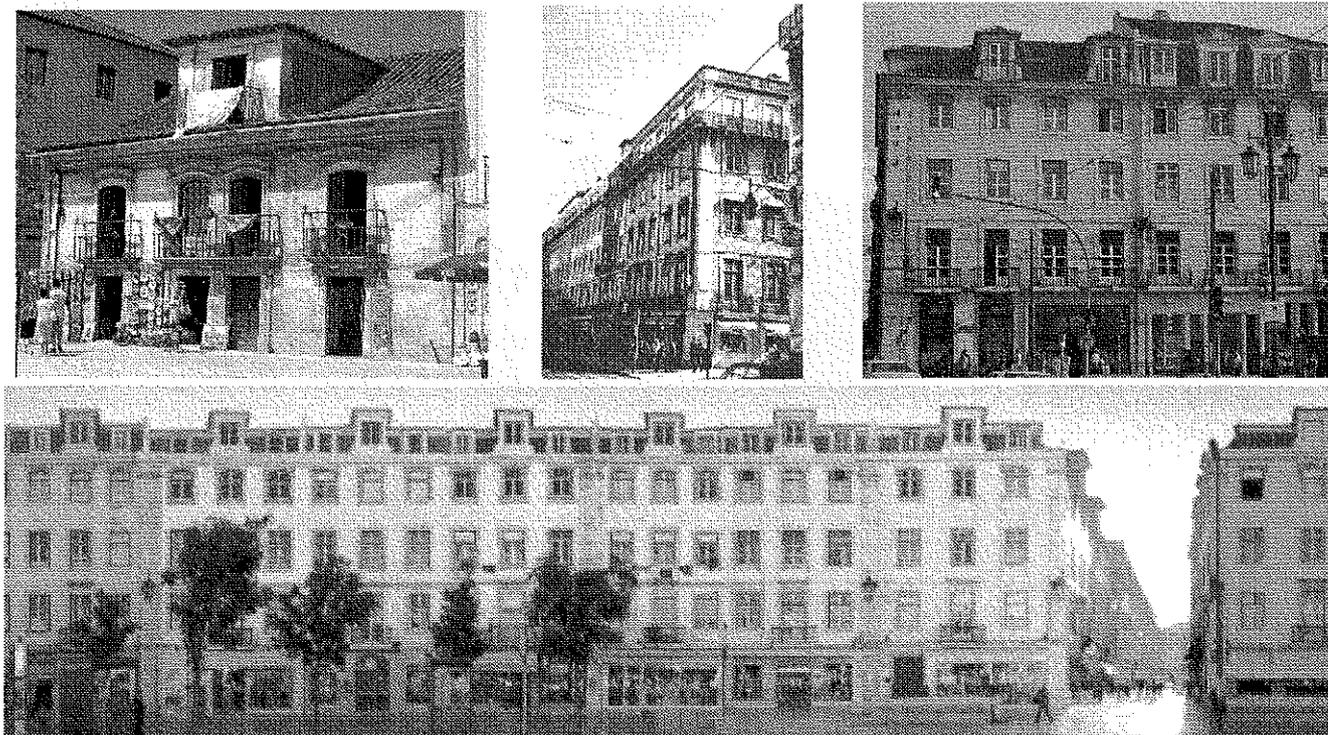
Fig. 5 – Exemplo de edifícios pré-pombalinos na cidade de Lisboa; esquerda: prédio de duas águas de fachada em bico; direita: prédio com ressalto bilateral; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919

e 1997; Mateus, 2002; Pinho, 2000a; Oliveira *et al.*, 1985; Ramos, 2002; Ramos & Lourenço, 2000 e Silveira *et al.*, 2003].

Em Dezembro de 1755, Manuel da Maia, engenheiro-mor do reino, apresenta cinco “modos” possíveis para a reconstrução e renovação urbana da “cidade baixa de Lisboa” [Mascarenhas, 2005].

Entre os engenheiros militares envolvidos no plano aprovado para as novas ruas e edifícios destacam-se Eugénio dos Santos e, mais tarde, depois da sua morte em 1760, Carlos Mardel a quem se deve o projecto do Rossio [França, 2000]

Os projectos das fachadas dos edifícios a serem construídos tinham um traçado padronizado, podendo ser classificados essencialmente em três tipos, com variações ligeiras nos elementos arquitectónicos que diferenciavam os edifícios consoante a importância da rua em que se localizariam [França, 2000 e Mascarenhas, 2005]. Assim, em geral, o “prédio pombalino” era formado por cinco pisos acima do solo, sendo o rés-do-chão dedicado ao comércio e a oficinas diversos. Nos restantes pisos, destinados à habitação, o primeiro andar tinha janelas de sacada, o segundo e terceiro janelas de peito e o último andar era constituído por águas-furtadas.



Fotografia em Monumentos, 2004

Fig. 7 – Exemplo de edifícios pombalinos; em cima à esquerda: edifício localizado em Alcobaça em mau estado de conservação; restantes edifícios localizados em Lisboa; classificados nos Censos 2001 como ASP, anteriores a 1919, com número de pavimentos igual a 3 ou da classe 5 a 7. Todos eles possuem o R/C com espaço interior amplo na sua maior parte devido à existência de lojas

Os edifícios pombalinos assentavam sobre um andar térreo com arcos em pedra ou abóbada de tijolo, fundados em estacaria de madeira [Oliveira *et al.*, 1985]. A gaiola iniciava-se na parte superior das fundações ou a partir do primeiro piso [Farinha, 1955].

Tradicionalmente atribui-se a Mardel a invenção da gaiola, embora França [1977] defenda ser mais natural que esta tenha sido desenvolvida na Casa do Risco. De qualquer forma, deve-se a Mardel a realização de um “ensaio sísmico” desta estrutura visando o aperfeiçoamento da sua segurança face a terremotos. Para o efeito, Mardel mandou construir no Terreiro do Paço uma gaiola sobre um estrado e simulou o movimento vibratório do solo recorrendo à passagem de um destacamento militar em marcha descompassada [França, 1977].

Muito brevemente, a gaiola pombalina, designada à época de “armação”, consiste num sistema tridimensional de pórticos de madeira, envoltos pela alvenaria das paredes ou encostados à sua face interior, que assegura o travamento geral da estrutura [Cardoso, 2002; Farinha, 1955 e Ramos & Lourenço, 2000].

