

10_16

REABILITAÇÃO SÍSMICA

AVALIAÇÃO E REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS ESCOLARES EM PORTUGAL

Jorge Miguel Proença, António Sousa Gago, Teresa Valssassina Heitor
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
jorge.m.proenca@ist.utl.pt

1. INTRODUÇÃO

Em 2007 teve início um programa de modernização do parque escolar destinado ao ensino secundário, lançado pela empresa Parque Escolar, EPE. Este programa visava, entre outros aspetos, a requalificação e modernização dos edifícios em que estavam instaladas as escolas com ensino secundário, repondo a eficácia física e funcional dos mesmos. Muitos desses edifícios localizam-se em zonas de elevado risco sísmico e maior parte deles foi concebida antes da implementação dos regulamentos de segurança estrutural, o que conduziu à realização de estudos de avaliação e de reforço sísmico num número significativo dos edifícios. Estudaram-se os edifícios localizados nas zonas de maior atividade sísmica e que tinham sido projetados antes de 1983, altura da implementação do mais recente regulamento de verificação da segurança estrutural Português – o Regulamento de Segurança e Ações em Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP). Refira-se, por fim, que as mais recentes recomendações da OCDE no tocante à segurança sísmica de edifícios escolares foram consideradas no referido programa de modernização do parque escolar.

2. DEFINIÇÃO DE TIPOLOGIAS E SELECÇÃO DOS EDIFÍCIOS A REFORÇAR

A construção dos edifícios escolares destinados ao ensino secundário teve início no final do século XIX, procurando-se desde cedo definir

modelos arquitetónicos padronizados que seriam disseminados pelo território nacional.

Esses modelos traduziam para cada época os paradigmas didáticos, as necessidades educacionais e as técnicas construtivas então disponíveis. Esses modelos e a regulamentação estrutural vigente na época (tabela 1) permitiu agrupar os edifícios em 5 conjuntos com características de resistência sísmica semelhantes:

- 1) Edifícios Históricos, construídos no final do século XIX e nas primeiras décadas do século XX, com uma estrutura de paredes de alvenaria e pavimentos em madeira;
- 2) Edifícios com paredes de alvenaria e lajes em betão armado, construídos entre 1930 e o final da década de 1950, com elementos estruturais verticais em alvenaria e elementos horizontais em betão armado;
- 3) Edifícios dos primórdios do uso generalizado do betão armado, anteriores à primeira regulamentação sísmica Portuguesa, de 1958 (Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos - RSCCS), e construídos entre 1950 e o início da década de 1960;
- 4) Edifícios com estrutura integralmente em betão armado, posteriores à entrada em vigor do RSCCS e anteriores à do RSAEEP, em 1983;
- 5) Edifícios construídos nas décadas de 1970/80 por métodos industrializados (prefabricados, de betão armado ou aço).

Os edifícios projetados e construídos e depois de entrada em vigor do RSAEEP, de 1983, não foram alvo de estudo sistemático de avaliação da sua segurança sísmica.

2.1. Edifícios Históricos

Os primeiros liceus (Lyceus Centrais de Lisboa e Porto) foram concebidos com uma configuração em extensão ocupando parcialmente ou a totalidade do quarteirão urbano. Na sua execução utilizaram-se os materiais tradicionais (madeira e alvenaria), mas também o betão armado e o aço estrutural que na época começavam a ser utilizados. No entanto, nestas primeiras aplicações esses elementos foram empregues conjuntamente com as técnicas e materiais tradicionais, seguindo critérios de conceção próximos dos tradicionais, com exceção das coberturas.

Genericamente, as estruturas destes edifícios são constituídas por paredes periféricas e interiores, em alvenaria, que suportam os pavimentos, em madeira. As paredes exteriores, em alvenaria de pedra, são muito robustas, com espessuras que podem atingir 1.1 m nas suas fundações, variando em altura entre 0.8-0.9 m e 0.6-0.7 m. As paredes interiores, na maioria dos casos em alvenaria de tijolo, são menos robustas, com espessuras que não ultrapassam 0.4 m. As estruturas dos pavimentos são constituídas por vigamentos de madeira, revestidos por soalho de madeira, ou, nos pisos térreos, corredores, galerias e zonas húmidas, por perfis metálicos e abobadilhas cerâmicas, sobre as quais era colocado um enchimento de argamassas de areia, cal e pozolana. As fundações destes edifícios são diretas ou por poços preenchidos com alvenaria e unidos por arcos de alvenaria.

