

Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica del 2012 in Emilia

Behaviour of masonry buildings in the seismic sequence of 2012 in Emilia

Stefano Bracchi¹, Francesca da Porto², Alessandro Galasco³, Francesco Graziotti¹, Domenico Liberatore⁴, Laura Liberatore⁴, Guido Magenes^{3,5}, Martina Mandirola¹, Carlo Filippo Manzini⁵, Renato Masiani⁴, Paolo Morandi³, Michele Palmieri¹, Andrea Penna^{3,5}, Annalisa Rosti¹, Maria Rota⁵, Luigi Sorrentino⁴, Marco Tondelli⁵ ■

Sommario

La sequenza sismica iniziata il 20 maggio 2012 in Emilia Romagna ha colpito una regione nella quale le strutture in muratura portante rappresentano un'ampia parte del costruito esistente e la costruzione di nuovi edifici in muratura è pratica comune. Questo articolo ha l'obiettivo di presentare una panoramica sul comportamento sismico delle configurazioni architettoniche più comuni, tipiche dell'edilizia residenziale (urbana e rurale) e dei settori agricolo e terziario. La maggior parte degli edifici esistenti in muratura è costruita in mattoni di laterizio. Il comportamento sismico di tali edifici è particolarmente interessante, dal momento che gli eventi sismici principali del passato in Italia hanno colpito aree caratterizzate da edifici in muratura di pietra. Con l'eccezione di alcuni esempi che hanno messo in evidenza carenze strutturali, sistematiche o specifiche, responsabili della vulnerabilità di alcuni edifici, in generale la risposta sismica di queste strutture a scosse ripetute, caratterizzate da PGA dell'ordine di 0.25-0.30 g, è stata piuttosto buona, nonostante la maggior parte di essi sia stata concepita per sopportare i soli carichi verticali. Infatti, la progettazione sismica delle costruzioni è diventata obbligatoria nella zona solo dal 2003. Edifici di limitata altezza in muratura portante moderna, costruiti dopo tale data e progettati quindi secondo criteri antisismici e con adeguati dettagli costruttivi, in molti casi non hanno praticamente riportato danni strutturali. Gli esempi presentati in questo lavoro permettono un confronto tra le prestazioni offerte dagli edifici in muratura moderna, progettati secondo criteri sismici, e quelli più vecchi.

Abstract

The seismic sequence begun in May 2012 affected a region in which masonry buildings constitute a large percentage of the existing building stock and the construction of new masonry buildings is still common practice. The aim of this paper is to describe the seismic response of the most common structural configurations in the area for urban and rural buildings, both for residential, office and agricultural use. Most existing masonry buildings in the area are realised with clay bricks. The seismic behaviour of this type of buildings is particularly interesting as past seismic events in Italy have mainly affected areas in which stone masonry was predominant. With few exceptions of structural deficiencies which were responsible for the increased vulnerability of some buildings, in general the seismic response of these structures to repeated shaking with a PGA of the order of 0.25-0.30 g was quite satisfactory, despite most of them were only designed for vertical loads. Indeed, seismic design rules became mandatory for this region only after 2003. Buildings of limited height, realised with load-bearing modern masonry, which were built after this year following seismic criteria and with adequate construction details in many cases did not present significant structural damage. The examples presented in this paper show that new masonry buildings, designed according to seismic criteria, generally performed much better than older structures.

1. Introduzione

La sequenza sismica iniziata il 20 maggio 2012 nell'Italia settentrionale ha interessato principalmente la parte nord-orientale della regione Emi-

lia colpendo, in particolare, parte delle provincie di Modena, Ferrara e Bologna (in Emilia Romagna), la porzione meridionale della provincia di Mantova (in Lombardia) e alcuni comuni in pro-

¹ ROSE Programme, UME School, IUSS, Pavia

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova

³ Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia

⁴ Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma

⁵ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre), Pavia

vincia di Rovigo (in Veneto). La magnitudo dei due eventi principali del 20 e 29 maggio è stata rispettivamente di M_w 6.0 e M_w 5.8.

I terremoti hanno causato un totale di 27 vittime, sia dirette che indirette, ma solo 3 di queste dovute a danni strutturali in edifici residenziali (una durante un sopralluogo ad un edificio danneggiato). Le altre sono state per lo più causate da collassi di edifici industriali prefabbricati. Alcune persone sono decedute a causa di infarti o altre patologie, due persone a causa di danni non strutturali (collasso di un comignolo a Concordia sulla Secchia e caduta di calcinacci nel comune di Cento) e il parroco di Rovereto sulla Secchia ha perso la vita nel collasso della chiesa mentre tentava di salvare un'immagine sacra.