Na Fig. 8 apresenta-se uma fotografia de uma maqueta de uma gaiola pombalina existente no quartel da Companhia de Intervenção Especial do Batalhão de Sapadores de Bombeiros [Farinha, 1997].

De acordo com Farinha [1955], as gaiolas de madeira eram construídas até à cobertura antes do envolvimento pelas alvenarias, resultando a sua denominação da aparência da obra nesta fase da construção. Os frontais faziam parte integrante das gaiolas pombalinas, formando paredes interiores resistentes, também constituídas por uma grade de

madeira embebida na espessura da alvenaria; esta era composta por tijolo ou pedra miúda e com a superfície exterior rebocada [Pinho, 2000a e Silveira *et al.*, 2003]. Os frontais dispunham-se nas duas direcções de simetria do edifício e o seu esqueleto de madeira incluía cruces de Santo André, cuja triangulação concorria para a estabilidade da estrutura [Silveira *et al.*, 2003]. Os elementos de união, que asseguravam a ligação entre a madeira da gaiola e a alvenaria, contribuíam para as interligações entre os vários elementos da estrutura e, segundo Cardoso *et al.* [2001], conferiam ductilidade ao conjunto. Esta ligação entre paredes e pavimentos, assegurada pela gaiola, é outro dos factores que aumentam a capacidade resistente destes edifícios face aos sismos.



Fig. 8 – Maqueta de uma gaiola pombalina [Farinha, 1997]

Muitos edifícios pombalinos foram sujeitos a modificações após a sua construção, salientando-se a ampliação dos edifícios em altura, as alterações da compartimentação interior com eliminação de paredes, a abertura de fachadas dos andares comerciais, a construção de caves, etc. [Appleton, 1994]. Algumas destas intervenções comprometeram certamente a estabilidade e solidarização da estrutura, podendo colocar em causa a sua capacidade de resistir a um sismo.

No norte do Continente português não se verifica uma descontinuidade marcada entre os edifícios construídos antes e depois do Terramoto. Com efeito, apesar de os processos construtivos praticados em Lisboa serem usualmente exportados para os restantes centros urbanos de Portugal, a tipologia pombalina não tem expressão no Norte do Continente, pois esta região foi menos afectada pelo sismo de 1755.

Época gaioleira

Como é sabido, a reconstrução da cidade de Lisboa demorou quase um século, prolongando-se até meados do século XIX. Ao longo deste período, e devido à inexistência de sismos destrutivos em Portugal Continental, a percepção do risco e a preocupação com a segurança e qualidade da construção diminuiu progressivamente. Entra-se assim num período de transição identificado, no final do século XIX, como época construtiva distinta, a época gaioleira [Oliveira *et al.*, 1985].

Nesta época, que cobre *grossa modo* o último quartel do século XIX e o primeiro do século XX, as exigências

da construção pombalina deixaram de ser cumpridas tendo-se verificado a adulteração e a simplificação da gaiola de madeira, sendo a fase em que construtores, apelidados de “gaioleiros”, generalizaram sistemas construtivos de pouco rigor e qualidade. Esta designação pode ser entendida como um “termo depreciativo da palavra gaiola” [Pinho, 2000], acabando por se vulgarizar para denominar o tipo de edifícios construídos neste período [Appleton, 2005].

Com efeito, a falta de qualidade do projecto e construção em Lisboa era de tal monta que levou, em 1909, Pereira de Sousa [citado por Farinha, 1955] a referir-se ao facto com indignação: “É necessário acabar, em prol da Pátria e da Humanidade, com essa quase liberdade de construção em Lisboa”. Autores mais recentes [Appleton, 1991] apelidam os edifícios gaioleiros de “desastre construtivo” (ver Fig. 9).

A época construtiva dos edifícios gaioleiros é caracterizada por um acréscimo do número de pisos relativamente aos pombalinos (um ou dois), um aumento na altura dos pés-direitos, um aligeiramento das secções das paredes resistentes e uma remoção gradual dos elementos de madeira [Cardoso, 2002; Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1997]. Os edifícios são constituídos por paredes de alvenaria de pedra de fraca qualidade, tijolo maciço ou de dois furos e por pavimentos de madeira, verificando-se um decréscimo na espessura das paredes resistentes quando se sobe de andar para andar. Apresentam, por vezes, elementos decorativos muito pesados e a sua grande profundidade exige a presença de saguões.



Fig. 9 – Exemplos de edifícios gaioleiros; em cima: fachadas e tardo de gaioleiros localizados em Lisboa; em baixo: interior de gaioleiro em Lisboa e fachadas em Lagos e na Figueira da Foz; classificados nos Censos 2001 como ASP



Fig. 10 – Exemplo de edifícios antigos na região Norte do território continental; esquerda: edifícios localizados em Guimarães; centro: correnteza de edifícios no centro histórico do Porto; direita: estrutura de prédios geminados [Amaral & Aguilar, 2005]; classificados nos Censos 2001 como ASP

Os gaioleiros sofrem de graves insuficiências de contraventamento e de falta de solidarização dos elementos estruturais [Pinho, 2000a; Silva & Soares, 1996 e 1997]. Neste tipo de edifícios as paredes divisórias cumprem um papel muito importante no contraventamento da estrutura face à acção dos sismos.

Em meados do século XIX são introduzidos novos materiais industriais, permitindo construir as marquises de ferro nas traseiras dos edifícios gaioleiros, e utilizar elementos de suporte metálicos nos pisos térreos [Fernandes, 1985 e Oliveira *et al.*, 1985]. A susceptibilidade dos elementos metálicos à corrosão contribuiu para que muitos destes edifícios se encontrem actualmente em mau estado de conservação.

Os edifícios gaioleiros estão representados em muitas zonas de Lisboa, por exemplo na Av. Almirante de Reis, em Campo de Ourique, e nas Avenidas Novas [Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1996], surgindo também com frequência noutros centros urbanos do País. De facto, ao contrário dos pombalinos os edifícios gaioleiros estão representados em todo o território continental, diferenciando-se de região para região primordialmente pelo tipo de alvenaria empregue na sua construção.

