

DANOS SÍSMICOS EM CENTROS HISTÓRICOS E MONUMENTOS: A EXPERIÊNCIA DE SISMOS RECENTES E CONSEQUÊNCIAS PARA PORTUGAL



Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
LNEC
Lisboa
alf@lnec.pt

SUMÁRIO

Passado cerca de um ano desde a ocorrência a 6 de Abril de 2009 do sismo de L'Aquila, capital da região Abruzzo em Itália, apresentam-se as principais conclusões a retirar relativamente aos danos ocorridos em Igrejas, Monumentos e edifícios e em alvenaria de pedra irregular, de uso público ou privado, localizadas quer nos centros históricos da cidade de L'Aquila quer nas restantes povoações circundantes. Dar-se-á particular ênfase aos principais mecanismos de colapso dos sistemas estruturais mencionados que possuem em comum o facto de serem todos constituídos por elementos verticais estruturais em alvenaria de pedra irregular, isto é, paredes constituídas por pedras de dimensões médias, ligadas entre si por uma argamassa de cal e areia, apresentando, ou não cunhais em cantaria em função da importância e dimensão das construções. Explica-se a forma como procederam as autoridades Italianas presentes no terreno para o levantamento dos danos sofridos e referem-se as medidas de intervenção imediatas utilizadas com o objectivo evitar o colapso de algumas estruturas que apresentavam colapso eminente após terminada a crise sísmica. Esta comunicação é fruto dos ensinamentos obtidos por um conjunto seis missões à região de Abruzzo realizadas por mais de duas dezenas investigadores portugueses pertencentes ao LNEC e a outras Universidades Portuguesas (IST, U. Aveiro, FEUP, U. Minho) e que de imediato reconheceram a importância que este sismo possuía para Portugal dada as semelhanças existentes entre a região de Abruzzo em Itália e algumas regiões de Portugal em termos ocupação do território e dos sistemas construtivos utilizados em particular no que concerne às estruturas de alvenaria de pedra.

Palavras-chave: Sismos, centros históricos, monumentos, igrejas, edifícios em alvenaria de pedra, mecanismos de colapso.

1. A CRISE SÍSMICA DE ABRUZZO

Um sismo de magnitude 5,8 atingiu o local L'Aquila, capital da região Abruzzo em Itália, às 3:33, AM hora local, em 6 de Abril de 2009, *MIC report EU* [1]. Segundo o Dr. Paolo Marsan da protecção civil italiana, a área afectada é um vale estreito com um depósito de aluvião de até 500m, cercado dos dois lados, até 2000m montanhas altas em calcário. A profundidade do hipocentro foi de cerca de 8 km., Portanto, o sismo foi bastante superficial dado que a profundidade focal típica na região dos Apeninos é de 20km. A intensidade máxima foi estimada em 8,5 MCS.

O evento corresponde a um mecanismo de falha normal, e a rotura de falha é visível à superfície em diferentes locais, por exemplo, na aldeia de Paganica. Muitas aldeias foram afectadas em locais com depósitos de aluviões de 300m. Esta foi, por exemplo o caso das aldeias de Onna e Paganica, que foram quase destruídos pelo sismo, e em que acelerações de até 0.6 g foram registadas (o máximo registado foi de aceleração de pico do solo 0.68g).

Na cidade de L'Aquila, as condições geológicas são muito diferentes, porque a cidade foi construída sobre um conglomerado duro que se encontra sobre o solo aluvionar do vale. Uma aceleração máxima do solo de 0.35g foi registada logo abaixo da camada de conglomerado. Esta morfologia do terreno originou um conjunto complexo de amplificação locais coexistindo locais muito próximos com danos muito elevados e danos praticamente nulos.