Il territorio colpito risulta piuttosto omogeneo in termini di geografia, sviluppo socio-economico e costruito. La maggior parte dei comuni colpiti si trova sulla pianura padana, subito a sud del Po. Le attività economiche, in generale più sviluppate nelle province di Modena e Mantova, sono legate principalmente ad agricoltura, allevamento, industria tessile e metalmeccanica e turismo, ma includono anche settori di eccellenza nell'industria alimentare e alcuni settori specifici come quello biomedicale a Mirandola. Condizioni confrontabili di accesso alle materie prime e una storia simile hanno contribuito a rendere piuttosto omogenee le caratteristiche del costruito nei diversi comuni. Gli eventi non hanno colpito nessuna grande città, ma diversi comuni di dimensioni medie, tra cui un certo numero di città medio-piccole con una popolazione indicativa di 10000-35000 abitanti. Nonostante l'area di Ferrara fosse stata colpita nel 1570 da un terremoto di magnitudo M_w 5.4 (Guidoboni et al., 2007), che fu anche alla base di alcuni studi pionieristici nel campo della sismologia (ad es. Breventano, 1576) e di una fra le prime proposte di casa resistente al terremoto (Guidoboni, 1987), la conoscenza delle sorgenti sismiche dei fronti sepolti più estremi dell'Appennino settentrionale è tuttora limitata e solo recentemente alcuni lavori (ad es. Toscani et al., 2009) hanno contribuito ad approfondire il potenziale sismogenetico. Questo giustifica solo in parte il fatto che i comuni colpiti dagli eventi del 2012 siano stati inclusi nella classificazione sismica nazionale solo molto recentemente (OPCM 3274, 2003). Pertanto fino a tempi recenti, le strutture erano costruite senza nessun concetto di progettazione per azioni sismiche e, per gli edifici esistenti, non erano richieste verifiche sismiche.

Come riportato nella Tabella 1 per gli insediamenti per i quali sono stati valutati i dati di intensità macrosismica (Arcoraci et al., 2012), la grande maggioranza degli edifici residenziali è

costituita da edifici in muratura, principalmente con un numero limitato di piani (ISTAT, 2001). Da un certo punto di vista, questa può essere considerata una circostanza fortunata, che ha probabilmente controbilanciato l'assenza di un livello di protezione sismica introdotto di proposito. Infatti, anche se concepiti per resistere ai soli carichi verticali, gli edifici in muratura spesso possiedono una riserva aggiuntiva intrinseca di resistenza alle azioni orizzontali (Di Pasquale, 2003), se sono presenti muri diretti secondo almeno due direzioni ortogonali. Questo può non accadere nel caso di altre tipologie strutturali (ad es. strutture intelaiate in c.a. o strutture prefabbricate), qualora "ottimizzate" per una singola condizione di carico (carichi verticali). Ciò è ancora più vero nel caso di muratura in laterizio, in cui in genere è garantito un certo livello di connessione tra muri ortogonali, a contrasto dei meccanismi di collasso fuori piano di intere facciate. L'ampia disponibilità di argilla nella pianura padana ha reso l'uso di muratura in mattoni con malta di calce molto comune da molti secoli, come testimoniato dalla presenza nei siti archeologici di antiche fornaci romane. Per contro, gli edifici in muratura di pietra sono piuttosto rari in questa zona, considerata la litologia della pianura padana (Ortolani, 1953). Gli eventi sismici più significativi avvenuti in Italia nell'ultimo secolo hanno colpito aree il cui costruito è costituito principalmente da edifici in muratura di pietra. È il caso per esempio dei terremoti avvenuti nelle regioni montane degli Appennini (ad es. i terremoti di Avezzano 1915 M_w 7.0, Mugello 1919 M_w 6.3, Irpinia 1930 M_w 6.6 e 1980 M_w 6.9, Umbria-Marche 1997 M_w 6.0 e L'Aquila 2009 M_w 6.3), sulle Alpi (terremoto del Friuli 1976 M_w 6.4), in Sicilia (terremoto del Belice 1968 M_w 6.3) e sulla costa dello stretto di Messina (terremoto di Messina e della Calabria meridionale 1908, M_w 7.2). Anche per questo motivo, l'analisi del comportamento sismico degli edifici in muratura in mattoni è particolarmente interessante, dal momento che l'osservazione dei danni indotti dal terremoto fornisce in questo caso informazioni preziose e uniche.