As características gerais dos edifícios construídos na época gaioleira no Norte do território continental são as seguintes: pisos térreos com paredes em cantaria de granito, restantes pisos com elementos de cantaria nos cunhais e a circundar as aberturas das portas e janelas, cornijas em cantaria (ver Fig. 10 esquerda). Nesta região os edifícios desta época construtiva caracterizam-se por terem um menor número de pavimentos que os localizados em Lisboa e por apresentarem frentes marcadamente estreitas [Amaral & Aguilar, 2005].

Em particular, as casas burguesas portuenses do século XIX apresentam algumas características construtivas que fazem lembrar as dos edifícios gaioleiros, nomeadamente a alvenaria de pedra nas paredes resistentes com espessura variável em altura. À semelhança do que foi atrás referido, as paredes de compartimentação destes edifícios, realizadas normalmente em tabique, desempenham um papel fundamental no travamento geral da estrutura para forças horizontais.

De acordo Amaral & Aguilar [2005], no centro histórico do Porto estes edifícios estão integrados numa designada macro-estrutura, constituída por uma correnteza de casas contíguas, que partilham paredes de carga (meeiras), sendo travadas pelas fachadas e por elementos horizontais de madeira, orientados na direcção do menor vão (ver Fig. 10 centro e direita).

5. EDIFÍCIOS DE ALVENARIA COM ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO

Edifícios “de placa”

Em 1930, o Regulamento Geral de Construção Urbana para a cidade de Lisboa (postura camarária aprovada a 28 de Agosto de 1930) aconselha o emprego de elementos de betão armado para garantir o travamento das alvenarias quando não é empregue a armação de madeira (gaiola). O artigo 59º deste regulamento referia que “em todos os prédios de mais de 2 pisos, incluindo caves, cujos pavimentos não sejam em betão armado, devem ser construídas cintas com este material em todos os andares, entre o nível das vergas das janelas e o piso do pavimento imediatamente superior”.

O Regulamento mencionado deverá retratar os processos construtivos praticados na época, assinalando o fim de um período de cerca de 180 anos em que se aplicaram as técnicas pombalinas, ao que se seguiu a sua decadência gradual até aos edifícios gaioleiros e se iniciou o emprego gradual de elementos de betão armado [Appleton, 1991 e Farinha, 1955].

Esta data coincide assim com o início de um período de transição entre os edifícios de alvenaria e os de betão armado, individualizando-se uma quarta tipologia de edifícios nos centros urbanos [Silva & Soares, 1996]: os edifícios “de placa”, também designados de edifícios mistos de alvenaria e betão armado [Oliveira *et al.*, 1985].

Os edifícios “de placa”, característicos do período construtivo do Estado Novo, nas décadas de 30 e 40 do século XX, (ver Fig. 11), são essencialmente constituídos por paredes exteriores de alvenaria de pedra, de qualidade razoável, paredes interiores de alvenaria de tijolo e recorrem a lajes maciças de betão armado.

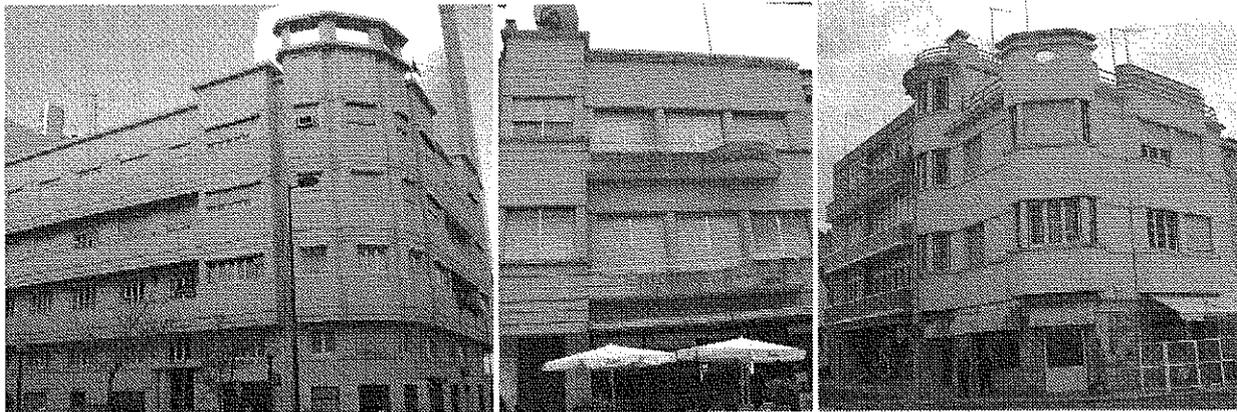


Fig. 11 – Exemplo de edifícios de “placa”; da esquerda para a direita: edifícios localizados em Lisboa, Alcobaça e Nazaré, respectivamente; classificados nos Censos 2001 como ACP; da esquerda para a direita: edifícios das classes 5 a 7 pavimentos, 4 pavimentos e 3 pavimentos, respectivamente; os edifícios no centro e à direita possuem R/C com espaço interior amplo na sua maior parte

Porém, a transição entre os edifícios gaioleiros e os “de placa” passou por várias fases em que os elementos de betão armado foram abrangendo sucessivamente uma maior área dos seus pavimentos.

Inicialmente, como refere o Regulamento de 1930, o betão existia apenas nas cintas, muitas vezes com armadura longitudinal constituída por ferros $4\phi 3/8$ ”, um em cada canto da cinta, apresentando estribos $\phi 3/16$ ” tipicamente espaçados de 20 cm. Posteriormente, começou a ser usado como laje na zona posterior da cozinha e varandas, para finalmente se estender a toda a área dos pavimentos. As lajes dos edifícios “de placa” comportam-se como diafragmas rígidos, assegurando um bom travamento horizontal, sendo a principal deficiência apontada a este tipo de edifícios a insuficiência de elementos verticais resistentes ao corte e à flexão [Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1996]. De facto, os elementos verticais de betão armado começaram a aparecer timidamente nos cantos salientes das fachadas de tardo (pilares muitas vezes $4\phi 5/16$ ” com cintas $\phi 3/16$ ” espaçadas de 25 cm) e só mais tarde se estendem também à fachada principal. Entretanto, na zona do rés-do-chão e cave já se vêem muitos elementos de betão armado, principalmente vigas, usadas para dar lugar a vãos maiores destinados à entrada do edifício ou a lojas.