Os principais riscos sísmicos destes edifícios estão relacionados com insuficiências de

Data	Regulamento	Descrição
-1755	Inexistente	
1755-1918	Inexistente (?)	Prática construtiva. Construção da gaiola pombalina, posterior ao terramoto de Lisboa, 1755. Sistema estrutural progressivamente aligeirado, tendo dado origem aos edifícios “gaioleiros”.
1918		Regulamento para o <i>Emprego do Beton Armado</i> (Decreto n.º 4036 de 28 de março). Omissio.
1935	RBA	Regulamento de Betão Armado (Decreto n.º 25948 de 16 de outubro). Omissio.
1958	RSCCS	Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos (RSCCS, Decreto n.º 41658 de 31 de maio. Zonamento inicial do território e utilização do método do coeficiente sísmico [análise estática equivalente].
1961	RSEP	Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes (RSEP, Decreto n.º 44041 de 18 de novembro). Revisão do RSCCS mantendo no essencial a mesma abordagem. Inclusão da ação sísmica no contexto das restantes <i>solicitações</i> . Agravamento dos coeficientes sísmicos em terrenos de fundação desfavoráveis ou construções sem elementos não estruturais de travamento.
1967	REBA	Regulamento de Estruturas de Betão Armado (REBA, Decreto n.º 47723 de 20 de maio).
1983	RSAAEP e REBAP	Regulamento de Segurança e Ações em Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAAEP, Decreto-Lei n.º 235/83 de 31 de maio) e Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP, Decreto-Lei n.º 349-C/83 de 30 de julho). Análise dinâmica ou estática equivalente. Introdução mais objetiva ao conceito de ductilidade. Cuidado e diferenciação na pormenorização de estruturas de betão armado. A diferenciação do risco sísmico não contempla objetivamente as instalações escolares.
2010	NP EN 1998-1 e Anexo Nacional	Multiplicação dos métodos de análise, aprofundamento dos estudos de sismicidade, maior diferenciação do risco sísmico tendo em conta a importância das construções (considerando explicitamente as escolas). Instrução da exigência de limitação de danos.

Tabela 1 Evolução da regulamentação nacional para resistência aos sismos e dimensionamento de estruturas de betão armado.

resistência e de capacidade de deformação das paredes portantes para ações horizontais (no seu plano e perpendiculares ao seu plano), deficiências do funcionamento dos pisos como diafragmas rígidos e deficiências no funcionamento das ligações entre paredes ortogonais e entre paredes e pavimentos.

2.2. Edifícios com paredes de alvenaria e lajes em betão armado

Esta tipologia cobre os edifícios construídos entre o fim da década de 1930 e o final da década de 1950. Do ponto de vista arquitetónico são edifícios com configurações lineares, constituídos por vários corpos agregados entre si, aparentando tratar-se de um edifício único.

A estrutura resistente é maioritariamente constituída por paredes portantes de alvenaria de pedra (paredes exteriores, com espessuras superiores a 0.6 m), de alvenaria de tijolo cerâmico ou de blocos de betão (paredes interiores, com espessuras até 0.3 m), que suportam vigas e lajes de betão armado, geralmente aligeiradas. Nas zonas em que se pretendia espaços desimpedidos, como nos átrios e recreios cobertos, era comum a existência

de subestruturas constituídas por grelhas de vigas de betão armado, que, apoiadas em pilares de betão armado, suportam o pavimento superior. Esta tipologia de edifícios escolares corresponde aproximadamente àquela que

no parque habitacional é identificada como edifícios de “Transição” ou de “Placa”. Os estudos realizados evidenciaram os seguintes riscos do ponto de vista da resistência sísmica dos edifícios:



> 1



> 2

> **Figura 1:** Edifícios Históricos - Escolas Secundárias de Maria Amália Vaz de Carvalho (esquerda) e de Pedro Nunes (direita), em Lisboa (Arquivo Fotográfico da Secretaria Geral do Ministério da Educação).

> **Figura 2:** Escola Secundária de Sá da Bandeira, Santarém (Arquivo Fotográfico da Secretaria Geral do Ministério da Educação).

