

Lo scenario di danneggiamento delle costruzioni dell'Aquila a seguito del terremoto del 2009

*Bruno Calderoni**, *Aurelio Gherst***, *Pietro Lenza**

1. Il terremoto e gli edifici di epoche diverse

Un terremoto costituisce, per qualsiasi territorio da esso colpito, un evento traumatico che, al di là della tragedia umana delle vittime, lascia segni sul costruito tali da condizionare, soprattutto dal punto di vista economico, la ripresa ed il successivo sviluppo dello stesso territorio. Ogni zona urbanizzata, però, soprattutto in relazione al costruito storico, presenta le proprie specificità connesse alle tecniche costruttive locali, allo stato dell'arte del passato nonché all'applicazione delle normative per gli edifici costruiti nell'ultimo secolo con tecnologie più moderne, che meritano di essere analizzate approfonditamente.

D'altronde allo stesso tempo l'evento sismico, a livello tecnico-scientifico, si trasforma da tragica catastrofe ad irripetibile occasione per sperimentare estesamente il comportamento globale degli edifici di una certa zona, attesa la difficoltà di sottoporre a prove di laboratorio modelli in scala reale sufficientemente rappresentativi ed in numero statisticamente adeguato. È quindi con lo spirito del cronista unito a quello del ricercatore che in questo articolo si descriverà (ovviamente dal punto di vista del tecnico ingegnere) lo scenario dei danni che le costruzioni dell'Aquila hanno mostrato a seguito del terremoto del 2009.

Saranno considerati sia gli edifici con struttura in muratura che quelli con struttura in cemento armato (c.a.). I primi coprono un arco di tempo molto vasto, perché realizzati da sempre: non è difficile, quindi, trovare edifici (o almeno parti di essi) risalenti al Cinquecento o al Seicento, così come edifici molto più recenti, costruiti nel corso del Novecento fino ai giorni nostri. I secondi invece sono solo costruzioni «moderne», in quanto apparse nel mondo delle costruzioni a partire dai primi decenni del Novecento.

È ovvio che le costruzioni più antiche non sono opere progettate nel senso moderno del termine ma realizzate seguendo le «regole dell'arte», mentre quelle più moderne (del Novecento) hanno dovuto seguire le norme tecniche (cioè le leggi) vigenti all'epoca dell'edificazione. In particolare per la zona dell'Aquila la prima normativa significativa è quella del 1915, emanata a seguito del disastroso terremoto di Avezzano.

* Napoli, Dipartimento di Ingegneria strutturale, Università di Napoli «Federico II».

** Catania, Dipartimento di Ingegneria civile e ambientale, Università di Catania.

2. *Gli edifici in muratura*

Ci si occupa in particolare degli edifici in muratura cosiddetti ordinari, cioè quelli solitamente adibiti a funzione residenziale, che costituiscono l'edilizia di tessuto del centro storico dell'Aquila. L'analisi dei danni subiti da tali edifici, pur essendo in qualche modo resa specifica dalle tecniche costruttive locali, è sicuramente utile per interpretare sempre meglio il comportamento sismico di tali tipologie di edifici.

Scendendo un po' in dettaglio, l'edificio ordinario in muratura è in genere concepito in modo da presentare elementi portanti (pareti verticali murarie) in entrambe le direzioni principali della pianta, determinando una configurazione globale di tipo scatolare. Pur essendo caratterizzato da un assetto geometrico complessivo abbastanza invariabile nel tempo, nel corso dei secoli esso ha subito però notevoli modifiche che hanno interessato in particolare modo l'impalcato, il cui ruolo strutturale è fondamentale per il comportamento complessivo dell'edificio nei confronti sia dei carichi verticali che delle azioni sismiche. Questo elemento strutturale è stato assunto da M. Pagano (1968) come discriminante per la classificazione degli edifici in muratura, relativamente al loro comportamento nei confronti dei carichi verticali, distinguendo tra *prima*, *seconda* e *terza classe*. Nel presente articolo la suddetta classificazione sarà utilizzata per analizzare anche il comportamento sismico di tali tipologie strutturali (Lenza, Ghersi, 2011), facendo in particolare riferimento ai danni subiti dagli edifici del centro dell'Aquila.

3. *Lo scenario dei danni per gli edifici della prima e della seconda classe*

Appartengono alla *prima classe* gli edifici realizzati integralmente in muratura. In essi tutte le strutture orizzontali ed anche le parti superiori delle aperture sono realizzate con intradossi curvi (volte ed archi) per ottenere un regime di sollecitazione di sola compressione, necessario a causa della scarsa resistenza a trazione della muratura. Tale elementi esercitano però spinte sulle pareti, tanto più elevate quanto più il corrispondente arco è ribassato. Pertanto in questa tipologia la capacità di sopportare i carichi verticali (dai quali dipendono le spinte) è strettamente correlata al peso proprio della struttura stessa, che di conseguenza presenta pareti massicce, di spessore elevato. Questi edifici possono essere soggetti a comportamento patologico (dissesto) per insufficienza dimensionale delle pareti o per ragioni esterne (ad esempio cedimenti fondali). In tali casi sotto l'azione delle spinte delle volte le pareti murarie iniziano a ruotare verso l'esterno, con formazione di fessure verticali in corrispondenza dei distacchi di ampiezza crescente dal basso verso l'alto. Ciò comporta l'abbassamento delle volte con conseguente aumento delle spinte, in un processo non lineare che può portare al crollo sia delle pareti che delle volte stesse.