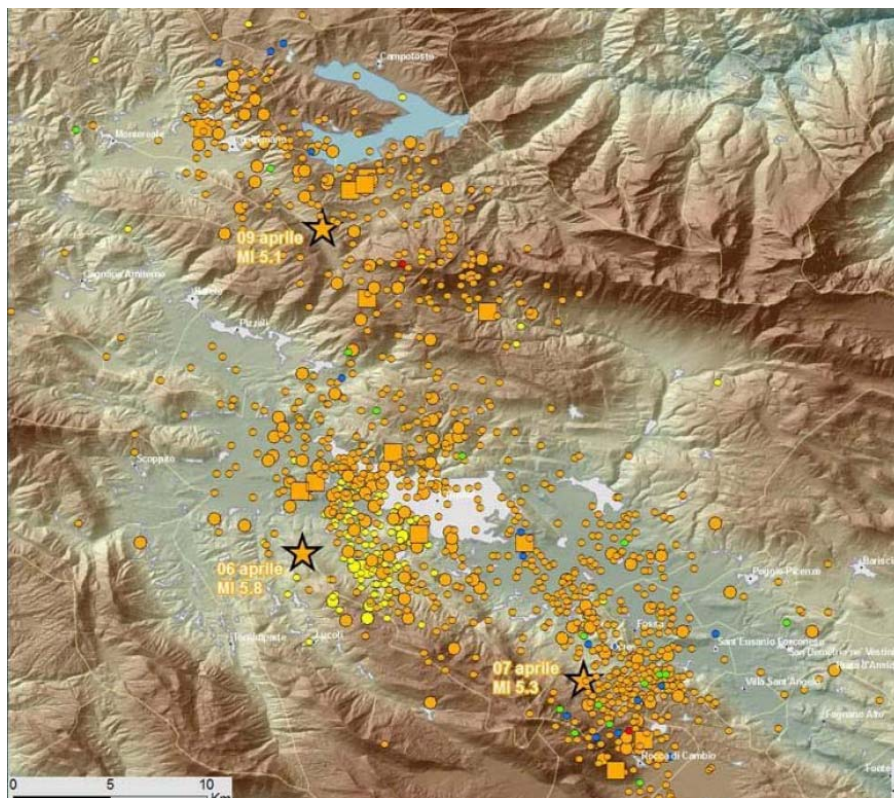


Figura 1. Orografia da região de Abruzzo e epicentros do sismo principal e réplicas da crise sísmica de Abruzzo 6 de Abril de 2009, *MIC report EU* [1].

O sismo principal foi precedido por uma intensa actividade sísmica, e foi seguido por numerosas réplicas Fig 1. O epicentro do segundo choque principal ocorreu a Sudeste do evento principal, enquanto uma terceira teve lugar Norte. Verificou-se a ocorrência contínua de numerosas réplicas durante praticamente um mês.

2. DANOS NO PATRIMÓNIO HISTÓRICO EDIFICADO

2.1 Levantamento dos danos

No levantamento dos danos ocorridos nos edifícios históricos e monumentais foram utilizadas as fichas preparadas pelo Departamento de Protecção Civil Italiano (DPC-IT Gruppo di Lavora Beni Culturali - GLABEC), respectivamente para as igrejas (modelo ADC) e edifícios (modelo B-DP), aprovado por uma Portaria de 23 de Fevereiro de 2006. As fichas são compostas por diferentes secções que referenciam: informações gerais como denominação, localização, propriedade e finalidade de uso; informação sobre a edificação, as suas dimensões principais, a avaliação dos danos quer estruturais quer artísticos, a avaliação da usabilidade; sugestões no que respeita às medidas de urgentes de intervenção e a quantificação dos danos económicos.

A avaliação dos danos estruturais baseia-se na identificação do estado de danos atingidos pelos diferentes mecanismos de colapso que podem ser activados num edifício de grande porte (igreja ou monumento) em alvenaria de pedra através da avaliação do nível de activação cinemática dos mecanismos potenciais de colapso, global ou local, associados a cada subestrutura *Giuffre, 1991* [2].

Mais concretamente, a ficha das igrejas, identifica por 28 mecanismos cinemáticos potenciais geralmente detectáveis neste tipo de construções, já a ficha dos monumentos identifica apenas 22 mecanismos. Os mecanismos identificados individualizam para cada subestrutura em análise, mecanismos de primeira tipo (colapso com derrube para fora do plano) e os mecanismos de segundo tipo (colapso no plano da parede).