- Insuficiência de resistência ou de capacidade de deformação das paredes de alvenaria, para ações no seu plano como para ações perpendiculares ao seu plano;
- Deficiência no funcionamento dos pisos como diafragmas rígidos;
- Inexistência do efeito de diafragma ao nível da esteira, em certos casos pela inexistência de lajes de esteira em betão armado e, em outros, pelo facto das lajes não cobrirem a totalidade da planta;
- Insuficiente resistência e capacidade de deformação dos pilares de betão armado;
- Queda de elementos ornamentais na fachada e cobertura (frontão, pináculos, etc).

2.3. Edifícios dos primórdios do uso do betão armado, anteriores à regulamentação sísmica

Esta tipologia refere-se aos edifícios cuja estrutura foi integralmente realizada em betão armado (lajes, vigas e pilares), mas cujo dimensionamento foi realizado sem qualquer tipo de verificação sísmica. Esta tipologia corresponde a um número relativamente reduzido de edifícios escolares, uma vez que a generalização do uso de estruturas integralmente em betão armado verificou-se no decorrer da década de 1950 e em 1958 foi publicado o primeiro regulamento para a verificação da segurança aos sismos. Do ponto de vista da configuração arquitetónica mantém-se o conceito de edifício único, com uma configuração linear e uma disposição de “corredor lateral” ou de “corredor central”.

O sistema estrutural destes edifícios é constituído por uma estrutura reticulada de betão armado, com pórticos longitudinais de fachada e de corredor que suportam as lajes. Na direção transversal do edifício não existem, em geral, vigas e as lajes são aligeiradas, nas salas de aula, ou maciças, nos corredores. Os edifícios são fracionados longitudinalmente em corpos de 15 a 25 metros de comprimento, separados por juntas de dilatação de reduzida espessura (1 a 2 cm). O dimensionamento dos pilares foi



> 3

realizado considerando-os sujeitos à compressão simples, sem flexão, e as armaduras são lisas, com pormenorizações deficientes. A disposição das alvenarias, tanto nas fachadas como nas paredes interiores longitudinais (de corredor), trava lateralmente os pilares em grande parte da sua altura, o que poderá propiciar o efeito de coluna curta.

2.4. Edifícios de betão armado posteriores à regulamentação sísmica, mas anteriores ao RSAEEP

O dimensionamento dos edifícios concebidos posteriormente à entrada em vigor do RSCCS (1958) e antes do RSAEEP (1983) incluía uma análise sísmica simplificada através do designado “método do coeficiente sísmico”. Para efeitos da quantificação desse coeficiente, o país encontrava-se dividido em 3 zonas e não se atendia explicitamente aos efeitos do solo, às características dinâmicas dos edifícios, nem à importância das construções. À luz da atual regulamentação, esse método conduziu a uma subavaliação dos esforços sísmicos, efeito que se manifesta particularmente nos pisos superiores.

Os edifícios escolares construídos no período de 1958 a 1983 apresentam alguma diversidade de projetos, com soluções arquitetónicas autónomas, mas um número muito significativo de escolas foi construído de acordo com “projetos-tipo”, de que se des-

tacam o “1º Projeto Normalizado” destinado a escolas industriais e comerciais, e os 2º, 3º e 4º Projetos Normalizados, que vieram a dar origem ao “Projeto Base Técnica” e ao “Projeto 3x3”.

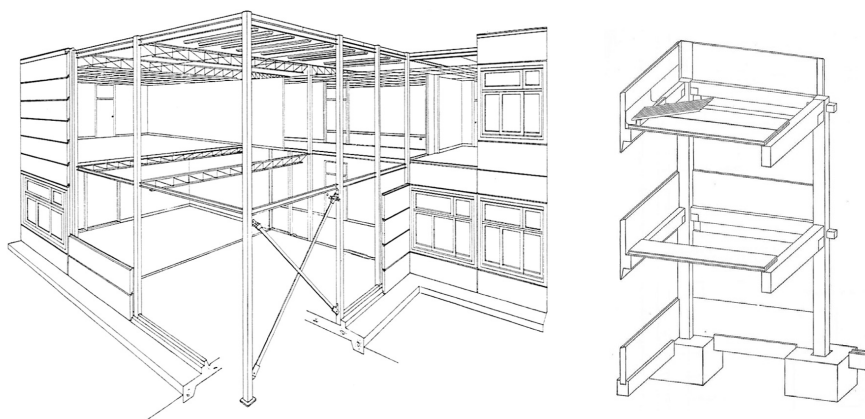
No “1º Projeto Normalizado” os edifícios de 2 pisos e esteira apresentam uma configuração linear com vários corpos agregados (separados por juntas de dilatação) e disposição de “corredor central”. A estrutura é em betão armado, constituída por pilares e vigas que suportam as lajes. As lajes são aligeiradas nas salas de aula e maciças nos corredores. Longitudinalmente o sistema estrutural considerado para a ação sísmica consiste nos pórticos de fachada e de corredor, que foram dimensionados para as forças horizontais com essa direção (e coeficiente sísmico de 0.10). Na direção transversal foi idealizado um sistema estrutural invulgar, em que a laje de corredor (maciça) é assimilada a uma viga deitada, permitindo recolher as forças de inércia transversais e encaminhá-las para subestruturas transversais nos alinhamentos das juntas. Essas subestruturas dos alinhamentos das juntas encontram-se travadas por diagonais de betão armado, permitindo encaminhar as forças de inércia dos pisos para a fundação.