Gli edifici della *seconda classe* sono costituiti da elementi murari verticali che sostengono solai orizzontali semplicemente appoggiati, realizzati con travi in legno o in ferro resistenti a flessione. Le pareti murarie, non più

soggette a spinte degli archi e delle volte, si presentano nel complesso come un'unica struttura pluricellulare, che sembrerebbe in grado di sopportare anche significative azioni orizzontali. In realtà tale positivo comportamento globale può venire facilmente meno a causa di svariati fattori (fisiologici) connessi direttamente alla tipologia costruttiva (azione concentrata delle travi dei solai, differente entità di carico su pareti tra di loro ortogonali, variazioni termiche tra interno ed esterno, spinte delle architravi al di sopra dei vani) che portano al distacco delle pareti di facciata da quelle ortogonali (rottura delle croci di muro) ed alla separazione delle stesse pareti in fasce verticali indipendenti. Le singole porzioni di muratura, che così si vengono a creare, tendono a ruotare verso l'esterno (apertura «a carciofo») a causa dell'eccentricità delle risultanti dei pesi dovuta alla forma stessa delle pareti perimetrali, che in genere presentano le riseghe tutte dal lato interno.

Gli edifici della *prima* e della *seconda classe* e quelli misti di tali tipologie possono definirsi come edifici in muratura «antichi», realizzati in genere sino alla fine dell'Ottocento in assenza di specifiche norme tecniche. La mancanza di efficaci collegamenti tra le pareti murarie e tra esse e gli impalcati ne costituisce il principale fattore di vulnerabilità e condiziona notevolmente il loro comportamento sismico. I muri di facciata, sollecitati dalle forze d'inerzia perpendicolari ai muri stessi, tendono infatti a ribaltare fuori dal piano verso l'esterno, provocando il crollo rovinoso parziale o totale dell'intero fabbricato.

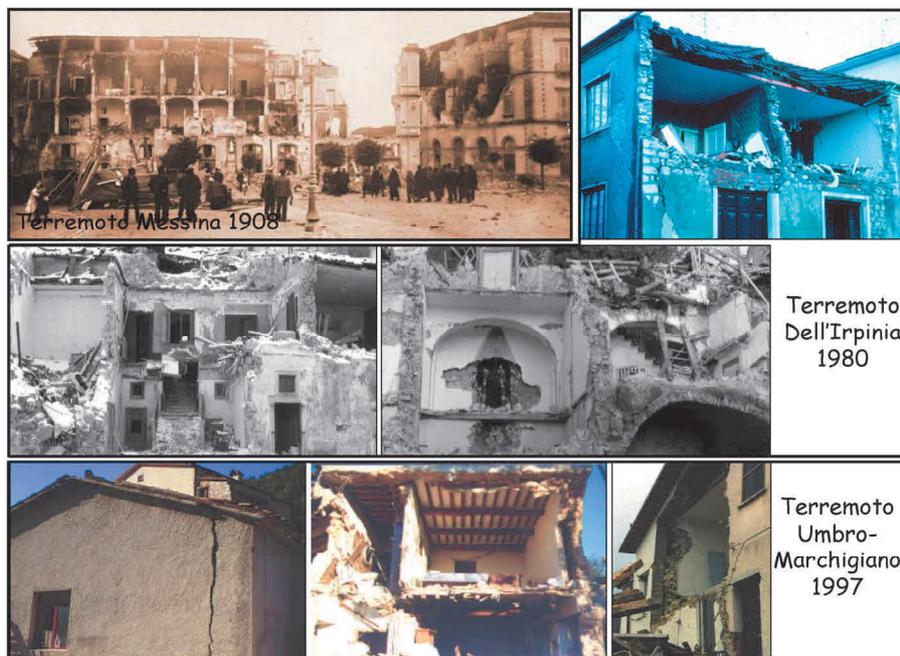


Figura 1. Scenari di danno dei terremoti italiani significativi.

Tali scenari di danno si sono manifestati in modo piuttosto esteso durante i terremoti più significativi che hanno colpito il territorio italiano nel secolo scorso: Messina 1908, Friuli 1976, Irpinia 1980, Umbria-Marche 1996 (Fig. 1).

Al contrario, nel centro dell'Aquila si è osservato un numero esiguo di crolli rovinosi, che hanno interessato edifici in muratura principalmente di tipo misto della *prima* e della *seconda classe* (Fig. 2). L'edificio della prefettura dell'Aquila (Fig. 3) né è un esempio emblematico: si è verificato il ribaltamento dei muri di facciata favorito dallo scarso ammorsamento delle pareti murarie a quelle trasversali e dall'azione spingente delle volte nonché delle travi lignee della copertura.

Nel caso in cui non si siano innescati meccanismi fuori piano delle pareti (grazie ad esempio ad una buona ammorsatura tra le pareti ortogonali e/o a presidi di collegamento aggiuntivi), l'edificio può opporsi al sisma attraverso la resistenza nel piano delle sue pareti. Comunque anche in tal caso, non essendo presenti elementi orizzontali tensoresistenti (ad esempio catene), la



Figura 2. Scenari di danno tipici degli edifici «antichi» nel centro storico dell'Aquila.



Figura 3. L'edificio della prefettura dell'Aquila crollato a seguito del sisma.

parete muraria può fronteggiare l'evento sismico solo mediante la sua resistenza a compressione. Pertanto, solo la porzione di parete muraria nella quale si possono attivare puntoni compressi è in grado di opporsi alle forze sismiche (Fig. 4a), mentre le porzioni sommitali (di forma all'incirca triangolare) risultano molto vulnerabili e sono soggette a crolli. Ed infatti spesso si è potuto riscontrare che gli edifici in cui le pareti non si sono ribaltate verso l'esterno presentano tali porzioni triangolari estreme delle pareti crollate. Gli edifici del centro storico dell'Aquila non hanno però mostrato tale tipo di dissesto, rivelando che in essi erano presenti catene orizzontali capaci di assorbire ai piani la componente orizzontale degli sforzi dei puntoni.