Segundo *Modena, et. al 2009* [3] também *Costa, 2009* [4] e a própria experiência do autor por ocasião da sua participação na missão do MIC, no caso das igrejas da região de Abruzzo e para o sismo de 6 de Abril os mecanismos referenciados pela ficha demonstraram uma óptima correspondência com o que a realidade observada no terreno, isto parece dever-se ao uso de elementos tipológicos tais como fachada principal, nave, transepto, abside e arcos, que são sistemas estruturais quase sempre presentes nas igrejas. Resultou portanto numa ficha rápida e de fácil preenchimento pelas equipas no terreno encarregues de as preencher, que prevê uma avaliação padronizada do nível dos danos nas construções, essencialmente libertas de avaliações subjectivas realizadas pelos técnicos que a preenche, *Lagomarsino et al., 2001* [5].

Pelo contrário, parece ser consensual que a ficha para a avaliação dos monumentos, usado pela primeira vez em Abruzzo, não revelou a mesma eficácia. Efectivamente, o maior obstáculo encontrado na utilização desta segunda ficha relaciona-se com a dificuldade em

tipificar todos os edifícios monumentais, que não sejam de culto, dentro da mesma categoria, definida como monumentos de forma genérica, tratando-se todavia de estruturas complexas, muito diferentes entre si, tornando a tarefa de tipificação num número praticável de subestruturas e respectivos mecanismos cinemáticos de colapso relativamente complexa. Sugerem-se portanto a execução de testes, realizados em grande escala, que poderão recorrer à definição de índices de dano globais para a quantificação dos prejuízos económicos e se possível simplificar ficha de avaliação de danos de monumentos [3]. Refira-se ainda, a este respeito, que cinco meses após o sismo, o levantamento de todas as igrejas estava concluído estando apenas em vias de conclusão o preenchimento das fichas dos monumentos relativas aos casos que se encontravam com utilização impedida.

Das cerca de 1000 igrejas inspeccionadas identificaram-se 240 como possíveis de ocupação e uso imediato pelas populações. Dos 760 casos restantes os mais urgentes e graves foram seleccionados para sofrerem intervenções de segurança provisórias e imediatas de estabilização estrutural realizadas pelo Corpo de Bombeiros.

A recolha sistemática de dados objectivos nas bases de dados dos levantamentos de danos permitiu compreender comportamento geral e as vulnerabilidades específicas de diferentes tipologias [3]. Por exemplo, num tratamento inicial feito com base numa amostra de 173 igrejas, analisado nos três primeiros meses de actividade pelo grupo de trabalho da Universidade de Pádua, Costa, 2009 [5], mostra-se como as paredes de fachada das igrejas e outros elementos estruturais salientes representam uma vulnerabilidade particularmente importante destas tipologias.

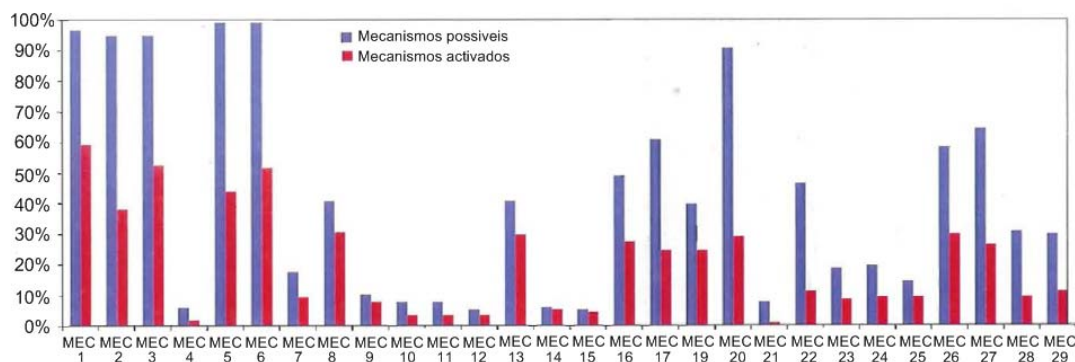


Figura 2. Percentagens de *mecanismos* de colapso *possíveis* e *mecanismos activados* para uma amostra de 172 igrejas num universo de 1000 igrejas que foram inspeccionadas após o sismo de L'Aquila, adaptado de Costa, et. al 2009 [5].