Considerando a ação sísmica atual (RSAEEP), verifica-se uma deficiência generalizada de resistência nos elementos estruturais e, ainda, o risco de martelamento entre os corpos separados por juntas.

> Figura 3: Liceu Rainha D. Leonor em Lisboa – “1º Projeto Normalizado” (Arquivo Fotográfico da Secretaria Geral do Ministério da Educação).



> 4



> 5

Com o 2º Plano Normalizado teve início a solução pavilhonar que permitia a adaptação dum único projeto arquitetónico a diversas situações. Dentro das soluções pavilhonares aquela que foi mais utilizada corresponde ao projeto-tipo “Base Técnica”, concebido na década de 1970 e construído até meados da década de 1980. Nesse projeto-tipo não foi possível concluir se foram realizadas as verificações regulamentares da época.

As escolas desta tipologia são constituídas por vários blocos que se ligam através de caminhos exteriores. Um dos blocos alberga os serviços administrativos e os outros, em número variável, as salas de aula. Do ponto de vista estrutural, todos os blocos apresentam

uma estrutura reticulada, viga-pilar, em betão armado, que apoia as lajes de betão armado (aligeiradas nas zonas das salas de aula e maticas nas escadas e nos acessos). Nos blocos das salas de aula a estrutura é constituída por pórticos nas duas direções, com juntas de dilatação que separam cada um dos blocos em 4 corpos autónomos. É de referir que a largura dessas juntas de dilatação é insuficiente face à previsível vibração dos edifícios, podendo originar o efeito de martelamento. Constatou-se, ainda, que para as ações verticais a estrutura tem um nível de segurança adequado, apresentando, no entanto, muitas deficiências no que diz respeito à verificação da segurança face à ação sísmica regulamentar (RSAEEP). Para

essa ação os pilares apresentam, em geral, resistência insuficiente, em particular aqueles que têm maiores dimensões, mas que estão pouco armados.

2.5. Edifícios construídos nas décadas de 1970/1980 por métodos industrializados

A última categoria de edifícios compreende as soluções prefabricadas de betão armado e uma solução estrutural mista aço-betão importada do Reino Unido (CLASP) e adaptada pela SO-REFAME. Arquitetonicamente estas soluções seguem o modelo de pavilhões autónomos interligados por galerias.

Nas soluções pré-fabricadas de betão armado refere-se, como exemplo, a solução de pré-fabricação INDUBEL (sistema de construção IP2), do final da década de 1970. Neste caso a estrutura dos pavilhões é reticulada (pilares e vigas), com lajes de piso alveolares. Os estudos indicam que os pilares apresentam resistência insuficiente, colocando-se ainda dúvidas relativamente ao facto dos pisos poderem ser considerados rígidos no seu plano.

A solução CLASP é um sistema de prefabricação misto (aço-betão) com pilares e vigas metálicos que suportam as lajes de piso, prefabricadas de betão armado. A estabilidade da estrutura face a ações horizontais é assegurada por contraventamentos metálicos dispostos em alguns vãos e em ambas as direções horizontais. Os estudos apontam para uma clara insuficiência desses contraventamentos, a par do efeito de coluna curta que decorre do facto destes contraventamentos se encontrarem ligados aos pilares a uma cota diferente daquela em que se apoiam as vigas de piso.