Na cidade de Lisboa, este tipo de edifícios predomina nos bairros de Alvalade, Arco do Cego, Alameda D. Afonso Henriques, Areeiro, Encarnação, etc. [Oliveira *et al.*, 1985 e Silva & Soares, 1996].

Edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada

Em meados do século XX, a evolução dos edifícios de médio e grande porte conduziu à extensão do uso do betão armado à totalidade da estrutura, tal como se descreverá na secção 6.

Por outro lado, os edifícios de pequeno porte são fundamentalmente construídos em alvenaria, tendo-se divulgado a utilização de materiais industriais, como o tijolo cerâmico industrial, a alvenaria de blocos de betão, que substituíram, mesmo em zonas rurais, os materiais naturais e pouco transformados originários da região de implantação dos edifícios [Appleton, 1991].

Actualmente, não foram revogados os artigos do RSCCS [1958] que se referem a este tipo de estruturas, designadamente os seus artigos 10º e 21º que dispensam o dimensionamento para as acções sísmicas de alguns edifícios de pequeno porte, preconizando, em alternativa, regras de construção simples aplicáveis a alguns casos. O reconhecimento de que tais artigos estavam tecnicamente desactualizados conduziu a que o LNEC apresentasse, em 1990, as regras práticas para a verificação da segurança em relação à acção dos sismos de edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada [Carvalho & Oliveira, 1999].

Os edifícios de pequeno porte de alvenaria, com elementos de confinamento em betão armado (ver Fig. 12), correspondem a um tipo de construção que, na actualidade, tem grande expressão de norte a sul de Portugal Continental.

Segundo Carvalho & Oliveira [1999], os tipos mais comuns de pavimentos utilizados neste tipo de construção são as lajes de betão armado maciças ou aligeiradas e as lajes incorporando elementos pré-fabricados (vigotas ou pranchas pré-esforçadas e blocos cerâmicos ou de betão. De acordo com os mesmos autores, as coberturas são normalmente em telhado com asnas de madeira e telhas assentes sobre ripas.

O sistema estrutural das construções de alvenaria de pequeno porte confere-lhes normalmente grande rigidez, sendo composto essencialmente por paredes resistentes ortogonais em alvenaria, com alguns elementos de confinamento em betão armado horizontais e verticais, que em conjunto com os pavimentos e a cobertura deverão transmitir às fundações as cargas verticais e as forças de inércia horizontais induzidas por um sismo [Carvalho & Oliveira, 1999 e Coelho, 2003].

A condição essencial para que este tipo de edifícios não exiba grande vulnerabilidade à acção dos sismos são as boas ligações entre os seus elementos, para garantir que se mantenham solidários quando actuados pela vibração. Carvalho & Oliveira [1999] recomendam a introdução dos referidos elementos de travamento em betão armado, verticais (montantes) e horizontais (lintéis) e de reforços em torno das aberturas nas paredes, ressaltando, mais uma vez, a necessidade de assegurar uma boa solidarização entre os panos de alvenaria e os elementos de betão armado.



Fig. 12 – Exemplo de edifícios de pequeno porte de alvenaria confinada no concelho de Anadia; classificados nos Censos 2001 como ACP com 2 pavimentos; esquerda: edifício da época 1945-60 ou 1961-70; direita: edifício posterior a 2001

São assinalados outros factores que contribuem para diminuir a capacidade de este tipo de construções resistir a sismos, nomeadamente a fraca qualidade das alvenarias, deficiências nas fundações, falhas na construção dos elementos de betão armado, a existência de irregularidades em planta e altura, alterações na estrutura ou insuficiências do seu projecto, etc. [Carvalho & Oliveira, 1999 e Coelho, 2003].

6. EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA DE BETÃO ARMADO

Os regulamentos sismo-resistentes desempenham um papel fundamental na evolução dos edifícios de betão armado, identificando-se três grandes grupos de edifícios, (i) os anteriores aos regulamentos sismo-resistentes, (ii) os posteriores ao RSCCS [1958] e anteriores ao RSA [1983] e (iii) os edifícios posteriores ao RSA [1983].

Edifícios de BA anteriores aos regulamentos

O aparecimento de sistemas estruturais de betão armado aplicados ao parque habitacional de Portugal remonta às décadas de 30 e 40 do século XX, passando a ter expressão significativa apenas na década de 50 desse século.

A afirmação dos sistemas construtivos de betão armado, além de promover o abandono progressivo das técnicas tradicionais ligadas aos materiais da região de implantação dos edifícios, conduziu à substituição destas técnicas por soluções construtivas marcadas por grande uniformidade de norte a sul do Continente.

Assim, a década de 50 do século XX é caracterizada por edifícios em pórtico de betão armado, preenchidos com grande percentagem de alvenaria de tijolo furado, nas paredes exteriores, e divisórias interiores, e com pavimentos constituídos por lajes maciças de betão armado [Oliveira *et al.*, 1985]. Estes edifícios, não sendo dimensionados para resistir a sismos, serão em geral mais vulneráveis que os seus sucessores, mas, devido à configuração monolítica da sua estrutura, serão menos vulneráveis que os “de placa”.

Edifícios de BA posteriores ao RSCCS e anteriores ao RSA

Nas épocas mais recentes, mais concretamente desde a entrada em vigor do primeiro regulamento sismo-resistente

moderno [RSCCS, 1958], a localização geográfica dos edifícios obriga a diferentes disposições de dimensionamento, sendo imposta uma resistência crescente, *grosso modo* do norte para o sul do território continental, mais concretamente segundo as zonas sísmicas regulamentares. Assim se tenta assegurar uma situação de igual risco para todos os habitantes do território continental em conformidade com o aumento da perigosidade sísmica também do norte para o sul desse território.

O aumento da altura dos edifícios e o cumprimento das exigências de segurança regulamentares em relação aos sismos conduziram à utilização de elementos verticais de grande rigidez, generalizadamente aplicados nas caixas de escada e de elevadores [Oliveira *et al.*, 1985].

