

## SISMO DE L'AQUILA DE 6 DE ABRIL DE 2009 ENSINAMENTOS PARA PORTUGAL

**H. Rodrigues**  
Eng. Civil  
U. Aveiro, Aveiro  
**A. Arêde**  
Categoria Prof.  
FEUP, Porto  
**R. Vicente**  
Categoria Prof.  
U. Aveiro, Aveiro

**X. Romão**  
Categoria Prof.  
FEUP, Porto  
**H. Varum**  
Categoria Prof.  
U. Aveiro, Aveiro  
**A.A. Costa**  
Eng. Civil  
FEUP, Porto

**A.G. Costa**  
Categoria Prof.  
U. Aveiro, Aveiro  
**J. Guedes**  
Categoria Prof.  
FEUP, Porto  
**E. Pauperio**  
Eng. Civil  
FEUP, Porto

### SUMÁRIO

Após o sismo de 6 de Abril de 2009 em L'Aquila, Abruzzo, Itália, uma equipa da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e da Universidade de Aveiro (FEUP/UA) realizou uma visita aos locais mais afectados da região. A zona afectada está localizada numa região de actividade sísmica moderada, tendo o sismo provocado elevados danos no parque edificado. Após a visita foram analisados os dados recolhidos com o objectivo de interpretar os danos sofridos pelos diferentes tipos de construção, nomeadamente, as estruturas de alvenaria e de betão armado. Foram também observados os procedimentos de emergência desenvolvidos na gestão da catástrofe. Da análise das diversas observações realizadas foram retirados alguns ensinamentos para Portugal.

### 1. INTRODUÇÃO

No dia 6 de Abril de 2009, um sismo de magnitude moderada atingiu a região de Abruzzo, no centro de Itália. De acordo com o Instituto Nacional de Vulcanologia e Geofísica Italiano, o sismo teve uma magnitude de  $M_w$  6.2, enquanto que o *United States Geological Survey* reportou uma magnitude de  $M_w$  6.3. A profundidade do epicentro foi estimada em cerca de 10km. O sismo vitimou cerca de 305 pessoas, tendo sido registados mais de 1500 feridos e mais de 70.000 desalojados. Entre 10000 a 15000 edifícios tiveram danos ou sofreram colapso. Este sismo foi o de maior magnitude de uma série de eventos registados durante o mês anterior, dos quais 23 tiveram magnitude superior a 4. Apesar da magnitude do evento principal ser muito inferior quando comparadas com a de outros sismos recente, como o sismo do Haiti ( $M_w$  7.0) ou do Chile ( $M_w$  8.8), a proximidade do epicentro do centro da cidade de L'Aquila e a sua baixa profundidade causaram danos severos e o colapso de muitos edifícios.

Após o sismo, diversas equipas internacionais visitaram a região de Abruzzo. No que respeita ao caso particular da equipa da FEUP/UA, as tipologias de construção existentes, muito semelhantes à da realidade Portuguesa, representam uma fonte de informação relevante para a identificação das principais deficiências, para que possam ser corrigidas, evitando assim danos semelhantes em Portugal. A possibilidade de observar a actuação em campo de várias actividades envolvidas na gestão de catástrofes foi, ainda, uma oportunidade para analisar os procedimentos e as necessidades para fazer face a um evento semelhante. Assim, o presente artigo reflecte as observações e análises dos dados verificados pelos autores após a visita ao local.

### 2. OBJECTIVOS DA MISSÃO

A missão reportada refere-se à visita à região de Abruzzo, 22 dias após o sismo, durante 6 dias. Os principais objectivos da missão foram: *i*) observar e analisar os danos sofridos pelos diferentes tipos de construção, nomeadamente, as estruturas de alvenaria e de betão armado; *ii*) observar e analisar os materiais e os métodos de construção locais, comparando-os com a realidade actual em Portugal; *iii*) observar os procedimentos de emergência desenvolvidos na gestão da catástrofe, retirando ensinamentos para Portugal e *iv*) observar a eficiência de reforços efectuados recentemente, analisando o seu desempenho em relação ao esperado.

### 3. OBSERVAÇÕES DA GESTÃO DA CATÁSTROFE

As observações apresentadas em seguida não resultam duma análise aprofundada acerca dos procedimentos implementados para a gestão da catástrofe, mas sim de observações informais realizadas em campo, pelos elementos da equipa da FEUP/UA, e de alguma informação recolhida junto de civis, bombeiros e elementos da Protecção Civil.