Tomando por base a amostra referida apresenta-se um gráfico na Fig. 2, que mostra as percentagens de *mecanismos potenciais* identificados para as igrejas (barras a azul) e a percentagem de *mecanismos efectivamente activados* durante a crise sísmica de Abruzzo (barras a vermelho). Observe-se como os mecanismos de fachada principal (Mec.1: derrube da fachada principal; Mec.2: mecanismo de derrube do topo da fachada principal; Mec.3: mecanismos de ruptura no plano da fachada principal por esforço transversal excessivo), para além de serem bastante frequentes exibem altas percentagens de activação em média 50% [5]. Também os mecanismos de colapso associados à existência de elementos

salientes (transeptos, absides, etc.), não obstante a fraca presença na amostra em análise, exibem uma elevada percentagem de activação; de entre estes destacam-se os mecanismos da cúpula e lanternim, respectivamente Mec.14 e Mec.15.

Nas Fig.3 e 4 exibem-se imagens de algumas igrejas que sofreram danos elevados e que mostram a activação de alguns dos mecanismos agora mencionados.



Figura 3. Activação do mecanismo de derrube global da fachada principal de uma igreja em L'Aquila (Mec.1, direita) e derrube do topo da fachada principal de uma igreja em Onna (Mec.2, esquerda).



Figura 4. Activação de um mecanismo de colapso de uma cúpula (Mec.14, esquerda) e derrube de torre sineira (Mec.27, direita) de duas igrejas em L'Aquila

2.2 Técnicas provisórias de estabilização estrutural

Conforme já referido o mecanismo de derrube total ou parcial da fachada principal de igrejas foi identificada na maioria das igrejas danificadas, com diferentes níveis de activação. As medidas de intervenção provisória para estabilização estrutural dessas fachadas podem ser realizadas de duas formas distintas [3]: através de sistemas tradicionais de escoramento com estacas de madeira ou, através de cintagem ou atirantamento materializados através da colocação de cordas, cintas em poliéster tirantes em aço, etc. Na Fig 5 e Fig.6 exemplificam-

se casos de aplicação dessas metodologias provisórias de estabilização estrutural realizadas pelos Corpos de Bombeiros presentes em Abruzzo [1]

Os dois tipos de acções correspondem a diferentes intervenções estruturais: o primeiro destina-se a recuperar parcialmente a rigidez da estrutura; no segundo caso, as cintas (ou os tirantes) visam ligar elasticamente os diferentes blocos rígidos separados pela activação das cadeias cinemáticas que originam um mecanismo de colapso, *Dolce et al., 2002* [6].



Figura 5. Escoramento de uma fachada principal da Catedral de Onna (esquerda) e de cintagem de uma torre sineira de uma igreja a 20km de L'Aquila (direita)

Modena, et. al 2009 [3] menciona as vantagens da utilização do segundo método de cintagem em relação aos escoramentos preconizados pelo primeiro método, referindo que os escoramentos implicam a ocupação de uma faixa lateral de terreno, contíguo à parede, para o posicionamento da estrutura de escoramento o que pode impedir a livre circulação. Também a altura elevada das paredes não dispensa escoramentos a vários níveis o que faz aumentar consideravelmente a ocupação dos terrenos contíguos, tornando mais complexa toda a estrutura de escoramento.

Refira-se que na utilização de escoramentos devem utilizar-se um número suficiente de escoras contra a parede que evite o possível punçoamento localizado das mesmas devido à ocorrência de réplicas, de alta intensidade, que podem originar danos localizados nas paredes. Tal densidade de barrotes de madeira terá que ser removida quando começarem as obras de consolidação e restauro do edifício, facto que, deve ser considerado na escolha desta técnica provisória de estabilização estrutural.