4. Lo scenario dei danni per gli edifici della terza classe

Gli edifici della *terza classe* (che costituiscono gli edifici in muratura «moderni») presentano una sostanziale innovazione costituita dagli impalcati in cemento armato che interrompono la continuità delle pareti murarie ad ogni livello e che, consentendo la connessione continua delle pareti stesse tra loro a tutti i piani, garantiscono un effettivo comportamento scatolare del fabbricato. Ciò significa che in essi non possono più esistere pareti murarie di altezza pari a quella dell'edificio indipendenti tra di loro, così come invece accade per gli edifici della *prima* e della *seconda classe*. Attualmente, in accordo con le prescrizioni normative, è possibile realizzare solo edifici in muratura di questa tipologia. In realtà già il R.D. 2105/1937 prevedeva solo tale tipo

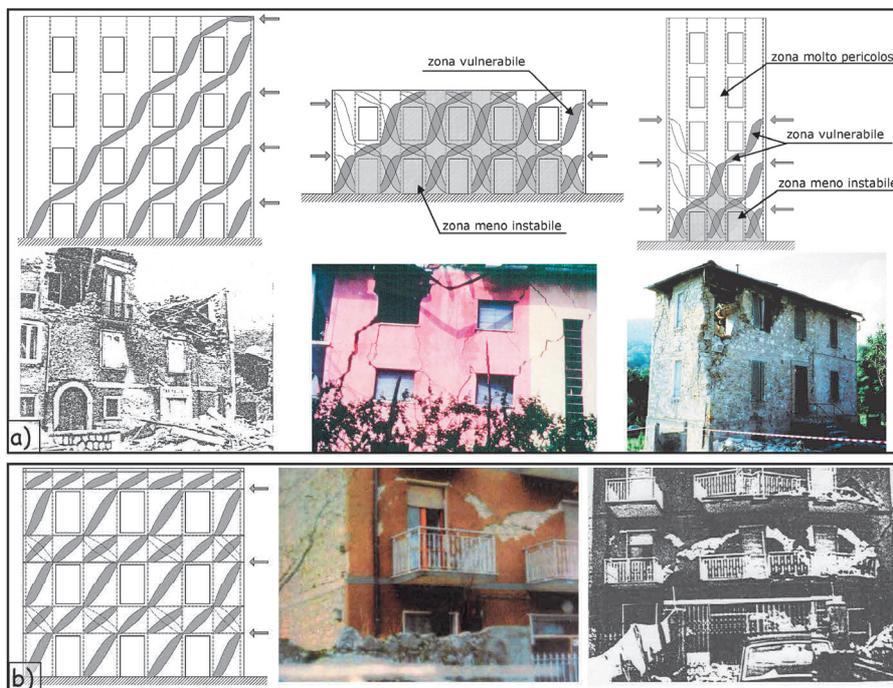


Figura 4. Comportamento nel piano delle pareti murarie: a) edifici della *prima* e della *seconda classe*; b) edifici della *terza classe*.

di edificio, prescrivendo esplicitamente per tutte le costruzioni in muratura la realizzazione di cordoli in cemento armato estesi all'intero spessore delle pareti murarie ben collegati ai solai di piano.

La presenza dell'impalcato efficacemente connesso alle pareti murarie impedisce, in caso di sisma, l'instaurarsi di meccanismi di ribaltamento fuori del piano e consente alle forze orizzontali di essere fronteggiate dalle pareti di controvento. Pertanto la risposta sismica dipende direttamente dal comportamento strutturale delle pareti nel proprio piano e quindi dalla capacità resistente e deformativa delle fasce di piano e dei maschi murari. In questo caso, essendo presenti elementi resistenti a trazione (cordoli), l'intera parete muraria partecipa alla resistenza nei confronti delle forze sismiche mediante un sistema di puntoni e tiranti (Fig. 4b). Inoltre la presenza del cordolo al livello dell'impalcato impedisce «l'allentamento» dei pannelli di fascia rispetto agli elementi verticali, consentendo quindi l'instaurarsi di meccanismi resistenti efficaci anche nelle fasce di piano, basati essenzialmente sulla formazione di puntoni diagonali (Magenes et al., 2000; Calderoni et al., 2010).

È possibile ritrovare edifici isolati della *terza classe* soprattutto nelle zone esterne del centro dell'Aquila (in prossimità delle mura). Praticamente quasi nessuno di tali edifici ha mostrato crolli parziali o totali; essi hanno invece evidenziato un buon comportamento globale, anche se manifestano lesioni nei pannelli murari, che dimostrano il raggiungimento dei limiti di resistenza relativi al comportamento nel piano.

Gli edifici di Fig. 5 (il primo in muratura di pietra calcarea e listatura di mattoni pieni in doppio strato, il secondo integralmente in muratura di mattoni pieni) hanno subito entrambi solo lesioni diagonali a taglio nei maschi murari del piano terra. L'entità delle lesioni, soprattutto nel secondo edificio, dimostra comunque che essi sono stati fortemente sollecitati dal sisma. Nel fabbricato di Fig. 6a si osservano soprattutto lesioni in corrispondenza delle fasce di piano (Fig. 6b) caratterizzate da un'altezza notevole, che dimostrano il loro impegno statico nel comportamento della parete nel proprio piano. In tutti i casi mostrati non si riscontrano fenomeni di distacco dei pannelli murari ascrivibili a comportamenti fuori dal piano. Lesioni orizzontali si riscontrano a volte a metà altezza dei maschi murari (Figg. 6e, 6f), soprattutto nei casi di muratura regolare in blocchi di calcestruzzo, che probabilmente presenta una resistenza di base a taglio piuttosto ridotta. Invece le lesioni orizzontali in corrispondenza dell'attacco tra cordolo e muratura sottostante (Figg. 6c, 6d), visibili in molti casi soprattutto ai piani alti, sono ascrivibili per lo più a fenomeni termici e/o di ritiro diversi tra i due materiali, che si evidenziano in pieno quando l'azione sismica determina leggere decompressioni per effetto ribaltante globale. Esse in genere non sono preoccupanti in quanto interessano quasi esclusivamente la faccia esterna della parete e non mettono a rischio la stabilità del pannello murario al di fuori del suo piano.



Figura 5. Scenari di danno tipici degli edifici «moderni» del centro storico dell'Aquila: lesioni diagonali nei maschi murari.