#### 3.1. Campos de desalojados

Os campos de desalojados visitados aparentavam estar a funcionar bem, apresentando condições mínimas de conforto e de salubridade. Foi igualmente observada a existência duma adequada coordenação entre os vários campos ao nível da gestão de bens e de mantimentos. Verificou-se também que tinha sido implementada uma estratégia que envolvesse a população dos campos na sua gestão e manutenção, mantendo, dessa forma, as pessoas activas e, simultaneamente, libertando operacionais da Protecção Civil para outras operações (ver Figura 1).



Figura 1: Campo de desalojados

#### 3.2. Actuação dos bombeiros, polícia e exército

Segundo informações da Protecção Civil, foram destacados cerca de 2250 bombeiros, 2000 polícias e 1500 militares para as zonas afectadas a partir de 8 de Abril. O número de bombeiros observados em campo pareceram ser insuficientes face às múltiplas solicitações de que eram alvo, nomeadamente no acompanhamento de civis às residências, no acompanhamento das equipas de inspecção, em tarefas nos campos de desalojados, e nas operações de escoramento de emergência. Durante a visita realizada, a presença dos militares no terreno passou, no entanto, quase despercebida. Por outro lado, o policiamento das zonas evacuadas aparentou ser eficaz na prevenção de actos de roubo e de vandalismo (ver Figura 2).



Figura 2: Actuação dos bombeiros, polícia e exército

#### 3.3. Procedimentos de consolidação temporária

Durante a visita realizada, foram igualmente observados os procedimentos de consolidação temporária utilizados na estabilização de edifícios, como ilustrado na Figura 3. Do que foi possível observar, verificou-se que as

operações de consolidação estariam a ser hierarquizadas consoante as necessidades de intervenção das construções, o seu valor patrimonial e o seu estado de conservação. Por outro lado, observou-se que a elaboração dos projectos de consolidação temporária deveria gerar soluções simples, claras e baseadas em princípios elementares, cuja execução em campo pelos bombeiros pudesse ser feita através da utilização de materiais baratos, disponíveis e fáceis de manusear e aplicar.

As soluções de consolidação encontradas utilizavam técnicas reversíveis e não-invasivas, essencialmente para fazer face à necessidade de confinamento de pilares, cúpulas, paredes e edifícios; ao atirantamento (em geral auto-equilibrado) de paredes, torres e arcos e escoramentos apoiados no solo. A definição das soluções tinha também em atenção a necessidade de envolver um tempo de execução reduzido (poucos dias) bem como o acesso muito limitado às construções por questões de segurança (através de auto-gruas e plataformas elevatórias). Do ponto de vista dos materiais utilizados na definição das soluções, foram considerados materiais de fácil acesso tais como a madeira (em quase todos os casos; peças de grandes dimensões), cintas de poliéster (facilmente tencionáveis), cabos metálicos (maiores comprimentos de tensionamento) e tubos metálicos (situações isoladas).



Figura 3: Procedimentos de consolidação temporária

### 3.4. Inspeções das construções

Segundo informações obtidas junto da Protecção Civil, estiveram envolvidos cerca de 1500 técnicos por dia em inspeções de edifícios residenciais, tendo efectuado cerca de 24000 inspeções até 2 de Maio de 2009. Cada equipa possuía três técnicos, um bombeiro e um técnico do Ministério da Cultura (no caso se tratar de um edifício patrimonial), e o(s) proprietário(s). Os trabalhos que constituem a inspeção das construções envolvem a recepção da lista de edifícios a inspeccionar, os trabalhos de inspeção e preenchimento de fichas, a validação das fichas e a introdução dos dados obtidos em formato digital. No caso de edifícios patrimoniais, compete aos técnicos que efectuaram a inspeção fazer a introdução dos dados obtidos em formato digital numa base de dados de centralização de toda a informação recolhida.

De modo a ter uma visão mais objectiva acerca das dificuldades em campo da utilização das fichas de levantamento, a equipa que participou nesta missão efectuou o preenchimento de algumas fichas de Nível 1 (fichas com informação em que o nível de detalhe é menor). Dessa experiência, resultaram os seguintes aspectos:

- O preenchimento da ficha de Nível 1 para Edifícios Correntes revelou-se pouco eficaz dado que ocorreram dificuldades na interpretação de alguns campos. Por outro lado, verificou-se ser fundamental a inspeção dos edifícios pelo interior de modo a poder estabelecer as condições de dano com objectividade adequada (em muitos casos os edifícios não apresentavam danos relevantes no exterior, ao contrário do que se passava pelo interior). Não obstante, observou-se, em muitos casos, que as conclusões acerca do nível de dano a preencher na ficha seriam muito subjectivas a menos dos casos que fossem “quase sem danos” ou “com danos consideráveis”.
- O preenchimento da ficha de Nível 1 para Palácios revelou-se ser muito moroso e pouco eficaz quando não existe levantamento arquitectónico. As equipas de levantamento conseguem efectuar a inspeção de palácio por dia.