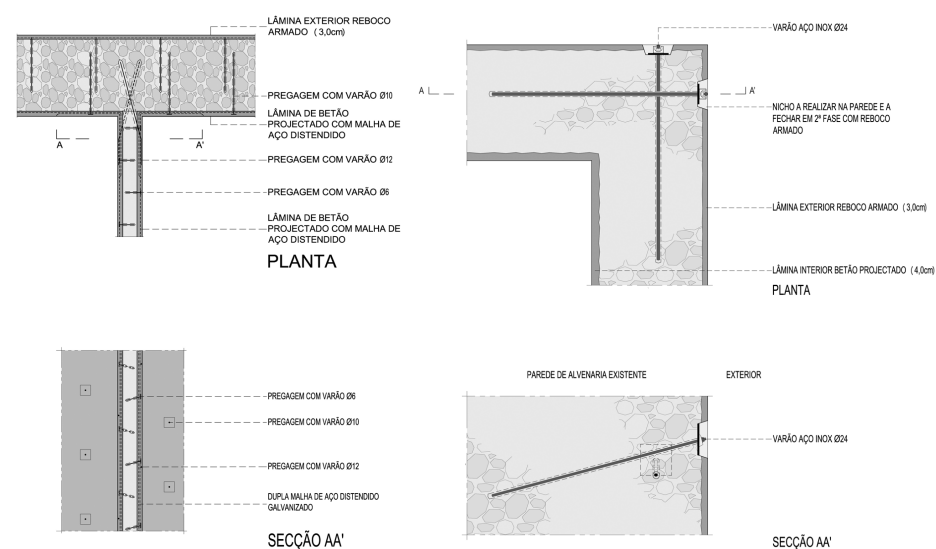
3. EXEMPLOS DE INTERVENÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO EM EDIFÍCIOS ESCOLARES

3.1. Edifícios Históricos

Esta tipologia de edifícios apresenta as deficiências estruturais típicas dos edifícios

REABILITAÇÃO SÍSMICA

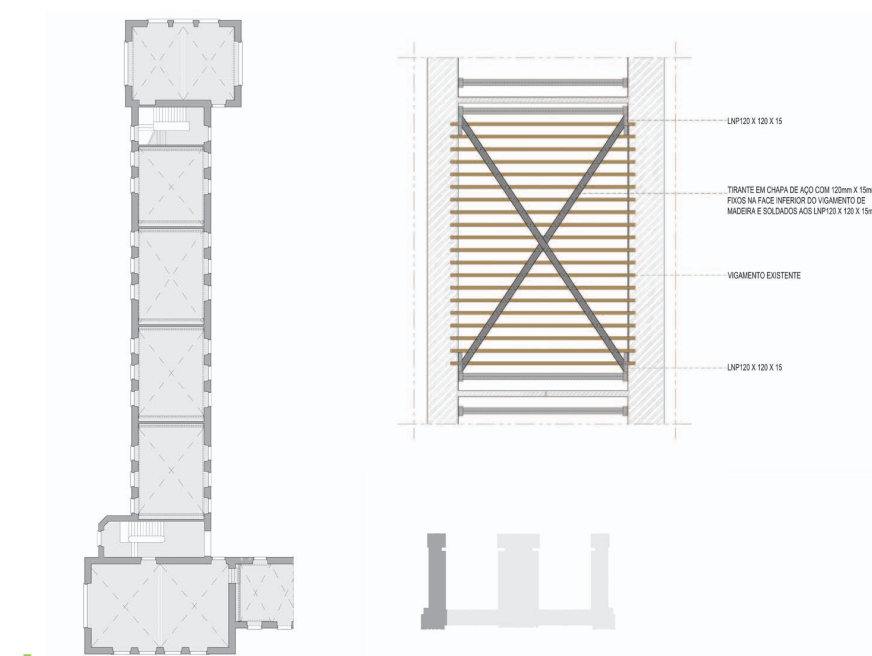
com estrutura em alvenaria, neste caso agravadas pela deformabilidade dos pavimentos em madeira. Nas intervenções realizadas o reforço sísmico foi conseguido através do reforço das paredes portantes com reboco armado, tendo-se também dado atenção às ligações entre as paredes ortogonais (figura 6) e entre as paredes e os pavimentos e, também, à rigidificação dos pavimentos no seu plano (figura 7).