A intervenção realizada com as cintas ou tirantes não necessita de espaço circundante sendo a sua remoção relativamente simples. Contudo, a viabilidade da cintagem implica a ausência de desagregação da parede por fendilhação difusa sendo portanto eficaz quando se pode identificar claramente a formação de mecanismos de blocos rígidos que podem rodar uns sobre os outros. Tal facto depende naturalmente da qualidade da alvenaria e da presença ou não de cunhais em pedra ou de outros elementos de ligação de paredes ortogonais.

A cintagem e a colocação de tirantes possibilitam a interligação entre paredes ortogonais transferindo as forças horizontais, que potencialmente causariam o derrube de paredes, para outros elementos verticais perpendiculares que possuem rigidez e resistência mais elevadas às forças horizontais de derrube. Contudo a relação entre largura e altura do pano parede, quando muito elevada (parede muito longa em relação à sua altura, sem paredes ortogonais) pode tornar menos efectiva o efeito desejado de cintagem obrigando a cintagens muito densas. Tal facto pode ser em parte obviado utilizando elementos de rigidez adicionais que impeçam a deformação da parede para fora do seu plano; por exemplo a utilização de vigas colocadas horizontalmente ao longo da largura da parede e ligados às extremidades das paredes por tirantes exteriores de ligação com as paredes extremas ortogonais mais rígidas e resistentes.

Pode portanto afirmar-se que do ponto de vista estrutural as intervenções com cintas ou tirantes destinam-se a realizar a conexão de blocos rígidos de paredes individualizados por fendilhação concentrada em num número reduzido de fendas de dimensão apreciável causadas pelo sismo (e.g. destaque de da parte superior cunhais de edifícios, derrube global de paredes na direcção perpendicular ao plano, etc). A estrutura danificada tem uma rigidez global inferior à que possuía antes do sismo contudo o posicionamento correcto das cintas confere boa consistência à ligação entre os blocos restituindo a capacidade de deformação relativa entre blocos e, em consequência, aumento da rigidez a estrutura a forças horizontais. Tal efeito de consolidação estrutural pode ser facilmente monitorizado por metodologias de ensaios de identificação dinâmica modal *in situ* conforme é sugerido em Ramos *et al.*, 2007 [8].

3. DANOS NOS CENTROS HISTÓRICOS

3.1 Levantamento dos danos

De acordo com Carocci, et all [9], os danos observados nos edifícios correntes de alvenaria de pedra, situadas no centro histórico da cidade de L'Aquila e também noutros centros urbanos de localidades vizinhas a L'Aquila, podem ser sistematizados de acordo alguns factores de vulnerabilidade específicos do edificado que são; (i) organização estrutural e localização do edifício em relação aos edifícios adjacentes, (ii) tipo de estrutura da cobertura (iii) tipo de estrutura dos pavimentos.

3.1.1 Organização estrutural e localização do edifício em relação a edifícios adjacentes.

No que diz respeito à localização do edifício relativamente aos edifícios adjacentes observou-se um facto, sobejamente reconhecido, de que edifícios localizados nos cantos de quarteirões, ou localizados nos extremos de um conjunto de blocos em banda, apresentam danos mais elevados do que os outros edifícios do bloco.

Além disso a presença de uma boa organização e regularidade das paredes resistentes verticais representam um aspecto positivo do comportamento sísmico deste tipo edifícios

face à acção do sismo que se fez sentir em Abruzzo. Refira-se a este propósito que a distância regular entre paredes verticais, a regularidade e quantidade de aberturas tanto, nas paredes de fachada com nas paredes ortogonais às fachadas, muitas vezes interrompidas por intervenções estruturais que visam criar espaços arquitectónicos mais amplos, seja no piso térreo, seja nos pisos superiores, são práticas construtivas que demonstraram introduzir apreciável vulnerabilidade sísmica neste tipo de edifícios.

Não obstante tais factos a razoável qualidade das alvenarias, associada à presença de ferrolhos de ligação dos pisos em madeira às paredes exteriores, ou mesmo de tirantes em ferro de ligação entre paredes, desempenhou uma função importante de mitigação de danos observados neste sismo no centro histórico de L'Aquila.