Come evidente dai dati riportati in Tabella 1 e in Arcoraci et al. (2012), un altro aspetto interessante del danno causato dalla sequenza sismica del 2012 consiste nel fatto che alcune località sono state colpite principalmente da uno solo dei due eventi principali della sequenza (ovvero l'evento di M_w 6.0 del 20 maggio e quello di M_w 5.8 del 29 maggio), mentre altre, tra cui i centri maggiormente colpiti di Mirandola, Cavezzo, Concordia, Novi e San Felice, hanno subito un accumulo del danno a causa delle scosse ripetute.

Tabella 1 - Intensità macrosismica osservata (da Arcoraci et al., 2012), PGA stimata (Bozzoni e Lai, 2012), percentuali di edifici residenziali in muratura e di edifici costruiti prima del 1945 (ISTAT, 2001) per alcuni dei comuni più colpiti dalla sequenza sismica in Emilia (i valori in grassetto indicano valori di PGA registrati)

Insedimento	$I_{EMS,20-5}$	$I_{EMS,Fin}$	ΔI_{EMS}	PGA ₂₀₋₅ (g)	PGA ₂₉₋₅ (g)	Edifici in muratura	Edifici <1945
Cavezzo	6-7	8	1-2	0.18	0.24-0.26	95%	25%
Concordia s/ Secchia	6	7-8	1-2	0.16	0.28-0.30	94%	45%
Mirandola	6-7	7-8	1	0.265	0.296	80%	36%
Moglia		7-8	N/A	0.10-0.12	0.245	72%	34%
Novi di Modena		7-8	N/A	0.10-0.12	0.24-0.26	84%	25%
Rovereto s/ Secchia*		7-8	N/A	0.12-0.14	0.24-0.26	84%	25%
Finale Emilia ⁷		7	-	0.28-0.30	0.234	83%	37%
Reggiolo		7	N/A	0.06-0.08	0.14-0.16	83%	24%
San Felice s/ Panaro	7	7	0	0.28-0.30	0.224	80%	34%
Alberone*	6-7	6-7	-	0.24-0.26	0.18	83%	29%
Camposanto	6	6-7	0-1	0.22	0.16-0.18	88%	38%
Crevalcore	6	6-7	0-1	0.12-0.14	0.10-0.12	95%	34%
Mirabello	6	6-7	0-1	0.12-0.14	0.00-0.02	96%	25%
S. Giacomo d/Segnate		6-7	N/A	0.18-0.20	0.26-0.28	99%	41%
San Carlo*	6-7	6-7	-	0.16	0.04-0.06	84%	28%
Bondeno	6	6	-	0.20	0.036	92%	38%
Carpi		6	N/A	0.08	0.173	73%	22%
Cento	5	6	-	0.14-0.16	0.299	83%	29%
Medolla	5-6	6	0-1	0.22-0.24	0.24	88%	32%
Poggio Renatico	6	6	-	0.10	0.02-0.04	94%	29%
Poggio Rusco	5	6	1	0.28	0.20-0.22	80%	31%
Quistello		6	N/A	0.12-0.14	0.22-0.24	69%	41%
San Possidonio		6	N/A	0.18	0.28-0.30	97%	47%
San Prospero	5	6	1	0.14-0.16	0.16-0.18	95%	30%
Sant'Agostino	6	6	-	0.16-0.18	0.081	84%	28%
Villarotta		6	N/A	0.06-0.08	0.10-0.12	88%	45%

* I dati ISTAT per Alberone, Rovereto s/ Secchia e San Carlo sono aggregati rispettivamente a quelli dei comuni di Cento, Novi di Modena e Sant'Agostino.

Grazie alla collaborazione della sezione Geotecnica Sismica di Eucentre (Bozzoni e Lai, 2012), è stato possibile stimare i valori di accelerazione di picco orizzontale risentiti ai diversi siti. Queste stime risultano senz'altro più affidabili per quanto riguarda l'evento del 29 maggio, a causa della presenza in questo caso di diverse stazioni temporanee aggiuntive che hanno registrato lo scuotimento del terreno. La mappa di scuotimento ottenuta con un'interpolazione di tipo *spline* dei valori di accelerazione orizzontale di picco registrati è riportata in Figura 1. A causa della scarsità di registrazioni, i dati riportati in Tabella 1 per l'evento del 20 maggio sono stati invece valutati sulla base di leggi di attenuazione del moto sismico (Bozzoni et al., 2012).