Deste modo, para além das estruturas em pórtico constituídas por pilares, vigas e lajes, surgem as paredes resistentes ligadas a pisos, constituídos por vigas e lajes, e as estruturas mistas que associam pórticos e paredes resistentes [Coelho, 2003].

De uma forma simples, um dos factores que distinguem os edifícios de betão armado construídos durante o período de vigência do RSCCS [1958] (Fig. 13 à esquerda) dos construídos depois da entrada em vigor do RSA [1983] (Fig. 13 ao centro e à direita) é que os primeiros são dimensionados por forma a resistirem a esforços horizontais menores do que os prescritos no RSA. Efectivamente, reconhece-se, actualmente, que os níveis da acção sísmica recomendados no RSCCS são baixos face à sismicidade potencial de algumas zonas de Portugal Continental.

Edifícios de BA posteriores ao RSA

Consequentemente, no regulamento actual, os valores dos coeficientes sísmicos de projecto são superiores aos do RSCCS, obrigando a uma maior resistência dos edifícios.

Além disso, o RSA introduz a possibilidade de dimensionamento “em ductilidade”, obrigando a um maior grau de exigência ao nível da pormenorização das armaduras longitudinais e principalmente da cintagem nas zonas críticas [Gomes & Brito, 1996].

O comprimento dos varões das armaduras longitudinais também sofreu um acréscimo no novo regulamento para assegurar uma ancoragem adequada, particularmente nos nós viga-pilar, melhorando assim a ductilidade global das estruturas.

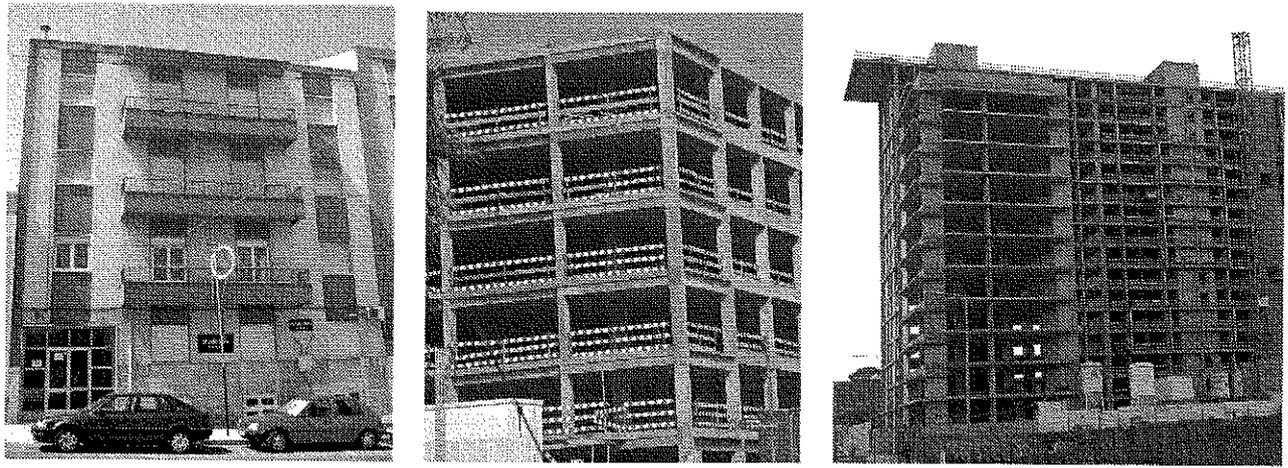


Fig. 13 – Exemplo de edifícios de BA; esquerda: prédio da época 1961-70 localizado em Alcobça; centro: estrutura em pórtico posterior a 2001, localizada em Lisboa; direita: estrutura mista pórtico-parede, com lajes fungiformes, posterior a 2001, situada em Lisboa

As regras de dimensionamento mais recentes [RSA, 1983 e CEN, 2004] determinam ainda que nas estruturas em pórtico a resistência dos pilares seja superior à das vigas que com eles se cruzam, por forma a assegurar que quando da ocorrência de um sismo os pilares não rompem antes das vigas, comprometendo assim a estabilidade global da estrutura [Coelho, 2003].

Finalmente, na década de 90 do século XX generalizou-se o uso de novos sistemas estruturais baseados em soluções adoptadas no Norte da Europa, nomeadamente o emprego de lajes fungiformes na construção dos edifícios de betão armado (Fig. 13 à direita). O estudo do comportamento sísmico deste tipo de estruturas não está ainda muito desenvolvido, sendo alvo de projectos de investigação iniciados recentemente [Coelho *et al.*, 2004a e Coelho *et al.*, 2004b] e não estando ainda incluído de forma completa e explícita na actual regulamentação.

7. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO PARQUE HABITACIONAL

A classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional tem que satisfazer, em simultâneo, a pelo menos três compromissos: (i) o de se adaptar ao inventário disponível dos elementos em risco que, tal como foi reportado na secção 2, se baseou em informação seleccionada dos Censos 2001 (ii) o de se adequar à realidade construtiva de Portugal Continental, descrita nas secções 3 a 6, e (iii) o de coincidir com as classes de vulnerabilidade ou com as tipologias construtivas definidas nos métodos de avaliação de danos adoptados na análise do risco sísmico.

Resta assim abordar o terceiro compromisso, o de classificar o parque habitacional de forma consentânea com os critérios dos métodos de avaliação de danos, conduzindo assim à caracterização da sua vulnerabilidade sísmica.

Devido à extensão do trabalho efectuado, no que respeita à classificação e caracterização da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional, ele será apenas abordado de forma

resumida e com o recurso a alguns exemplos ilustrativos. Detalhes sobre esta classificação e caracterização podem ser encontrados em Sousa [2006] e serão objecto de publicação futura.

Para a análise do risco sísmico utilizaram-se dois tipos de métodos de avaliação de danos. Um método do tipo mecanicista [FEMA & NIBS, 1999] e quatro métodos do tipo estatístico [Di Pasquale & Orsini, 1997; Giovinazzi & Lagomarsino, 2003; Tiedemann, 1992 e Zuccaro & Papa, 2002].