Contudo tais dispositivos, que promovem uma melhor redistribuição das forças de inércia horizontais geradas pelos sismos entre as paredes resistentes verticais, não são muito frequentes nos aglomerados de edifícios rurais da região de Abruzzo. Tal pode ser devido ao menor porte dos edifícios aí existentes. Este facto aliado à menor qualidade das alvenarias existentes nas zonas rurais, justifica, em certa medida, os maiores danos observados nessas zonas relativamente aos danos observados no centro histórico de L'Aquila para edifícios de alvenaria de pedra.

3.1.2 Tipo estrutura da cobertura.

Como é sabido as estruturas de cobertura em madeira, desde que possuam elementos de travamento que evitem os esforços horizontais elevados na cimalha das paredes de fachada e de tardoz e, nas duas empenas laterais, sobre as quais a cobertura assenta, não constituem factores de aumento de vulnerabilidade sísmica para os edifícios em alvenaria de pedra.

Todavia o estado de degradação dos beirais e da estrutura das coberturas, por vezes adulteradas na sua função estrutural inicial devida à utilização de sótãos como espaços de habitação, Carocci et al., 2009 [9], fez com que se observassem um elevado número de queda de beirais, e mesmo de cimalthas de paredes exteriores de edifícios, como pareceu frequente no centro histórico de L'Aquila.

Em certas zonas rurais verificaram-se numerosos colapsos de paredes de alvenaria que, como já foi dito, são de muita fraca qualidade. Tais paredes não conseguiram suportar o peso elevado coberturas em betão armado sendo responsáveis por um número relativamente elevado de vítimas mortais.

3.1.3 Tipo de estrutura dos pavimentos.

No caso dos pavimentos observou-se, mais uma vez, que regra geral as alterações introduzidas à estrutura horizontal de suporte original dos pisos tiveram uma influência nefasta no comportamento sísmico global dos edifícios em alvenaria de pedra; as intervenções recentes são contudo muito diferenciadas, em particular nos centros maior concentração populacional, e parecem ter favorecido a formação de certos tipos de danos descritos por Carocci et al., 2009 [9].

Genericamente essas intervenções estruturais consistem na substituição completa da estrutura de suporte do pavimento original, constituído por um vigamento em madeira, por vigas metálicas dispostas paralelamente, sendo os vãos entre elas fechados por pequenos arcos em tijolo burro. Tal técnica, se bem executada, não torna a estrutura mais vulnerável. Contudo a necessidade de realizar por vezes furos nas paredes para entrega das vigas fragiliza a parede localmente podendo provocar o seu colapso,

Observou-se também fenómenos de “martelamento” das vigas dos pisos contra as paredes de fachada que as suportam. Tais fenómenos são possivelmente devidos a uma fraca ligação das vigas dos pisos às paredes o que pode produzir movimentos relativos e choque entre ambos os elementos.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões que se retiram sobre os levantamentos dos danos observados pela ocorrência do sismo de L’Aquila de 6 de Abril de 2009 tanto no que se refere aos danos provocados no património histórico edificado (igrejas e monumentos) como aos danos infligidos nos centros históricos (edifícios de alvenaria de pedra) da cidade de L’Aquila e das povoações da região de Abruzzo que foram afectadas, resumem-se nos seguintes pontos:

1. Os danos provocados nas igrejas e monumentos são bastante elevados tendo ocorrido perdas quase irreversíveis de património histórico arquitectónico e cultural.
2. A ficha de levantamentos dos danos causados nas igrejas revelou-se bastante efectiva e devidamente ajustada aos principais mecanismos de colapso observados in situ. Sugere-se a sua adaptação para Portugal dada as naturais semelhanças entre as igrejas existentes em Portugal e as existentes na Região de Abruzzo em Itália.
3. Pelo contrário a ficha utilizada nos levantamentos dos danos em edifícios monumentais revelou-se inapropriada aos casos observados e de difícil utilização.
4. São basicamente duas as técnicas utilizadas nas medidas provisórias de estabilização estrutural das construções em alvenaria de pedra. A primeira, através de escoramentos, revelou-se bastante dispendiosa e porventura excessiva segundo alguns autores. A segunda, através de cintagens ou colocação de tirantes, mais eficaz e económica mas que pressupõem um conhecimento dos mecanismos que foram activados. Recomenda-se o estudo destas medidas provisórias de estabilização estrutural em Portugal e a eventual adaptação dos manuais Italianos em que elas baseiam para o caso Português.
5. Os danos no centro histórico de L’Aquila ocorridos em edifícios de alvenaria de pedra foram relativamente baixos. Tal ficou a dever-se à história sísmica do passado em que muitas dos edifícios teriam sofrido medidas de reparação; a presença de ferrolhos e tirantes ligação entre paredes é bastante corrente, o espessamento das paredes ao nível do piso térreo é também frequente. Genericamente os edifícios em alvenaria de pedra existentes em Portugal são mais vulneráveis que os que existem no centro histórico de L’Aquila, sendo portanto estas observações não extrapoláveis para Portugal,