> 6

3.2. Edifícios com paredes de alvenaria e lajes em betão armado – Edifícios MOP

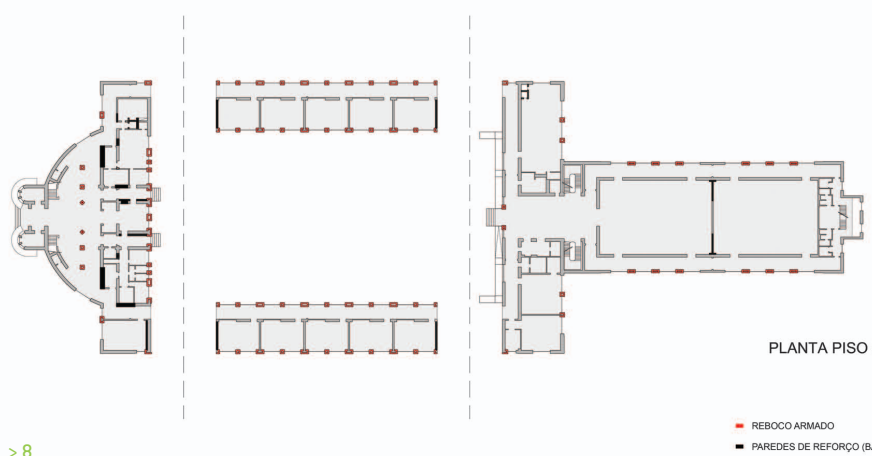
Tal como no caso anterior, as deficiências resultantes da falta de capacidade resistente e de deformação das paredes de alvenaria portantes foram corrigidas através da aplicação de rebocos armados. As malhas de reforço foram ancoradas ao substrato em alvenaria e às lajes (superior e inferior) em betão armado, o que resultou num aumento significativo da resistência e ductilidade das paredes e na potenciação dos efeitos de diafragma indeformável dos pisos. Em alguns casos, os edifícios de maior dimensão que não apresentavam juntas de dilatação foram sujeitos a operações de separação em vários corpos, de menor dimensão e mais regulares, separados por juntas de dilatação (figura 8). Quando necessário e quando o programa arquitetónico permitia, foram também introduzidas novas paredes resistentes em betão armado para travamento sísmico do edifício.



> 7

3.3. Edifícios dos primórdios do uso do betão armado, anteriores à regulamentação sísmica

As intervenções nos edifícios desta tipologia seguiram uma abordagem que consistiu na rigidificação dos edifícios, em ambas as direções horizontais, mediante a construção de novas paredes resistentes em betão armado. Estas paredes foram amarradas aos pisos, dispostas

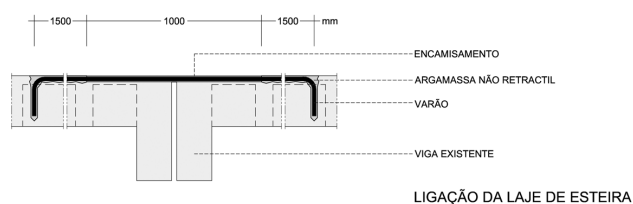
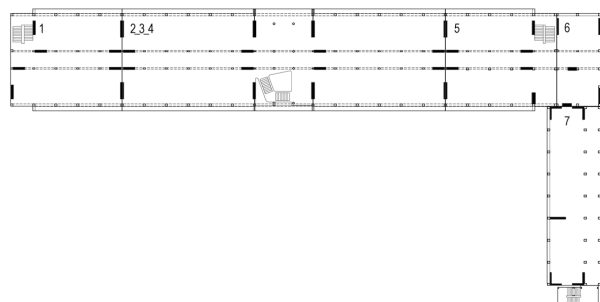