- O preenchimento da ficha de Nível 1 para Igrejas verificou ser eficaz dado que a tipologia deste tipo de construções está bem definida (ex: altar mor, nave,...).

#### 4. DESCRIÇÃO GERAL DOS DANOS OBSERVADOS

##### 4.1. Observações gerais

Os danos observados variaram bastante consoante o local (função do solo de fundação), o tipo de construção, a sua idade e o seu estado de conservação. A análise que a seguir se expõe resulta das visitas a algumas localidades, visitas essas que foram realizadas, nalguns casos, em tempo limitado. Durante as visitas, foi dada especial atenção a edifícios de alvenaria tradicional, a edifícios de betão armado recentes e construídos em épocas anteriores à existência de normas de dimensionamento sísmico. A Figura 4 situa as localidades visitadas, tendo sido observado que a zona com maiores danos estaria localizada a Sudeste da cidade de L'Aquila, no vale do rio Aterno, numa zona aluvionar.



Figura 4: Localidades visitadas pela equipa da FEUP/UA

De uma forma geral, observou-se que os edifícios de alvenaria tradicional tiveram um comportamento muito distinto dependendo das técnicas construtivas utilizadas. Os edifícios não reforçados apresentavam níveis de danos elevados, ou colapso, e os edifícios de alvenaria com intervenções pesadas, com utilização de pisos de betão armado, revelaram um mau comportamento. Por outro lado, os edifícios de alvenaria que utilizam tirantes metálicos bem distribuídos apresentaram um melhor comportamento, resistindo ao sismo e sofrendo apenas danos ligeiros. Em termos globais, os edifícios recentes de betão armado tiveram um bom comportamento, apenas com danos ligeiros, em especial nas paredes de alvenaria de enchimento. Não obstante, foram igualmente observados alguns edifícios em que ocorreu o colapso dos pisos inferiores.

##### 4.2. Danos observados no Centro Histórico de L'Aquila

A cidade de L'Aquila é a capital administrativa da região de Abruzzo, com cerca de 73000 habitantes, situada nos limites do vale aluvionar do Rio Aterno. Em 1703, esta região sofreu um sismo muito destrutivo, tendo a maioria dos edifícios do centro histórico da cidade sido construídos após esta data, nos quais se inclui os principais monumentos da cidade como a Igreja de Santa Maria del Suffragio.

A zona antiga da cidade tem cerca de 20000 habitantes e é constituída por uma elevada densidade de construção, com habitação, comércio e edifícios administrativos. A maioria dos edifícios desta zona são de alvenaria tradicional de qualidade muito variável, com 2 a 4 pisos de altura. Nas áreas circundantes da cidade antiga existe uma percentagem considerável de edifícios de betão armado.

Muitas das construções de alvenaria encontrada tinham sido objecto de obras de requalificação e reforço, cuja qualidade e eficiência eram muito variáveis. As construções em alvenaria que possuíam tirantes metálicos e pavimentos em madeira tiveram, aparentemente, um melhor comportamento (ver Figura 5).



Figura 5: Danos em estruturas de alvenaria tradicional no centro de L'Aquila

Os edifícios de betão armado existentes nesta zona, construídos desde os anos 1970 até aos anos 1990, apresentavam danos essencialmente nos painéis de alvenaria. No entanto, ocorreram também alguns colapsos: o caso do Hotel Duc degli Abruzzi e da residência de estudantes universitários que causou a morte de vários estudantes. Estes colapsos estão associados a edifícios construídos na década de 1970 após a introdução das primeiras normas sísmicas. No caso do Hotel Duc degli Abruzzi, o colapso estará associado a uma combinação de um mecanismo de *soft-storey* com o elevado declive do terreno, aspectos agravados pelas deficientes pormenorizações da armadura e da utilização de armadura lisa. No caso da residência de estudantes, não foi impossível identificar a causa do colapso, devido à remoção dos elementos do edifício para missões de resgate às vítimas. No entanto, a partir da observação de fotografias tiradas antes do sismo, é possível identificar uma elevada irregularidade em planta do edifício e, pela observação dos destroços, foi possível verificar que foi utilizada armadura lisa no seu dimensionamento (ver Figura 6).