O método mecanicista é baseado no método do espectro de capacidade [ATC, 1996, FEMA & NIBS, 1999 e Freeman, 1999] em que a capacidade resistente dos edifícios é comparada com um espectro de solicitação reduzido, para se obter o chamado ponto de desempenho ou o ponto de resposta máxima do edifício (ver Fig. 14). A abcissa desse ponto de desempenho corresponde à acção sísmica que condiciona as funções de distribuição cumulativas que traduzem a fragilidade sísmica dos edifícios (ver exemplo na Fig. 15).

Os métodos estatísticos baseiam-se na inspecção de um grande número de estruturas, sendo procedente corrente utilizar distribuições de probabilidade teóricas para descrever as estatísticas recolhidas em levantamentos de dano pós-sismo e assim se construir matrizes de probabilidade de dano válidas para edifícios pertencentes a uma dada classe de vulnerabilidade ou a uma tipologia construtiva (ver Fig. 16).

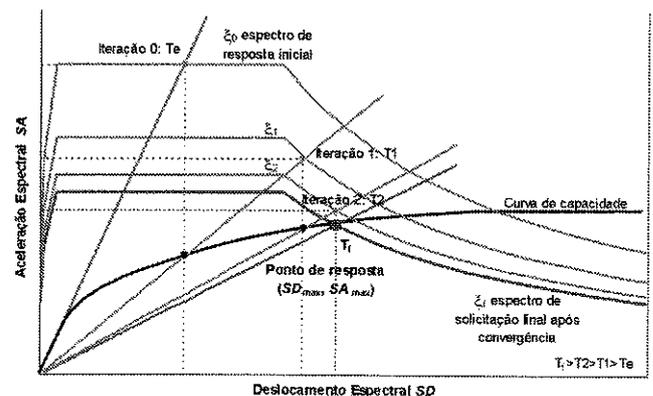


Fig. 14 – Procedimento iterativo conducente à determinação da resposta máxima do edifício

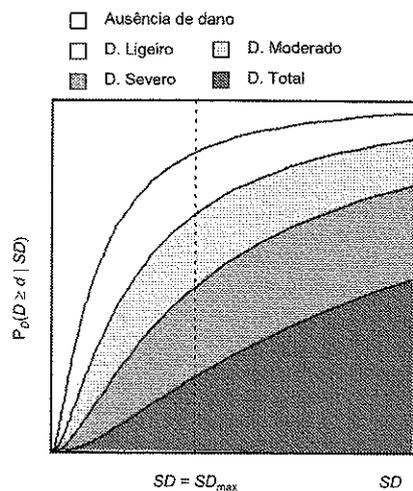


Fig. 15 - Curvas de fragilidade para cinco estados de dano

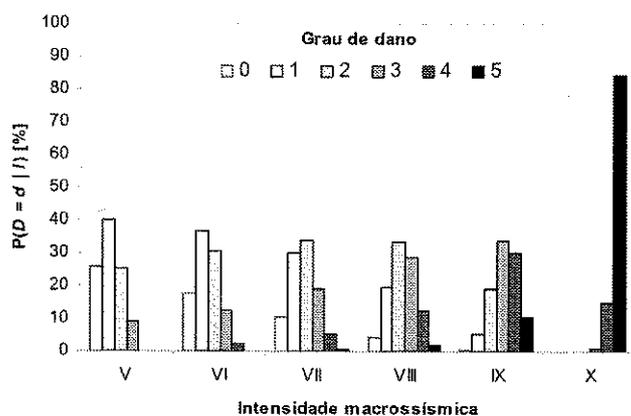


Fig. 16 - Matrizes de probabilidade de dano para a classe de vulnerabilidade A (edifícios de alvenaria de pedra solta, adobe, argila, e casas rurais) do modelo de dano de Di Pasquale & Orsini [1997]

Para classificar a vulnerabilidade sísmica dos edifícios os métodos estatísticos recorrem a classes pré-definidas, que, no caso dos modelos de danos de Di Pasquale & Orsini [1997] e de Zuccaro & Papa [2002], correspondem às quatro classes de vulnerabilidade da escala macrosísmica MSK e, no caso do modelo de danos de Giovinazzi & Lagomarsino [2003], correspondem às seis classes de vulnerabilidade da escala EM-98, subdivididas em 15 tipos de estruturas de acordo com o respectivo quadro de vulnerabilidade.

O método mecanicista FEMA & NIBS também classifica os edifícios em tipologias construtivas mas, ao contrário dos métodos estatísticos, não obriga a uma divisão do parque em classes pré-definidas, o que oferece grande liberdade para a construção de classes tipológicas capazes de enquadrar as principais práticas construtivas do continente português. Assim, tendo em consideração os cruzamentos dos factores de vulnerabilidade apurados nos Censos 2001 (ver Quadros I e II) foi possível identificar 49 tipologias construtivas, com curvas de capacidade e fragilidade diferenciadas. Note-se, porém, que a calibração dos parâmetros utilizados no método mecanicista de forma a torná-los adequados ao parque habitacional de Portugal Continental se revelou uma tarefa complexa.

8. CONCLUSÕES

A principal conclusão a retirar sobre as características do parque habitacional de Portugal Continental é que a generalização do emprego do betão armado introduziu alterações significativas nos processos construtivos do País, não só pela sua utilização como sistema estrutural, como também pelas suas implicações nos sistemas construtivos de alvenaria.

Os Censos 2001 não estão directamente vocacionados para estudos de avaliação da vulnerabilidade sísmica. Porém, foi possível enquadrar os principais sistemas construtivos existentes no parque habitacional de Portugal Continental nas tipologias Censos 2001, pelo que se pode afirmar que o IV Recenseamento Geral da Habitação em 2001 tem a capacidade de fornecer, pela primeira vez, um panorama quantitativo global do qual se podem inferir as características da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do País.

Avaliando globalmente as vantagens e desvantagens dos dois grandes conjuntos de métodos de avaliação de danos em consequência de sismos pode afirmar-se que na passagem da abordagem mecanicista para a estatística se perde o detalhe da modelação física e matemática do comportamento estrutural [Braga *et al.*, 1982], mas, em contrapartida, aumenta a capacidade de tratamento de amostras de grandes dimensões e a capacidade de validar os modelos através da observação de danos em grandes populações de estruturas.