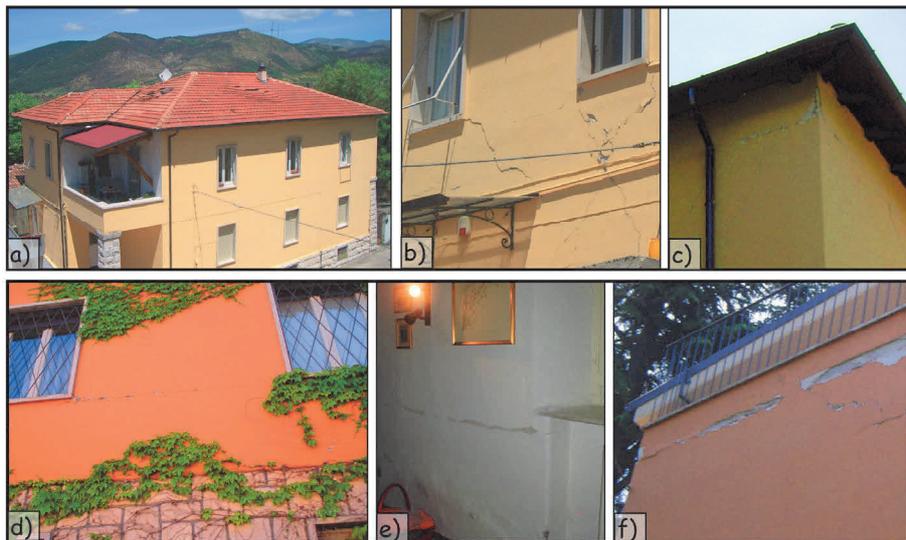


Figura 6. Scenari di danno tipici degli edifici «moderni» a) del centro storico dell'Aquila: b) lesioni delle fasce di piano; c), d) lesioni tra il cordolo in c.a. e la parete muraria; e), f) lesioni orizzontali dei maschi murari.

5. Lo scenario dei danni per gli edifici della prima e della seconda classe migliorati

Quanto detto a proposito dei danni rilevati chiarisce che la risposta sismica di un edificio in muratura è fortemente caratterizzata dal comportamento dell'impalcato e da quello della fascia di piano. Infatti il ruolo dell'impalcato è determinante sia in relazione alla funzione di collegamento delle pareti murarie (riuscendo ad impedire o meno che si attivino meccanismi fuori piano) che a quella di distribuzione delle azioni inerziali tra le pareti stesse.

Invece la fascia di piano svolge il suo ruolo nell'ambito della resistenza e della deformabilità (e quindi della duttilità) della parete nel piano: al variare della sua morfologia e quindi della sua tipologia strutturale, si ottengono differenti gradi di accoppiamento tra i maschi murari con comportamenti strutturali della parete molto diversi, a parità di assetto geometrico e di carichi verticali agenti.

Contrariamente a quanto accade per gli edifici «moderni», in quelli «antichi» la fascia di piano e l'impalcato non possono dare il loro significativo contributo al comportamento globale dell'edificio in condizione sismica, se in essi non è eliminata la possibilità che le pareti ribaltino al di fuori del piano; in ogni caso il loro contributo resta ridotto se non sono presenti anche elementi orizzontali resistenti a trazione nella parete stessa.

Quando gli edifici «antichi» sono stati oggetto di interventi di consolidamento (ad esempio con aggiunta di catene) il loro comportamento sismico migliora notevolmente, tanto da poter aggiornare la già richiamata classificazione di M. Pagano, definendo una ulteriore classe degli edifici della *prima* e *seconda classe migliorati*. L'inserimento di catene consente di ridurre o eliminare del tutto le spinte delle volte e di contrastare i distacchi e le rotture delle croci di muro. Tale intervento, riducendo notevolmente la possibilità di attivazione di meccanismi fuori piano, consente l'attivazione del comportamento della parete nel proprio piano. In tal modo la capacità dell'edificio di resistere al sisma aumenta in maniera sostanziale.

Se si esaminano gli edifici compresi all'interno delle mura dell'Aquila si riscontra che la maggior parte di essi, solitamente disposti in aggregato con cortine murarie continue, è comunque riconducibile alla *prima* e alla *seconda classe*. Però in corrispondenza delle facciate di tali edifici quasi sempre si notano capochiavi (Figg. 7a, 7b, 7c) di diverse fogge ascrivibili a differenti periodi storici, che dimostrano senza dubbio la presenza di catene, disposte solitamente a tutti i piani in corrispondenza di quasi tutte le pareti.

Tali edifici quindi si possono sicuramente classificare come edifici «antichi migliorati». A volte le catene sono realizzate utilizzando le stesse putrelle dei solai o gli elementi lignei inferiori delle capriate dei tetti, che vengono portate al di là della parete muraria ed ancorate ad essa mediante paletti in ferro o lignei (Figg. 7d, 7e). Spesso si evince che le catene si trovano all'interno delle pareti murarie e quindi esse sono state introdotte già in fase di costruzione a dimostrare una particolare sensibilità degli antichi costruttori locali al problema della resistenza sismica degli edifici (Fig. 7f).

In realtà quasi tutti gli edifici del centro storico dell'Aquila sono edifici della *prima* e della *seconda classe migliorati*, tanto è che lo scenario di danno conseguente al terremoto dell'aprile 2009 è apparso completamente diverso da quello riscontrato nei centri storici di altre zone italiane nei sismi precedenti. Alle immagini di intere cortine di edifici tristemente privi delle pareti di facciata, rovinosamente crollate sulle strade, viste in passato (Fig. 8a), si contrappongono quelle delle strette strade dell'Aquila, in molti casi quasi completamente libere da macerie, se non quelle delle parti sommitali degli