Il presente lavoro ha l'obiettivo di presentare una panoramica sul comportamento dell'edilizia "ordinaria" in muratura, cioè quella storica, o semplicemente vecchia, o più recente, costituita da case o palazzi, ampiamente diffusa sia in ambito urbano che rurale, escludendo le tipologie specialistiche quali le chiese, le torri, le fortificazioni.

L'architettura rurale rappresenta, in questo territorio ad antica e profonda vocazione agricola, una parte fondamentale del paesaggio. I numerosissimi edifici rurali costituiscono infatti, insieme alla vegetazione, gli unici elementi emergenti sull'orizzonte della pianura padana e, seppure quasi mai rilevanti se considerati singolarmente, contribuiscono a definire il carattere della campagna emiliana. Gli edifici presenti hanno, in genere, origine residenziale o di stalla-fienile. Nell'area colpita dalla sequenza sismica si osservano alcune lievi differenze nelle peculiarità dell'edilizia rurale. Nel bolognese la casa è separata dalla stalla-fienile sin dal XVIII secolo (Ortolani, 1953). La residenza ha impianto rettangolare, con tetto a capanna; la stalla-fienile ha dimensioni più grandi della casa. Nel modenese l'abitazione è in genere a tre piani, anche se si imposta su una superficie più contenuta (Figura 2a). Nel ferrarese la fattoria è detta *boaria*, poiché il mezzadro era responsabile anche per il bestiame, prevalentemente bovini (Castellano, 1986). Ciò comporta stalle ancora più ampie; molto frequenti sono i portici (Figura 3 e

Figura 1
 Mappa dei valori di accelerazione (in alto) e di velocità (in basso) di picco orizzontale stimati per l'evento del 29 maggio 2012, interpolando i valori registrati – le stazioni sono identificate da triangoli grigi [Bozzoni e Lai, 2012].