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

Os métodos mecanicistas, se bem que de difícil calibração, têm a vantagem de recorrerem a critérios mecânicos para definir a capacidade estrutural dos edifícios e reproduzir o seu comportamento físico esperado, aliada ao facto de se basearem geralmente numa acção sísmica traduzida por um espectro de resposta, o que permite ter em consideração a relação entre o conteúdo em frequência do movimento e o período dominante de vibração dos edifícios [Calvi *et al.*, 2005].

Todos os métodos de avaliação de danos referidos foram implementados no Simulador de Cenários Sísmicos, LNECloss [Sousa *et al.*, 2006]. Para permitir a aplicação destes métodos ao parque habitacional de Portugal Continental a vulnerabilidade sísmica deste parque foi classificada e caracterizada de acordo com os critérios dos métodos de avaliação de danos. Os quantitativos de edifícios assim classificados foram organizados numa base de dados posteriormente integrada no Sistema de Informação Geográfica subjacente ao Simulador.

Desta forma, é possível modelar, numa qualquer parcela do Continente Português, os danos no edificado em consequência de um ou mais cenários sísmicos de ocorrência especificados, o que constitui uma primeira etapa no processo de avaliação do risco sísmico de Portugal Continental [Sousa, 2006].

9. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Engenheira Ema Coelho do LNEC as suas sugestões pertinentes para a realização deste trabalho e ao Engenheiro Cansado Carvalho do GAPRES a sua participação no delineamento dos apuramentos do parque habitacional solicitados ao INE.

Agradece-se à Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas a autorização para a publicação do presente artigo, ainda em fase de submissão, na World Housing Encyclopedia, www.world-housing.net.

10. REFERÊNCIAS

- Aguilar, J., Oliveira, C.S., Cabrita, A.R. & Duarte, V., 1992 – *Análise do parque habitacional de Lisboa. Levantamento da zona Ribeirinha – sector Ocidental. Doc. 2 - Apresentação de resultados*. Relatório DED/NA. LNEC, Lisboa.
- Amaral, F.S. & Aguilar, J.A.M., 2005 – *Avaliação sumária do estado estrutural e construtivo do prédio n.º 102 104 da R. da Bainharia no Porto*. Tese de Mestrado em Metodologias de Intervenção no Património Arquitectónico. Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Porto.
- Appleton, J., 1991 – *Edifícios antigos. Contribuição para o estudo do seu comportamento e das acções de reabilitação a empreender*. Programa de Investigação Edifícios. LNEC, Lisboa.
- Appleton, J., 1994 – “Passado, presente e futuro da Lisboa pombalina”. 2.º ENCORE. LNEC, Lisboa. pp. 517-527.
- Appleton, J., 2001 – “O megassismo de Lisboa no século XXI ou vulnerabilidade sísmica do parque edificado de Lisboa”. *Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado*. Edição da Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) e do Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico (GECORPA). Ordem dos Engenheiros, Lisboa. pp. 95-104.
- Appleton, J.G., 2005 – *Reabilitação de edifícios «gaioleiros» – um quarteirão em Lisboa*. Edições Orion. Amadora.
- ATC, 1996 – *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Relatório n.º SSC 96 01, Applied Technology Council, ATC 40. Redwood City, Califórnia.
- Braga, F., Dolce, M. & Liberatore, D., 1982 – “A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale”. 7ECEE. Atenas. pp. 431-450.
- Calvi, G.M., Magenes, G. & Pinho, R., 2005 – *Displacement based methods to predict earthquake damage at variable geographical scales*. Conferência Internacional, 250th Anniversary of 1755 Lisbon Earthquake. Lisboa. pp. 147-159.
- Cardoso, R., 2002 – *Vulnerabilidade sísmica de estruturas antigas de alvenaria – Aplicação a um edifício pombalino*. Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas. IST, UTL, Lisboa.
- Carvalho, E.C. & Oliveira, C.S., 1999 – *Construção anti-sísmica. Edifícios de pequeno porte*. 2.ª Edição. ICT. Informação Técnica. Estruturas. DIT 13. LNEC, Lisboa.
- CEN, 2004 – *EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Comité Européen de Normalisation, Bruxelas.
- Coelho, E., 2003 – “Reabilitação sísmica de estruturas de edifícios”. 3.º ENCORE. LNEC, Lisboa. pp. 1119-1128.
- Coelho, E., Candeias, P., Anamateros, G., Pinto, A.V., Tau- cer, F. & Zaharia, R., 2004a – “Comportamento sísmico experimental de edifícios de betão armado com lajes fungiformes”. 6ESES. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. pp. 661-670.
- Coelho, E., Candeias, P., Anamateros, G., Zaharia, R., Tau- cer, F. & Pinto, A.V., 2004b – “Assessment of the seismic behaviour of RC flat slab building structures”. 13WCEE, Vancouver. Artigo n.º 2630.
- Costa, A., 2000 – “Caracterização das propriedades mecânicas das paredes de alvenaria tradicional das casas da ilha do Faial, Açores”. REPAR. LNEC, Lisboa.
- Costa, A., 2001 – *Reabilitação do edifício da Rua Santana, n.º 25, Porto*. Relatório do Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Di Pasquale, G. & Orsini, G., 1997 – *Poposta per la valutazione di scenari di danno conseguenti as un evento sismico a partire dai dati ISTAT*. 8 Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia. Palermo.
- Farinha, J. S. B., 1955 – “Acção dos sismos sobre as construções”. *Simpósio sobre a acção dos sismos e a sua consideração no cálculo das construções*. Memória n.º 112. Boletim da Ordem dos Engenheiros, n.º 22, Lisboa.
- Farinha, J. S. B., 1997 – *Construção da baixa pombalina*. Cadernos do Metropolitano, Caderno n.º 6. Metropolitano de Lisboa, Lisboa.
- FEMA & NIBS, 1999 – *Earthquake loss estimation methodology – HAZUS 99*. Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC.
- Fernandes, J. M., 1985 – *Tipologias construtivas na arquitectura doméstica em Portugal – resumo histórico*. 1.º ENCORE. LNEC, Lisboa.
- Fernandes, J. M., 1991 – *A arquitectura. Síntese da cultura portuguesa*. Comissariado para a Europália 91 – Portugal. Imprensa Nacional – Casa da Moeda, Lisboa.
- Ferreira, C. A., 1989 – *Betão, a idade da descoberta*. Passado Presente, Lisboa.
- Ferreira, C. A., 1991 – “As origens do betão armado em Portugal e o registo de patente de François Hennebique”. Comunicação apresentada à Academia Nacional de Belas-Artes, Lisboa.
- França, J. A., 1977 – *Lisboa pombalina e o iluminismo*. 2.ª Edição. Livraria Bertrand, Lisboa.
- França, J. A., 2000 – *Lisboa: urbanismo e arquitectura*. 4.ª Edição. Livros Horizonte, Lisboa.
- Freeman, S.A., 1999 – *The capacity spectrum method as a tool for seismic design*. 11ECEE. Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.