> 8

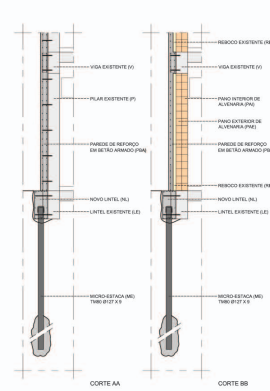
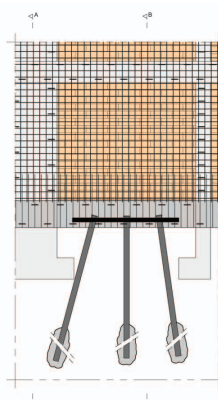
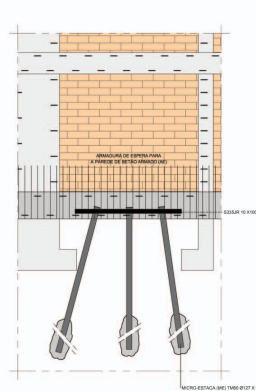
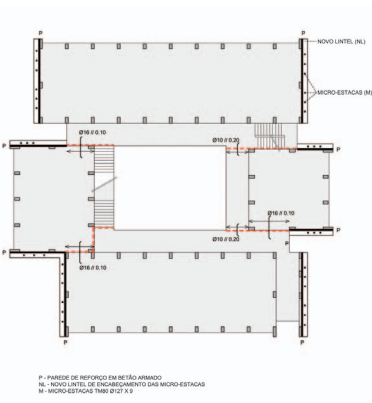
> Figura 6: Exemplos de reforço da ligação entre paredes ortogonais (A2P, Consult, Lda).

> Figura 7: Exemplo de rigidificação de pavimentos com estrutura em madeira através de chapas metálicas (A2P, Consult, Lda).

> Figura 8: Escola Secundária de Filipa de Lencastre - Localização das novas juntas no edifício principal, das zonas onde se aplicou reboco armado e das novas paredes em betão armado (Teixeira Trigo, Lda).



> 9



> 10

de forma a minimizar os efeitos de irregularidades em planta e apresentam fundações por micro-estacas, independentes das do restante edifício. Os pilares em betão armado não foram, em geral, reforçados, reservando-lhes funções apenas para as ações verticais. Refira-se que, no entanto, foi verificada a compatibilidade da capacidade de deformação desses elementos com as deformações expectáveis em caso de sismo, agora muito reduzidas em virtude dos efeitos das novas paredes de betão armado. Agregaram-se, também, alguns corpos dos edifícios, mediante a supressão das juntas de dilatação, o que associado à diminuição dos deslocamentos sísmicos conduziu à eliminação dos riscos de martelamento.

3.4. Edifícios de betão armado posteriores à regulamentação sísmica, mas anteriores ao RSAEEP

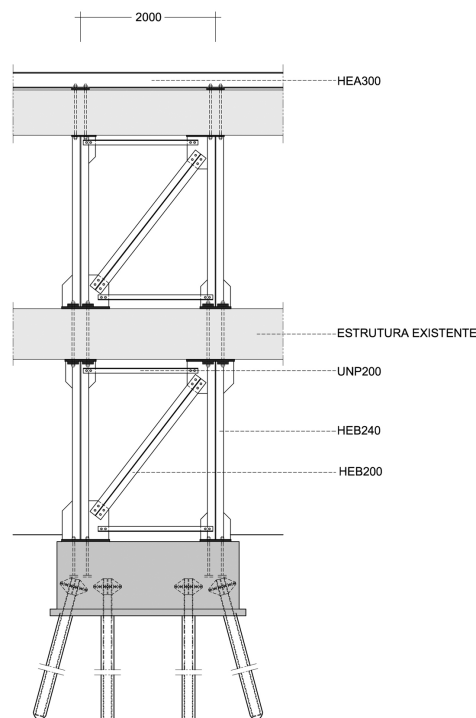
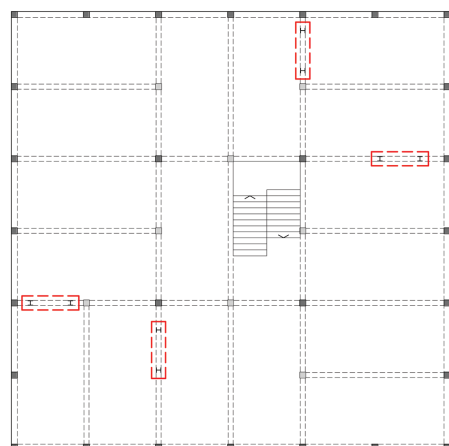
Nesta tipologia construtiva enquadra-se um número muito significativo de edifícios que foram construídos de acordo com diversos projetos-tipo, nomeadamente o "1º Projeto Normalizado" e o projeto "Base Técnica". Na conceção dos edifícios do "1º Projeto Normalizado" consideraram-se valores baixos para o coeficiente sísmico, uma incorreta distribuição das forças de inércia em altura, o que conduziu a uma insuficiente resistência sísmica. A solução de reforço sísmico mais comum baseou-se na execução de paredes resistentes em betão

armado (com fundações individuais através de micro estacas) distribuídas em planta nas 2 direções horizontais. Nestas intervenções as juntas de dilatação foram também eliminadas de forma a suprimir o martelamento entre corpos e a minimizar a quantidade de paredes a executar.