Figura 6: Danos em estruturas de betão armado no centro de L'Aquila

#### 4.3. Pettino

Pettino é uma zona suburbana localizada a Noroeste da cidade de L'Aquila. É uma zona essencialmente composta por edifícios residenciais de betão armado de 3 a 6 pisos construídos durante a década de 1980. Os danos observados nos edifícios de betão amado são muito variáveis. Foram encontrados casos apenas com danos ligeiros e fendilhação em elementos não-estruturais, casos que exibiam o colapso de elementos não-estruturais, especialmente nos painéis de alvenaria de enchimento, e casos de colapso de edifícios associados ao mecanismo de *soft-storey* (ver Figura 7).





Figura 7: Danos em estruturas de betão armado

#### 4.4. Onna e Montichio

Onna é uma pequena localidade situada a menos de 10km do centro de L’Aquila. Esta localidade era composta por cerca de 120 edifícios maioritariamente de alvenaria de pedra de qualidade muito variável, com 2 a 3 pisos, existindo também algumas moradias em betão armado. Todas as construções estavam fundadas em solos aluvionares calcários e em depósitos fluviais granulares. Os danos observados nas construções em alvenaria foram muito extensos, tendo ocorrido diversos colapsos completos. Os danos nas estruturas de betão armado vão desde danos ligeiros até casos mais severos de colapsos parciais (ver Figura 8).

Montichio é uma localidade próxima de Onna, situada a menos de 1.5km., mas neste caso fundada em solos de calcário e brecha. Tal como Onna, é constituída por edifícios de alvenaria de qualidade variável, com 2 a 3 pisos, existindo também edifícios em betão armado com a mesma tipologia. Dadas as condições dos solos de fundação, os fenómenos de amplificação dinâmica que ocorreram em Onna não se verificaram em Montichio, e os danos foram, em geral, baixos (ver Figura 8).



Figura 8: Danos em estruturas de alvenaria: a) Vista geral de Onna; b) Vista da rua principal de Onna; c) Vista de uma rua de Montichio

#### 4.5. Paganica, Poggio Picenze, Castelnuovo, San Gregorio e Fossa

Nas visitas realizadas às localidades de Paganica, Poggio Picenze, Castelnuovo, San Gregorio e Fossa, foi possível observar alguns dados comuns, tais como o tipo de edificado constituído por estruturas de alvenaria de qualidade variável, com 2 a 3 pisos. Alguns dos edifícios de alvenaria teriam sido objecto de obras recentes, tendo sido adicionados vigas de coroamento de betão armado, pisos de betão armado, e tirantes metálicos, entre outros (Figura 9). Das construções em alvenaria colapsadas, várias possuíam vigas de coroamento ou pavimentos em betão armado. A construção tradicional com tirantes metálicos apresentou um comportamento adequado, observando-se apenas danos ligeiros. Os níveis de dano observados também foram muito variáveis consoante o tipo de solo de fundação das várias zonas. Verificou-se que zonas fundadas em terrenos calcários apresentavam danos ligeiros, ao contrário dos edifícios fundados em solos aluvionares que apresentavam danos severos e colapsos. Na periferia destas localidades existiam estruturas em betão armado que apresentavam danos ligeiros essencialmente não-estruturais.

No caso da localidade de Fossa que está situada na encosta da serra Cavalletto, a zona histórica, constituída por edifícios de alvenaria com 2 a 3 pisos, sofreu os maiores danos em áreas pontuais da zona histórica. Adicionalmente, ocorreram desmoronamentos de algumas das zonas das encostas da serra, tendo havido projecção de pedras sobre a localidade que provocaram também danos nas construções e bloquearam algumas estradas (Figura 10).



Figura 9: Danos em estruturas de alvenaria: a) utilização de pisos de betão armado; b) eficiência da utilização de tirantes



Figura 10: Desmoronamento com projecção de pedras da encosta em Fossa

#### 4.6. Zona Industrial de Bazzano

O maior complexo industrial de L'Aquila fica situado na zona Industrial de Bazzano, a Este da cidade de L'Aquila. Neste complexo, foram observados danos importantes, como é ilustrado na Figura 11, ao nível das fachadas de vários armazéns em betão pré-fabricado. Foi também observado o colapso de silos metálicos dum complexo industrial do Grupo Vibac (indústria de películas plásticas).