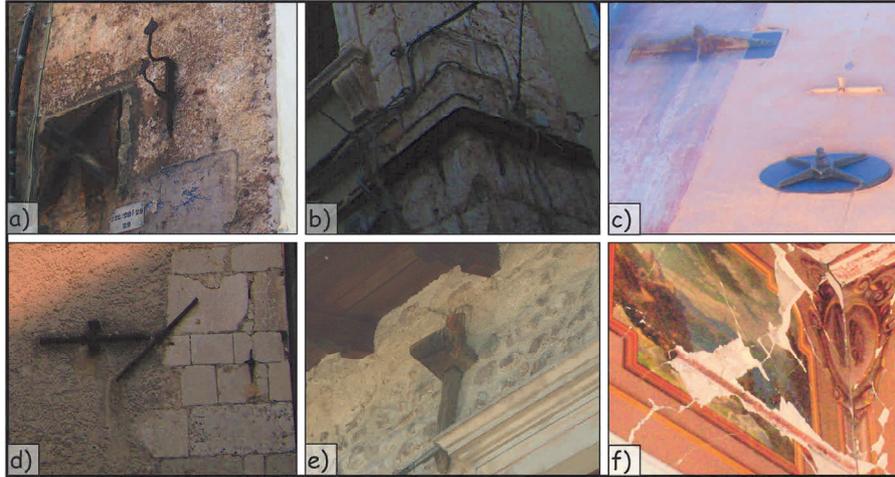


Figura 7. Differenti tipologie di capo-chiave e di catene.

edifici (Fig. 8b). Ciò dimostra in modo evidente la maggiore capacità sismica degli edifici «migliorati» rispetto ai normali «edifici della *prima* e della *seconda classe*».

Passando poi ad un più accurato esame del danneggiamento, anche se limitato al solo lato esterno delle facciate, esso è da correlare con il comportamento nel piano delle pareti. In molti edifici non è visibile alcun danno significativo (Figg. 9a, 9b), in altri si segnalano solo piccole lesioni diagonali in corrispondenza delle fasce di piano; in altri ancora sono evidenti lesioni diagonali nei maschi murari e nelle fasce di piano (Fig. 9d), che attestano l'impegno delle pareti nel proprio piano ma contemporaneamente dimostrano l'assenza di problemi relativi al comportamento fuori dal piano. In molti casi le pareti murarie sono state sollecitate fin quasi ai limiti della loro resistenza (Figg. 9c, 9e) ma, nonostante il notevole danneggiamento, non si sono verificati quasi mai crolli (parziali o globali) o attivati altri comportamenti fuori dal piano. In particolare si può osservare che le catene ai piani consentono l'impegno statico delle fasce di piano che, quando fortemente sollecitate, si oppongono con formazione di puntoni diagonali (Fig. 4b), conseguenti all'attivazione di un comportamento globale «a telaio» delle pareti murarie (Calderoni et al. 2007; Lagomarsino, Cattari, 2009). Le catene possono anche determinare un più efficace funzionamento dell'impalcato, consentendo l'attivazione di uno schema resistente ad arco o a travatura reticolare, nel quale i tiranti rappresentano la catena dell'arco o i correnti tesi della travatura, lasciando al masso stesso o alla muratura delle volte il compito degli elementi compressi (Fig. 10).

Gli edifici «antichi migliorati» nel centro storico dell'Aquila hanno comunque spesso riportato danneggiamenti connessi a situazioni locali. Ad esempio molti crolli parziali si sono manifestati alla sommità delle pareti in corrispondenza della copertura (Fig. 11), a causa di tetti spingenti o comunque di ribaltamenti locali della parte terminale delle pareti: infatti le nume-



Figura 8. Scenari di danno di aggregati edilizi: a) terremoto di Messina, 1908; b) terremoto dell'Aquila, 2009.

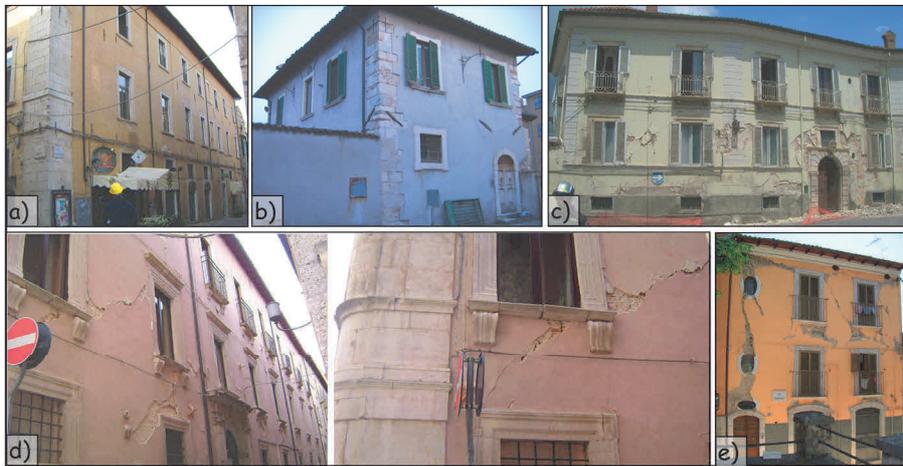


Figura 9. Scenari di danno tipici di edifici «antichi migliorati» del centro storico dell'Aquila.

rose catene disposte ai vari piani, che hanno contrastato il ribaltamento globale delle pareti, spesso mancano al livello della copertura, mentre le travi di legno dei tetti non sono quasi mai ben collegate alle pareti.

Un caso particolare ma emblematico di crollo locale è quello riportato in Fig. 12. In questo edificio la presenza di catene (ne sono visibili tre disposte in corrispondenza del solaio del secondo livello) ha evitato il ribaltamento della parete ma non ha potuto contrastare l'azione orizzontale localizzata di una trave in legno del solaio di sottotetto. Infatti la deformabilità dell'impalcato non ha consentito il trasferimento delle forze inerziali di sua competenza alle pareti disposte di coltello rispetto all'azione del sisma, sollecitando così fino alla rottura la parete di facciata al di fuori del suo piano.

In Fig. 13 si può osservare il crollo fuori piano di un pannello all'ultimo livello di una parete muraria. Analizzando con attenzione l'edificio si nota la presenza di un solaio di sottotetto in c.a. (quasi certamente realizzato ben dopo la originaria edificazione del fabbricato), che però non è presente nel campo corrispondente alla zona crollata. Molto probabilmente tale porzione

di fabbricato era stata lasciata scoperta e solo successivamente sono state realizzate nuove pareti murarie di chiusura. Esse, prive di efficace ammassamento con le pareti esistenti e non dotate del vincolo superiore del solaio, non hanno potuto sostenere con uno schema di mensola le azioni sismiche relative anche al loro solo peso. Si può notare che il resto dell'edificio non presenta altri fenomeni di ribaltamento, in quanto la presenza di originarie catene in ferro ha impedito tale possibilità consentendo invece l'attivazione del ben più resistente comportamento nel piano.