- Giovinazzi, S. & Lagomarsino, S., 2003 - "Seismic risk analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas". European Safety and Reliability Conference. Maastricht.
- INE, 2002 - *Recenseamento da população e da habitação (Portugal) - Censos 2001*. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.
- INE, 2003 - *Censos 2001 Programa global*. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.
<http://www.ine.pt/censos2001/censos.asp>.
- Luso, E., Lourenço, P.B. & Almeida, M., 2003 - "Tratamento de paredes de alvenaria antiga com problemas de humidade ascensional". 3º ENCORE. LNEC, Lisboa. pp. 813-821.
- Mascarenhas, J. M. D., 1994 - "Baixa pombalina, algumas inovações técnicas". 2º ENCORE. LNEC, Lisboa. pp. 713-721.
- Mascarenhas, J., 1997 - "Evolução do sistema construtivo dos edifícios de rendimento da baixa pombalina em Lisboa, relacionada com as condições sísmicas do local". 3ESES. IST, Lisboa. pp. 555-562.
- Mascarenhas, A. J. M., 2005 - "O terramoto de 1755. Os engenheiros militares e a reconstrução de Lisboa". *Ingenium*. II Série, nº 89, Lisboa. pp. 34-38.
- Mateus, J. M., 2002 - *Técnicas tradicionais de construção de alvenarias. A literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos*. Livros Horizonte, Lisboa.
- Moreira, J. G. & Cabrita, A. M. R., 1985 - "Proposta de ficha de inquérito para aplicar a uma amostra representativa do parque habitacional de Lisboa". 1º ENCORE. LNEC, Lisboa.
- Oliveira, C. S., 1983 - "Programa de ações para minimização do risco sísmico - Fase I." 1.º Relatório final. LNEC, Lisboa.
- Oliveira, C. S., Gaspar, J. & Correia, F., 1985 - "Levantamento do parque habitacional de Lisboa. Vol. 1 - Ficha-inquérito. Apuramento de resultados na zona da Alameda D. Afonso Henriques, freguesias de Alto do Pina, S. João de Deus e S. Jorge de Arroios". Nota técnica. LNEC, Lisboa.
- Paiva, J.V., Carvalho, E.C. & Silva, A.C., 1985 - "Patologia da construção". Documento introdutório do Tema 3 do 1º ENCORE. LNEC, Lisboa.
- Pinho, A., 2000a - *Paredes de edifícios antigos em Portugal*. LNEC, Lisboa.
- Pinho, A., 2000b - *Soluções construtivas de paredes de edifícios antigos em Portugal*. REPAR. LNEC, Lisboa.
- Ramos, L., 2002 - *Análise experimental e numérica de estruturas históricas de alvenaria*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Ramos, L. & Lourenço, P. B., 2000 - "Análise das técnicas de construção pombalina e apreciação do estado de conservação estrutural do quarteirão do Martinho da Arcada". Engenharia Civil, nº 7. Universidade do Minho, Guimarães. pp. 35-46.
- Roque, J.C.A & Lourenço, P.B., 2003 - "Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria". 3º ENCORE. LNEC, Lisboa. pp. 907-916.
- RSA, 1983 - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-Lei nº 235/83 de 31 de Maio e Decreto-Lei nº 357/85 de 2 de Setembro. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1986, Lisboa.
- RSCCS, 1958 - Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos. Decreto nº 41 658. Imprensa Nacional, Lisboa.
- Santos, N., Cunha, R., Alves, R. & Rodeia, T., 1993 - *A arquitectura e os processos construtivos entre os séculos XVI e meados de XVIII*. Nota Técnica nº 1/93-NDA. LNEC, Lisboa.
- Silva, V.C., 2001 - "Viabilidade técnica de execução do "Programa Nacional de Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado"". *Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado*. Edição da Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) e do Grémio das Empresas de Conservação e Restauro do Património Arquitectónico (GECORPA). Ordem dos Engenheiros, Lisboa. pp. 15-56.
- Silva, V.C. & Soares, I., 1996 - "Utilização do betão armado no reforço sísmico de edifícios de alvenaria. Caso dos edifícios "de placa"". *Betão Estrutural*, 6.º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas. LNEC, Lisboa. pp. 2-127-2-146.
- Silva, V.C. & Soares, I., 1997 - "Vulnerabilidade sísmica dos edifícios "gaioleiros" de Lisboa e medidas possíveis para a reduzir". 3ESES. IST, Lisboa. pp. 563-572.
- Silveira, P.M., Veiga, R. & Brito, J., 2003 - "Paredes estucadas em edifícios antigos". 3º ENCORE. LNEC, Lisboa. pp. 519-527.
- Sousa, M. L., 2006 - *Risco sísmico em Portugal Continental*. Tese de doutoramento em Engenharia do Território. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Sousa, M. L., Campos Costa, A. & Coelho, E.; 2006 - "LNEC-Closs Simulador de Cenários Sísmicos integrado num Sistema de Informação Geográfica". Engenharia e Vida. Ano II, nº 21, pp. 28-33.
- Tiedemann, H., 1992 - *Earthquakes and volcanic eruptions. A handbook on risk assessment*. Swiss Reinsurance Company, Zurique, Suíça.
- Zuccaro, G. & Papa, F., 2002 - "Method of seismic vulnerability and exposure assessment at national scale - the Italian case". 12ECEE. Londres, Elsevier Science Ltd. Artigo nº 698.