Figura 11: Zona Industrial de Bazzano: a) queda de fachadas de painéis em betão pré-fabricado; b) colapso de silos metálicos

## 5. COMPORTAMENTO DE EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

A maioria dos edifícios de betão armado existentes na zona afectada foi construída após a década de 1980. Do ponto de vista da intensidade da acção, o sismo de 6 de Abril de 2009 teve uma aceleração de pico do terreno superior à aceleração de projecto. De acordo com a norma sísmica em vigor nos últimos 25 anos, a região de Abruzzo foi considerada de classe 2, à qual está atribuída uma aceleração de projecto com o valor de 0.25g. Na zona afectada, as acelerações registadas em diferentes pontos foram superiores, tendo atingido um valor máximo de 0.67g.

Os tipos de dano registados nos diferentes edifícios de betão armado observados pela equipa da FEUP/UA as causas são, na sua grande maioria, danos em elementos não estruturais, nomeadamente nas zonas de apoio e ligação dos painéis de alvenaria de enchimento. Os danos estruturais encontrados foram essencialmente causados por má qualidade dos materiais (betão), existência de recobrimento insuficiente, insuficiente capacidade ao corte de pilares, deficiente pormenorização de nós viga-pilar e desenvolvimento de mecanismos de colapso tipo *soft-storey*. Nas secções seguintes são analisados alguns casos dos edifícios visitados.

### 5.1. Edifícios PET01-02

Os edifícios PET01-02 estão situados na localidade de Pettino e foram construídos em 2007/2008 para uso residencial. Estes edifícios são constituídos por uma estrutura porticada com paredes de alvenaria de enchimento e possuem um núcleo em parede resistente que realiza a caixa de elevadores. São edifícios isolados com rés-do-chão (R/C) e 5 pisos, sem cave, com cerca de 10 apartamentos. Na Figura 12 apresenta-se o esquema estrutural dos edifícios, baseado nas observações realizadas no local, onde é possível verificar que os vãos são pequenos e os pilares apresentam dimensões robustas. Por outro lado, a localização das caixas de escadas e de elevadores introduzem uma excentricidade em planta (direcção X).

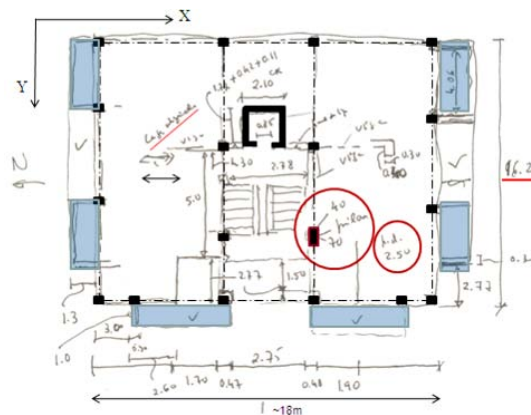


Figura 12: Esquema estrutural da planta dos edifícios PET01-02

Os principais danos observados neste edifício foram danos não-estruturais, (ver Figura 13) associados à rotura no próprio plano dos painéis de alvenaria, ao destacamento de panos exteriores das paredes de alvenaria da fachada e à separação entre os painéis de alvenaria e a estrutura. Os danos em painéis exteriores de alvenaria poderão estar associados à deformação das consolas (avançadas), assim como às elevadas dimensões dos panos de alvenaria e ao não-confinamento dos panos exteriores com deficiente ligação à estrutura e ao pano interior. Verifica-se ainda que o pano exterior estava apoiado nas vigas em menos de metade da sua espessura. Foi ainda verificado, nestes edifícios, a existência de apenas uma forra, com espessura reduzida, de revestimento das vigas, com colagem deficiente e com uma ligação deficiente dos elementos ao pano interior e aos elementos estruturais.





Figura 13: Danos em painéis de alvenaria de enchimento

## 5.2. Edifícios PET04-05-06

Os edifícios denominados por PET 04, 05 e 06, localizados igualmente em Pettino, são edifícios isolados de R/C com dois ou três pisos, sem cave e para uso residencial multifamiliar. Os edifícios foram construídos no início dos anos 1980 e possuem uma estrutura porticada de betão armado com painéis de alvenaria de enchimento. O rés-do-chão destes edifícios tinha a função de garagem. Verificou-se que estes edifícios apresentam uma elevada irregularidade em planta (ver Figura 14, baseada nas observações realizadas no local). Apesar dos 3 edifícios serem muito semelhantes em termos de tipologia, ano de construção, e localização, dois deles sofreram colapso por mecanismo de *soft-storey*. O outro edifício com estrutura semelhante, apesar de também apresentar danos mais concentrados ao nível do R/C, estes tinham uma intensidade muito inferior. A única diferença aparente entre os dois tipos de situação era a cota de construção, que era significativamente inferior no caso do terceiro edifício.