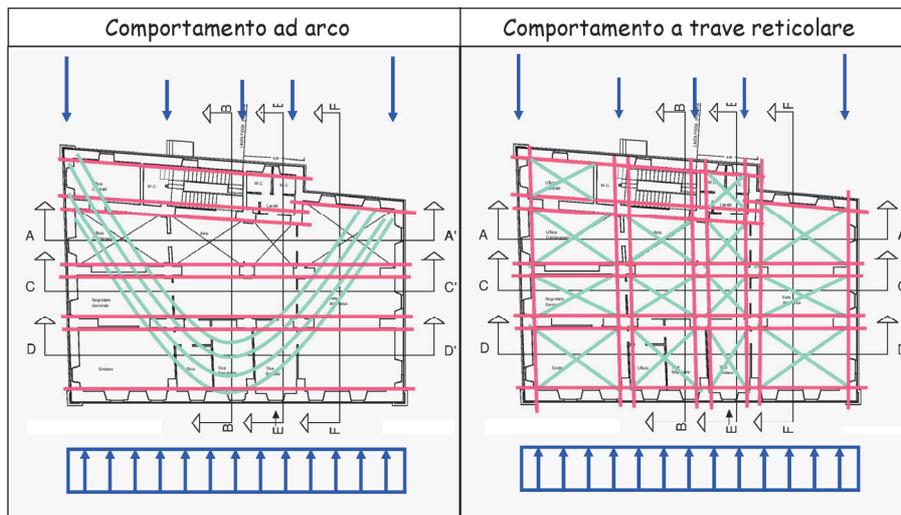


Figura 10. Meccanismi resistenti dell'impalcato di edifici «antichi migliorati».



Figura 11. Crolli parziali in sommità delle pareti.



Figura 12. Crollo locale dovuto ad azioni concentrate.



Figura 13. Crollo fuori piano di un pannello murario all'ultimo livello.

6. *Gli elementi di criticità degli edifici in muratura del costruito storico aquilano*

Anche se, come detto, molti degli edifici «antichi» dell'Aquila appartengono ad una tipologia strutturale caratterizzata da un buon comportamento sismico globale, spesso le loro prestazioni complessive sono state penalizzate da alcuni fattori specifici di vulnerabilità che hanno costituito un reale problema (indipendentemente dalla correttezza della concezione strutturale globale).

Il primo aspetto critico è costituito dalla qualità della muratura. Infatti quasi tutte le pareti murarie più antiche sono realizzate con muratura caotica di pietra calcarea mista a frammenti di laterizio, legata con malta scadente di calce. La tipologia stessa della muratura non consente connessioni efficaci tra muri di facciata e quelli trasversali; solo raramente sono presenti pietre calcaree squadrate di maggiori dimensioni, spesso scarsamente sfalsate. Meno frequentemente si trovano murature di mattoni pieni, spesso di spessore ridotto (3-4 cm), a volte adottate per realizzare, probabilmente in sede di riparazione, solo alcune porzioni delle pareti murarie. Anche in questo caso non sembrano essere presenti elementi di connessione trasversale; anzi in molti casi i laterizi regolari formano solo i paramenti esterni, definendo un «sacco» interno molto scadente (Fig. 14a).

La scarsa qualità muraria ha rappresentato un aspetto fortemente critico in relazione ai danni, che sono stati molto accentuati anche nei casi in cui le pareti non sono crollate. Infatti la muratura non ha consentito un comportamento monolitico delle pareti murarie per le azioni fuori dal piano, con conseguenti scompaginamenti e crolli parziali delle pareti stesse (Fig. 14a). Invece, la scarsa resistenza specifica a taglio di tale tipologia di muratura ha limitato anche la resistenza a taglio dei pannelli murari quand'anche caricati da azioni nel piano, come dimostrato in molti casi dal notevole danneggiamento delle pareti murarie, il cui recupero sta ponendo non pochi problemi anche realizzativi.

In misura nettamente inferiore sono state riscontrate anche murature di migliore qualità. Esse sono presenti principalmente negli edifici «moderni» e sono realizzate o in mattoni pieni in blocchi di calcestruzzo pieni o forati o con pietra calcarea e listature di mattoni in doppio strato disposte ad interasse di circa 60-70 cm (Fig. 14b). Questo tipo di muratura si presenta ovviamente molto più regolare, formando elementi «monolitici», ed è generalmente caratterizzata da una maggiore cura costruttiva con realizzazione di buone connessioni nei cantonali. Come era da attendersi, questo tipo di muratura ha manifestato un comportamento migliore, senza sfarinature o suddivisione trasversale dei suoi paramenti, anche se tale migliore prestazione è anche collegata al più efficiente schema strutturale globale, al quale è possibile ricondurre l'edificio moderno.

Un altro aspetto critico, sicuramente ancora più «invalidante», è rappresentato dalla presenza (peraltro molto diffusa) di voltine in foglio singolo di mattoni pieni di ridotto spessore (circa 3 cm). Esse venivano usate in genere come controsoffittature, ma in certi casi anche come sostegno di orizzontamenti calpestabili, persino ai piani alti.

Generalmente configurate a crociera, tali volte presentano, nonostante il limitato spessore, una buona resistenza alle azioni dei carichi verticali, grazie soprattutto alle frecce piuttosto elevate in relazione alle luci ed alla capacità delle pareti murarie verticali di sopportare, in assenza di sisma, le conseguenti spinte orizzontali.

In realtà lo spessore ridotto le rende molto sensibili anche a spostamenti



Figura 14. Tipologie di murature dell'Aquila: a) murature «antiche»; b) murature «moderne».