Outro tipo de edifícios escolares muito comum em Portugal continental é aquele que resultou da implementação do projecto-tipo "Base Técnica". Uma das soluções de reforço adotada para esta tipologia consistiu na eliminação das juntas de dilatação e na construção de 4 paredes de betão armado na periferia dos blocos (figura 10) que foram fundadas individualmente através de micro estacas.

> Figura 9: "1º Projeto Normalizado" - Localização das novas paredes resistentes em betão armado e pormenorização da supressão de juntas de dilatação (ARA, Lda).

> Figura 10: Exemplo de intervenção num edifício tipo "Base-Técnica" (Proconsultores, Lda).



> 11

3.5. Edifícios construídos na década de 1970 por métodos industrializados

No caso do sistema Indubel IP2, as deficiências do ponto de comportamento sísmico foram resolvidas através da introdução de pórticos metálicos de contraventamento (figura 11) fixados à estrutura original e fundados individualmente.

4. CONCLUSÕES

Os estudos de avaliação e reforço sísmico focaram-se sobretudo nos edifícios concebidos após 1983, altura em que o RSAEEP entrou em vigor. Esses estudos mostraram

que, independentemente da sua tipologia, os edifícios apresentavam um comportamento sísmico deficiente, exigindo a implementação de soluções de reforço sísmico. Todas as soluções procuraram aumentar globalmente a resistência dos edifícios, mas controlando e limitando adequadamente os níveis de deformação resultantes da ação sísmica.

A experiência adquirida neste programa de modernização e o sucesso da implementação das soluções de reforço mostraram as vantagens da incorporação da avaliação da vulnerabilidade sísmica em intervenções de grande escala, em particular no caso de edifícios de importância relevante, como é o caso dos edifícios escolares e dos hospitais.

AGRADECIMENTOS

Os estudos descritos resultaram do envolvimento dum número muito significativo de pessoas, o que torna impossível a sua completa enumeração. No entanto, algumas figuras do presente artigo resultaram do envolvimento de alguns projetistas que merecem referência: A2P Consult, Estudos e Projetos Lda; Teixeira Trigo, Lda; BETAR, Estudos e Projetos de Estabilidade, Lda; ARA, Alves Rodrigues & Associados, Lda; Proconsultores, Projetos e Consultoria, Lda; e FTD, Consultores de Engenharia, Lda. Os desenhos em CAD foram executados pela Arquiteta Mariana Pedroso Gouveia, a quem os autores manifestam o seu agradecimento.

REFERÊNCIAS

- [1] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto-lei 235/83 de 31 de maio, Imprensa Nacional - Casa da Moeda (1983)
- [2] PEB [Program on Educational Building], diversos autores, Keeping Schools Safe in Earthquakes, OECD/OECD, Paris, 243 p. (2004)
- [3] Grant, D., Bommer, J.J., Pinho, R., Calvi, G.M., Defining Priorities and Timescales for Seismic Intervention in School Buildings in Italy, IUSS Press, Italy, 161 p. (2006)
- [4] Proença, J.M., Gago, A.S., Costa, A.V. & André, A.M., Strengthening of masonry wall load bearing structures with reinforced plastering mortar solution, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal: SPES/IAEE, 10 p. (2012)
- [5] Proença, J.M., Gago, A.S. and Heitor, T.V., PARQUE ESCOLAR. Reforço Sísmico de Edifícios Escolares / Seismic Strengthening of School Buildings, Parque Escolar / Argumentum, Lisboa, Portugal, 189 p. (2011)
- [6] Thermou, G.E., Elnashai, A.S., Seismic Retrofit Schemes for RC Structures and Local-Global Consequences. Progress in Structural Engineering and Materials, Wiley Interscience, Vol. 8, No. 1, p. 1-15. (2006)

> Figura 11: Localização em planta e alçado dos pórticos metálicos de contraventamento (FTD. Lda).