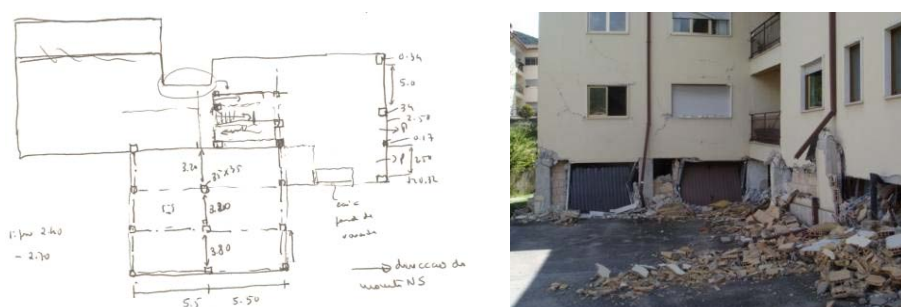


Figura 14: Esquema estrutural da planta e vista geral do edifício PET04

As causas prováveis para os colapsos associados a mecanismos do tipo *soft-storey* poderão estar relacionados com a irregularidade em altura, associado à utilização do R/C como garagem, à irregularidade em planta (por efeitos de torção), à deficiente execução e pormenorização dos nós pilar-viga, com quase ausência de cintas/estribos, às emendas de armadura dos pilares realizadas junto aos nós e à amarração insuficiente das armaduras, como ilustrado na Figura 15.



Figura 15: Danos em nós de elementos de betão armado

### 5.3. Edifício PAG04

O edifício PAG04 está situado na localidade de Paganica. O edifício, de uso residencial, tem uma estrutura porticada de betão armado, sem paredes resistentes e com paredes de alvenaria de enchimento. O edifício é isolado e possui R/C e dois pisos, sem cave. Na Figura 16 apresenta-se o esquema estrutural do edifício, baseado nas observações realizadas no local, onde é possível verificar que se trata de uma estrutura muito regular em planta, com vãos reduzidos (cerca de 4m) em que os pilares têm a maior inércia orientada numa única direcção.

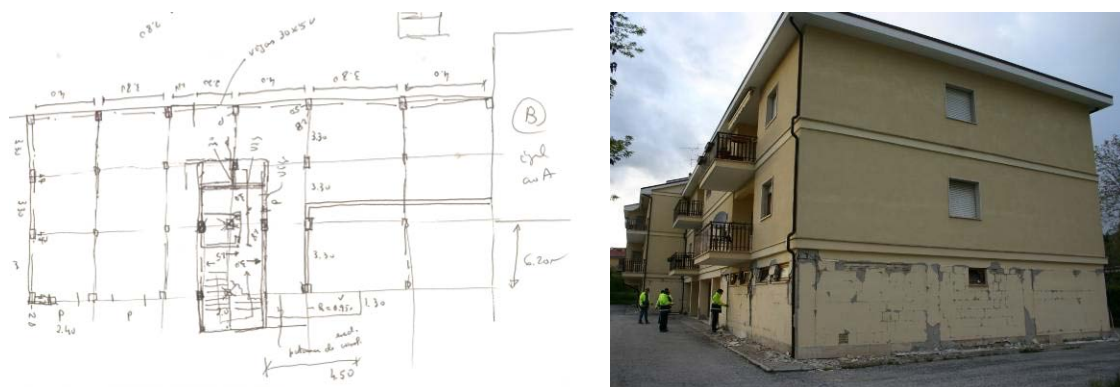


Figura 16: Esquema estrutural da planta estrutural e vista geral do edifício PAG04

Neste edifício foram observados danos não-estruturais nos painéis de alvenaria, associados a mau comportamento no plano e fora do plano, e danos estruturais tais como a formação de rótulas plásticas em pilares e rotura por corte em pilares do R/C. Foi verificada ainda a existência de deficiências de pormenorização da armadura ao nível dos nós viga-pilar como ilustrado na Figura 17.



Figura 17: Danos estruturais no edifício PAG04: a) dano em painel de alvenaria de enchimento no plano; b) rotura por corte dum pilar curto; c) insuficiências de comprimento de amarração num nó de betão armado.