Figura 15. Elementi di criticità del costruito storico aquilano: a) volture in foglio; b) solai piani con mattoni in foglio; c) cornicioni; d) architrave.

orizzontali di piccola entità, specialmente ai piani alti. Infatti, pur in presenza di catene (disposte in genere ad una certa distanza tra loro) sono sempre possibili sotto sisma leggeri «allentamenti» dei muri, che portano come conseguenza a cadute di spinta sufficienti a far crollare le volte stesse in modo rovinoso, tanto che esse hanno causato molte delle vittime del centro storico, nonostante il buon comportamento globale dell'edificio, che ha evitato il crollo globale (Fig. 15a).

Anche i solai piani con travi in ferro, avendo i campi tra le travi costituiti da un singolo o un doppio strato di mattoni disposti praticamente in piano, si sono dimostrati incapaci di sopportare piccoli «allentamenti» delle pareti, determinando diffusi e pericolosi crolli locali negli impalcati (Fig. 15b).

In modo analogo sono risultati fortemente vulnerabili anche gli aggetti e i cornicioni realizzati quasi sempre con travi a sbalzo e riempimento dei campi con mattoni pieni disposti in piano e quindi semplicemente «incollati» (Fig. 15c).

Numerose situazioni critiche di tipo locale si sono manifestate in corrispondenza delle facciate. Infatti le originarie archi-trave presenti sulle aperture spesso sono state «nascoste» (trasformandole ad intradosso piano) da sovrastrutture riportate e non ben ancorate (contro-fodere di mattoni pieni in foglio, pesanti cornici di marmo o di intonaco, ecc.). Tali sovrastrutture, distaccandosi a seguito del sisma, sono in molti casi crollate con effetti rovinosi sulle strade sottostanti, evidenziando anche nell'arco retrostante lesioni più o meno accentuate in relazione al maggiore o minore impegno statico della fascia di piano (Fig. 15d).

7. Gli edifici in cemento armato

Molto spesso il crollo di un singolo edificio in cemento armato a causa di un evento sismico ha accentrato l'attenzione ed è assunto ad emblema dei rischi connessi con questa tipologia. Come in un recente passato per la scuola di San Giuliano di Puglia, oggi all'Aquila questo ruolo è stato svolto dalla casa dello studente. Occorre però notare che questo drammatico crollo, come del resto altri precedenti eventi «simbolici», appare causato da gravi e specifici difetti costruttivi o errori progettuali sui quali è in corso una indagine della magistratura.

Molti sono però i crolli parziali o i danni rilevanti che ripetono caratteristiche già notate in tanti eventi sismici precedenti. Tra i più eclatanti vi è sicuramente la perdita di un singolo piano di un edificio. La somiglianza di immagini scattate nel 1980 dopo il terremoto dell'Irpinia e Basilicata (Fig. 16a) e nel 2009 dopo il terremoto dell'Aquila (Fig. 16b) è veramente impressionante. Si nota chiaramente che lo scorrimento tra testa del pilastro e trave è avvenuta in corrispondenza della ripresa di getto, che presenta una superficie liscia. Lo spostamento relativo tra testa pilastro e trave è stato tanto elevato da provocare la fuoriuscita del pilastro e quindi l'impossibilità per esso di sostenere i carichi verticali. L'impalcato è quindi precipitato in basso tirando fortemente le armature, che hanno aperto o tranciato le rare staffe ma sono rimaste collegate ai due elementi.

Questi crolli parziali sono stati da alcuni attribuiti alla presenza di un piano «soffice», ovvero dotato di scarse tamponature. È invece molto più attendibile l'idea che questi crolli siano dovuti proprio alla presenza di tamponature e dei puntoni che si formano lungo le diagonali compresse. La forte azione orizzontale trasmessa da essi all'estremo del pilastro, insieme alla decompressione del pilastro stesso, supera la resistenza attritiva tra la testa del pilastro e la trave, che è molto bassa a causa della cattiva qualità della ripresa di getto. Prove sperimentali su modelli in scala 2:3, svolte nel laboratorio «Prove Materiali» della Facoltà di Ingegneria di Catania, e la relativa interpretazione numerica (Tasca, 2009; Mercante, 2011), mostrano chiaramente come il moto alternato della struttura provoca scorrimento e quindi la fuoriuscita, in direzione opposta, dei pilastri di estremità del telaio.

Altri tipici danni, che fortunatamente non hanno portato a crolli (Bursi et al., 2009), riscontrati all'Aquila così come in occasione di tanti sismi precedenti, sono quelli relativi ai nodi (Fig. 17a) o all'estremità dei pilastri (Fig. 17b). La causa principale è la carenza o totale assenza di staffe nei nodi, ma anche la cattiva qualità del calcestruzzo che si è completamente disgregato per effetto del momento flettente o dell'incremento dello sforzo normale prodotto dal sisma.

Molto frequenti anche i danni ai componenti non strutturali, come le tamponature o le controsoffittature (Magliulo et al., 2009). Tali danni hanno comportato conseguenze fortemente negative da un punto di vista sociale ed economico, perché ad essi è da attribuire la maggior parte delle inagibilità riscontrate nei controlli post terremoto. Tra le cause dei crolli delle tamponature si segnala una particolarità legata al clima freddo dell'Aquila ed alla maggiore attenzione prestata in tale città ai problemi di risparmio energetico. In molti casi, infatti, per evitare ponti termici le tamponature perimetrali (tipicamente a doppia fodera) sono realizzate con la fodera esterna che passa al di fuori del pilastro ed è quindi ammorsata in maniera insufficiente alla struttura, prestandosi così a crolli rovinosi ed allarmanti (Figg. 18a, 18b).

8. Conclusioni

A seguito del terremoto dell'aprile 2009, contrariamente a quanto osservato in passato, il centro storico dell'Aquila ha mostrato uno scenario di danno caratterizzato, per gli edifici in muratura, da pochissimi crolli globali. Infatti solo pochi edifici della *prima* o della *seconda classe* o qualche edificio antico pesantemente manomesso da interventi di recupero «moderni» hanno presentato crolli diffusi o globali. Invece, in pratica, non è crollato nessun edificio della *terza classe*. Ciò è stato determinato dalla presenza in maggioranza di edifici delle prime due classi «migliorati», cioè dotati di catene metalliche o lignee diffuse a tutti i livelli. Tale tipologia di edifici è in grado quindi di comportarsi sotto sisma in modo simile agli edifici in muratura «moderni», sfruttando le migliori capacità di resistenza delle pareti nel proprio piano, con prestazioni sicuramente accettabili in relazione all'intensità del sisma.