6. Os danos observados em edifícios de alvenaria pedra de algumas localidades rurais próximas de L'Aquila foram bastante severos sendo estes devidos, em certa medida, à intensidade elevada do sismo nesses locais produzido por fenómenos de amplificação dos movimentos sísmicos intensos decorrentes das características de solos aluvionares aí existentes. Porém, a fraca qualidade da alvenaria utilizada nesses locais a que se soma as sucessivas intervenções que adulteraram os sistemas estrutural original daqueles edifícios deve também ser considerado um factor que justifica os danos elevados referidos e o elevado número de mortes ali ocorridas.

AGRADECIMENTOS

Grande parte deste trabalho resultou da compilação da informação existente sobre o sismo de L'Aquila que o autor teve acesso tanto através da sua participação na missão técnica do Monitoring and Information Centre (MIC), DG Environment, European Commission como também através de todos os outros colegas que integraram as diferentes missões à região afectada de Abruzzo.

Em particular os trabalhos de síntese apresentados no nº 03 da revista *Progettazine Sismica*, especialmente dedicada ao sismo de L'Aquila [3] e [9], bem como a excelente dissertação de mestrado desenvolvida pela Eng^a Catarina Costa da FEUP [6], constituem elementos importantes de referência utilizados nesta comunicação.

REFERÊNCIAS

- [1] MIC Assessment Team, Italy 2009 – “Technical Report”. Ed. por Monitoring and Information Centre (MIC), DG Environment, European Commission.
- [2] Giuffrè, A. 1991 – “Lecture sulla meccanica della muratura storiche”. Kappa Ed., Roma.
- [3] Modena, C. e Binda, L. 2009 – “Edilizia storica monumentale. Salvaguardia degli edifici di interesse storico artistico nell'emergenza post-sisma”, *Progettazine Sismica*, Vol. 03, IUSS press, Pavia 107 p.
- [4] Lagomarsino et al., 2001 – “Vulnerabilità sismica delle chiese: proposta di una metodologia integrata per il rilievo, la prevenzione ed il recupero del danno in emergenza”, *X Convegno ANIDIS - L'ingegneria sismica in Italia*. Potenza-Matera Settembre de 2001 Italia..
- [6] Costa, C.Q.M. 2009 – “Seismic Vulnerability of Historical Structures. Damage state of the Abruzzo churches, in sequence of 2009 earthquake. MSc Erasmus thesis, Erasmus Mundus Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions, Universidad de Padua (<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/8275>)
- [7] Dolce, M. Liberatore, D, Moroni, C., et al 2002 – “OPUS: Manuale delle Opere Provvisorie Urgenti Post-Sisma”, (<http://postterremoto.altervista.org/index.php>)

- [8] Ramos, L.F.; Marques, L.; Lourenço, P.B.; Roeck, G., Campos Costa, A.; Roque, J. (2007). – “Monitoring Historical Masonry Structures with Operational Modal Analysis: Two Case Studies”, *2nd International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, April 30–May 2, 2007, vol. 1, pp. 161-168.* <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9175/1/128ramos-18.pdf>
- [9] Carocci, C.F., e Lagomarsino, S. 2009 – “Gli edifici in muratura nei centri storici dell’Aquilano”, *Progettazine Sismica*, Vol. 03, IUSS press, Pavia 117 p.