### 5.4. Hospital San Salvatore em L'Aquila

O Hospital San Salvatore é o maior hospital da região, tendo sido construído ao longo de vários períodos distintos, tendo o último bloco sido inaugurado no ano 2000. Trata-se de um conjunto de edifícios de betão armado com estrutura porticada e em que alguns edifícios possuem paredes resistentes de grandes dimensões, e com painéis de alvenaria de enchimento. Muitos dos blocos apresentam configurações irregulares em planta e em altura.

Os principais danos observados nas alvenarias de enchimento têm vários níveis de severidade, com maior incidência nos pisos inferiores, tendo sido igualmente encontrados problemas estruturais, nomeadamente danos nas zonas de rótula plástica de pilares e rotura por corte de paredes resistentes de betão armado (ver Figura 18).

O edifício de acesso às urgências, construído em 2000, possui dois pisos e apresentava danos severos nos pilares de betão armado, devido a irregularidades pronunciadas em planta e em altura como ilustrado na Figura 19



Figura 18: Hospital San Salvatore: a) vista geral, b) danos em painéis de alvenaria; c) danos em paredes de betão armado



Figura 19: Urgências do Hospital San Salvatore

## 6. COMPORTAMENTOS DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA

### 6.1. Tipos de alvenaria encontrados

Em edifícios habitacionais, a alvenaria encontrada era irregular, maioritariamente de pedra e de duas folhas com enchimento. No caso dos edifícios históricos, foram encontradas situações quer de alvenaria irregular, quer de alvenaria regular. A alvenaria tradicional encontrada apresentava um grau de complexidade e de diversidade de materiais muito elevada em que o tijolo pode estar associado a elementos em alvenaria de pedra tradicional, coexistindo diferentes materiais na mesma construção. A alvenaria resistente de tijolo e blocos encontrada é utilizada em edifícios habitacionais uni/multifamiliares de pequena dimensão, tendo sido identificados, em alguns casos, o provisionamento de disposições construtivas recomendadas no código italiano.

### 6.2. Tipologia construtiva

A partir da observação dos métodos construtivos identificados foi possível verificar que os edifícios com paredes resistentes em alvenaria tradicional utilizam, tipicamente, pavimentos e coberturas de madeira com um esquema estrutural nem sempre adequado a acções sísmicas. Em diversas construções, foram encontradas abóbadas e arcos como elementos estruturais de pisos inferiores (térreos e enterrados).

No entanto, diferentes tempos de construção e novas tipologias construtivas levaram a que fossem introduzidos de elementos não tradicionais nas construções, como vigas de coroamento em betão armado com dimensões significativas, pavimentos constituídos por vigamentos metálicos com abobadilhas planas ou em arco, e novas coberturas constituídas por soluções aligeiradas de betão armado com vigas de bordadura que substituem as coberturas originais (ver Figura 20).





Figura 20: Métodos construtivos: a) utilização de arcos como elementos estruturais de pisos inferiores; b) e c) presença de vigas de coroamento em betão armado

### 6.3. Danos e comportamento observado

Foram identificados inúmeros colapsos de paredes para fora do plano. As causas típicas destes danos estão associadas ao efeito negativo do tipo de cobertura, ao facto das paredes de retorno serem insuficientes para restringir deslocamentos, e à existência de longos panos sem travamento. Verificou-se que, em alguns casos, existiam tirantes mas o seu posicionamento não era o mais adequado para garantir a sua eficácia. No entanto, nos casos em que o provisionamento de tirantes foi considerado em níveis diferentes para a ligação entre paredes, a sua contribuição revelou-se eficiente para evitar o colapso (ver Figura 21).



Figura 21: a) e b) Colapso de paredes fora do plano; c) eficiente utilização de tirantes

Verificaram-se, ainda, alguns danos importantes associados ao comportamento em agregado de diferentes edifícios, em que a diferença de alturas dos edifícios condicionou a sua resistência devido à imposição de um caminho de carga diferente do original (ver Figura 22).



Figura 22: Danos associados ao comportamento em agregado de diferentes edifícios

Num número significativo de construções em alvenaria de pedra também foi observado um mecanismo preferencial de comportamento no plano dos painéis (ver Figura 23). Os danos encontrados estão associados à fraca resistência ao corte das alvenarias o que, função do elevado estado de dano global nos edifícios por

formação deste mecanismo, potencia a formação de colapsos locais dos cunhais e aberturas. Em alguns casos, o facto de existir uma maior heterogeneidade do material aumentou a vulnerabilidade das construções para este tipo de comportamento. Em construções de alvenaria regular foram ainda observados danos nas alvenarias por efeitos de corte-escorregamento, associados à fraca resistência ao corte das juntas. Em algumas situações foram observados casos de desagregação de materiais, associados a solicitações fora do plano, no caso de paredes com insuficiente ligação entre panos, ou associados à existência de elementos não-estruturais combinada com solicitações no plano da parede.