Figura 16. Pilastri fuoriusciti dall'impalcato e conseguente perdita di un piano: a) terremoto dell'Irpinia e Basilicata, 1980; b) terremoto dell'Aquila, 2009.



Figura 17. Danni locali: a) lesione a taglio in un nodo; b) frantumazione del calcestruzzo all'estremità di un pilastro.



Figura 18. Danni alle tamponature perimetrali, con crollo della fodera esterna.

Il notevole danneggiamento subito comunque dalle pareti, anche in assenza di crolli locali o globali, è stato invece favorito dalla tipologia inadeguata della muratura locale, che sta rendendo anche molto problematico il recupero. La tipologia degli orizzontamenti, portanti e non, e di altri elementi costruttivi molto sensibili anche a piccoli spostamenti orizzontali, ha in parte vanificato le buone prestazioni delle scatole murarie, causando numerosi crolli all'interno degli edifici con conseguenti perdite di vite umane.

Per quanto riguarda gli edifici in cemento armato, i crolli parziali e i danneggiamenti locali degli elementi strutturali derivano da cause già più volte evidenziate in precedenti eventi sismici. Peculiare è invece il crollo delle fodere esterne delle tamponature, dovute al fatto che esse, specialmente negli edifici più recenti, sono spesso state disposte all'esterno dei pilastri e scarsamente ammortate alla struttura.

Bibliografia

- BURSI O.S., DUSATTI T., PUCINOTTI R., *A Reconnaissance report. The April 6, 2009, L'Aquila Earthquake, Italy*, 2009, <http://www.reluis.it>.
- CALDERONI B., CORDASCO E.A., LENZA P., *Il ruolo della fascia di piano nel comportamento sismico degli edifici in muratura*, in «Ingegneria Sismica», 1, 2007, pp. 26-40.
- CALDERONI B., CORDASCO E.A., LENZA P., *Il comportamento strutturale delle fasce di piano degli edifici in muratura soggetti ad azioni orizzontali: indagine sperimentale*, in «Ingegneria Sismica», 4, 2010, pp. 49-70.
- LAGOMARSINO S., CATTARI S., *Non linear seismic analysis of masonry buildings by the equivalent frame model*, DACH Conference: Masonry and earthquakes, Zurich, 2009, pp. 85-100.
- LENZA P., GHERSI A. (con la partecipazione di CALDERONI B.), *Edifici in muratura*, Palermo, Dario Flaccovio, 2011.
- MAGENES G., BOLOGNINI D., BRAGGIO C., *Metodi semplificati per l'analisi sismica non lineare di edifici in muratura*, CNR-Gruppo nazionale per la difesa dei terremoti, 2000.
- MAGLIULO G., PENTANGELO V., MANFREDI G., *Il danneggiamento delle controsoffittature a seguito del terremoto dell'Aquila dell'aprile 2009*, 2009, <http://www.reluis.it>.
- MERCANTE L., *Collasso di telai in c.a. per scorrimento nei nodi: prove sperimentali ed interpretazione dei risultati*, Tesi di laurea, Università di Catania, 2011.
- PAGANO M., *Teoria degli edifici. Edifici in muratura*, Napoli, Liguori, 1968.
- TASCA D., *Analisi teorico-sperimentale del collasso per scorrimento di telai in c.a.*, Tesi di laurea, Università di Catania, 2009.

Abstract - The damages scenario of buildings in L'Aquila after the earthquake of 2009

The behaviour of buildings during a strong seismic event, like the one of L'Aquila, 2009, is strictly connected to their typology and to the material used. Masonry buildings may be subdivided into three classes. The first and second class, which correspond to the older buildings, present ineffective connections and, as a consequence, a strong vulnerability connected to the risk of out-of-plane collapse. The buildings of the third class are characterised by horizontal connections which prevent such a risk; their vulnerability is much lower and the collapse corresponds to the in-plane failure of walls. Reinforced concrete buildings, when not designed to resist seismic actions, may undergo the loss of a single storey, because of the slip between column and beam made easier by the concentrated actions of perimeter walls. Another important damage, peculiar to the L'Aquila earthquake, has been the loss of perimeter walls, which were partially external to the structure in order to reduce thermal effect.

Keywords

L'Aquila, masonry building, r.c. building, seismic damage, seismic vulnerability.

Résumé - Le scénario d'endommagement des constructions de L'Aquila suite au tremblement de terre de 2009

Le comportement des édifices pendant un événement sismique fort comme celui de 2009 à L'Aquila, est fortement conditionné par leur typologie structurelle aussi bien que par les matériaux utilisés. On peut classer les édifices en maçonnerie en trois groupes. Ceux de la première et deuxième classe, en général plus anciens, présentent des parois non opportunément reliés par des structures horizontales et ils montrent donc une vulnérabilité considérable, due à la possibilité que les murs collapent hors de leur étage. Les édifices de la troisième classe présentent des liaisons plus efficaces qui empêchent un tel comportement; par conséquent, leur vulnérabilité est moindre et le collapsus est lié à la majeure ou mineure résistance des murs dans chaque étage. Les édifices en béton armé, non projetés pour supporter une action sismique, ont montré dans plus d'un cas la perte d'un étage, à cause du glissement poutre-pilier favorisé par l'action des rembourrages externes. Une autre importante cause de dégâts, typique de l'événement de L'Aquila, est aussi la perte des rembourrages extérieurs, parce que ceux-ci étaient partiellement en dehors de la structure afin de réduire les effets thermiques.

Mots-clés

L'Aquila, dommages sismiques, édifices en béton armé, édifices en maçonnerie, vulnérabilité sismique.