Figura 23: comportamento no plano de paredes de alvenaria

#### 6.4. Casos particulares - Edifício de canto em Fossa

Neste edifício de habitação de alvenaria, localizado em Fossa, foram observados danos estruturais de intensidade média na fachada e danos graves no seu interior. Como ilustrado na Figura 24, foi possível verificar a eficiência dos tirantes metálicos, não sendo, no entanto, suficiente para evitar níveis de danos mais elevados. Observou-se que a complexidade de materiais e de geometria do edifício foram factores desfavoráveis em relação à possibilidade de controlar o comportamento do edifício. Por outro lado, salienta-se que, neste edifício, o estado limite de resistência não foi suficiente para evitar perdas humanas.



Figura 24: Colapso de um edifício de habitação de alvenaria em Fossa

#### 6.1. Casos particulares - Edifício de canto em Onna

Foi identificado um edifício de habitação, localizado em Onna, com uma estrutura complexa e com diferentes materiais que constituem a alvenaria resistente. O edifício tem vigas de bordadura e laje de cobertura em betão armado. Foi observado o colapso parcial do edifício com torção do corpo existente (ver Figura 25).

Da observação no local, aponta-se como causas prováveis para o colapso a reduzida resistência à tracção da alvenaria na ligação às vigas de bordadura (corte ao nível dos pisos), à elevada irregularidade estrutural, assim como ao efeito conjunto da acção sísmica horizontal e vertical.



Figura 25: Edifício de canto em Onna

## 7. CONCLUSÕES E LIÇÕES PARA PORTUGAL

As observações relacionadas com os procedimentos de gestão da catástrofe levantaram algumas questões importantes para Portugal, nomeadamente, i) que tipo de mobilização de técnicos se pode esperar no caso de ocorrer um sismo em Portugal?; ii) qual a possibilidade de formar técnicos credenciados pela Ordem dos Engenheiros ou outras entidades?; iii) que fichas poderão ser adoptadas para levantamento de danos?; iv) se existem listas regionais/locais com as prioridades de intervenção em património classificado e/ou edifícios institucionais e v) se existem levantamentos arquitectónicos/estruturais desse património que permitam definir decisões de intervenção.

No que se refere à observação dos danos em edifícios de betão armado, em especial os danos em elementos com função não estrutural, como as paredes de alvenaria de enchimento, verificou-se que as soluções utilizadas em L'Aquila, são em muitos casos, semelhantes às soluções preconizadas em Portugal. Na avaliação de edifícios existentes e dimensionamento de novos edifícios considera-se que, no futuro, se deveria ter em consideração os painéis de alvenaria no cálculo estrutural, nomeadamente através de verificações simples realizadas após o dimensionamento, e ter uma atenção particular à variação de rigidez entre o primeiro piso e os restantes (pé-direito, dimensões das aberturas, distribuição das paredes de alvenaria). Na avaliação das estruturas antigas (construídas até à década de 1970), para além dos cuidados já referidos, deve ser dada atenção especial também à influência da armadura lisa e à pormenorização de armadura (especialmente ao nível nos nós viga-pilar, da armadura transversal em pilares e dos pormenores de amarração).

A partir da avaliação do comportamento de edifícios de alvenaria tradicionais, observou-se que o elevado dano das estruturas resulta, por um lado, da insuficiente resistência sísmica da paredes no seu plano e fora do seu plano, mas também da utilização de soluções de reforço recentes e intrusivas em betão armado que não beneficiaram a resistência sísmica dos edifícios. As soluções de reforço tradicionais, através de tirantes metálicos, exibiram um bom comportamento, demonstrando assim que são uma solução possível de utilizar. A tipologia da alvenaria tradicional de pedra encontrada é muito semelhante à alvenaria tradicional portuguesa, esperando-se, portanto, que o comportamento dos edifícios portugueses seja semelhante ao observado na zona afectada, o que reforça a necessidade da análise da segurança e do reforço das construções existentes.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Protecção Civil Italiana, ao corpo de bombeiros e ao Professor Giorgio Monti da Universidade de Roma, pela ajuda em garantir o acesso com segurança às zonas afectadas. Os autores agradecem o apoio financeiro dado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, nomeadamente através da bolsa de doutoramento atribuída ao primeiro autor (SFRH/BD/63032/2009) e ao segundo autor (SFRH/BD/32820/2007).