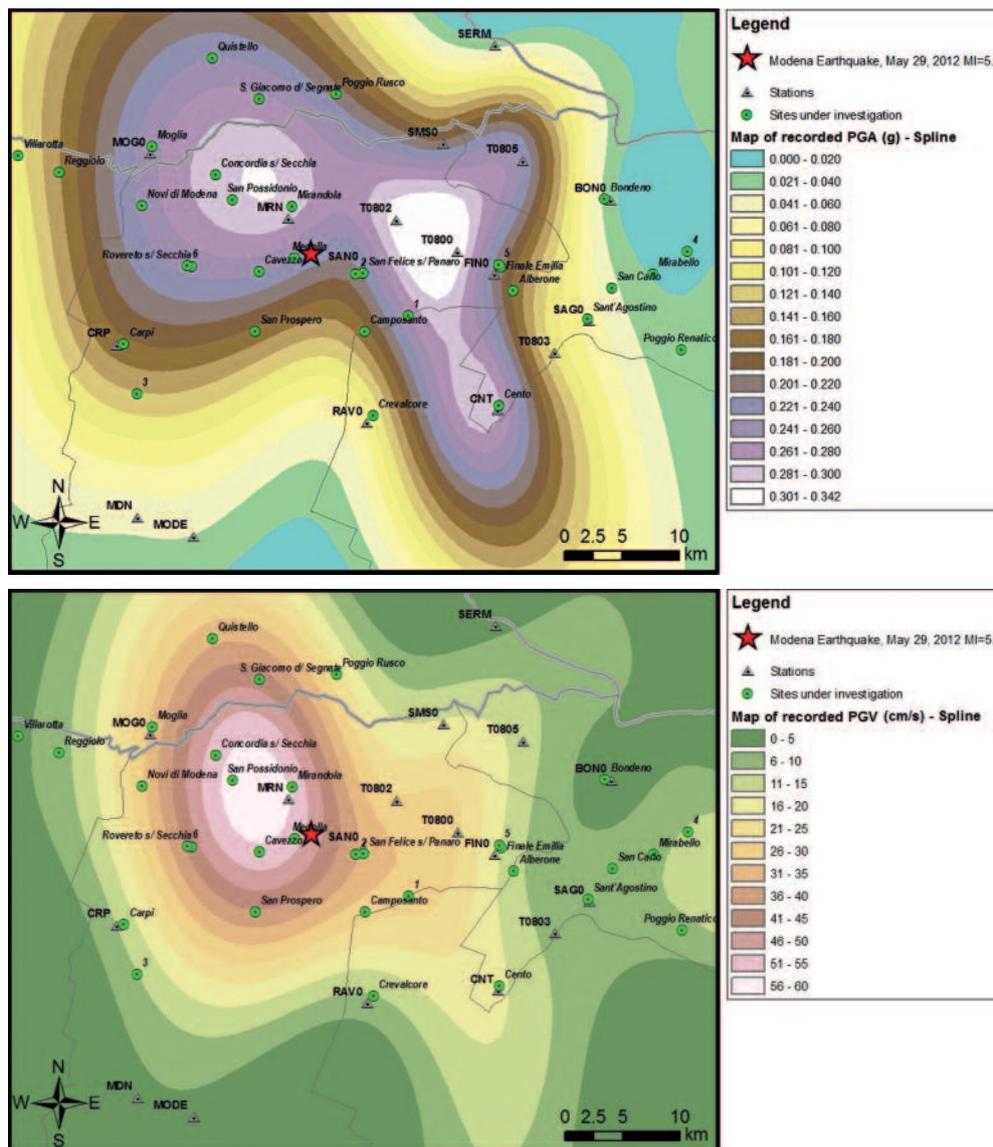


Figura 4). L'abitazione ha due piani fuori terra per un'altezza complessiva di circa 6 m. Il materiale da costruzione per la muratura è anche in questo caso il mattone; tuttavia gli alti costi del combustibile rendevano i laterizi cotti piuttosto onerosi, tanto che i mattoni crudi erano alquanto diffusi, per lo meno a quote superiori a quella della piena attesa per i corsi d'acqua della zona. Nondimeno lo straripamento del Reno nel 1886 provocò numerosi crolli in edifici con mattoni crudi (Ortolani, 1953). I laterizi cotti divennero via via prevalenti con il miglioramento della rete stradale nei secoli XIX e XX. Per le travi principali si impiega la quercia, mentre le travi secondarie sono di pioppo. La stalla-fienile presenta una struttura a più luci e più campate. Il fieno è conservato al piano soprastante le stalle. Un portico, o *porticaglia*, è presente su uno o più lati ed è sorretto da pilastri a sezione quadrata 60x60 cm². Questi pilastri sono presenti anche internamente per sostenere il tetto (Figura 3b). Quest'ul-

timo poggia su capriate o su falsi puntoni, entrambi privi di un'efficace connessione alle murature. In qualche caso è stata osservata la presenza di tiranti metallici a diverse quote (Figura 2b). Una costruzione tipica dell'area è la cosiddetta *casella* o *barchessa*, originariamente impiegata per conservare paglia o canapa (Figura 5). L'edificio è sostanzialmente una copertura allungata con più luci ma una sola campata, coperta da capriate semplici. Il retro, così come a volte i due lati corti, è chiuso da una tamponatura a una testa o, in alcuni casi, in foglio.

La costruzione di edifici nuovi con struttura portante in muratura fino a due-tre piani è tuttora piuttosto comune in Italia e, nelle aree colpite dagli eventi sismici del maggio 2012, è ancora più frequente che in altre zone. Questo può essere in parte dovuto alla presenza nella regione di diversi produttori di moderni blocchi da muratura.



Figura 2
Edificio rurale di abitazione
a San Prospero.

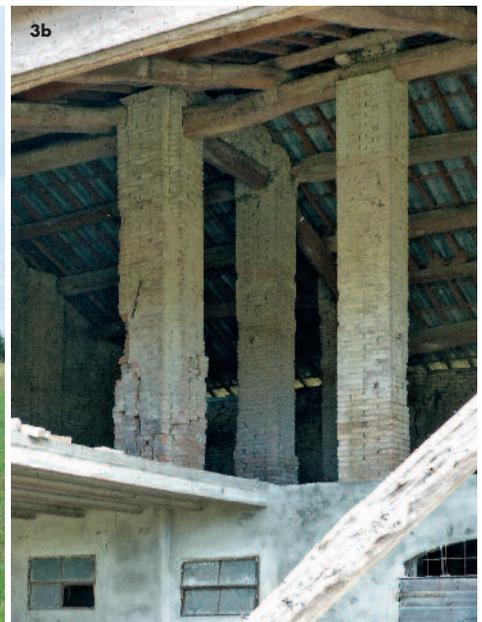


Figura 3
Stalla-fienile a Montalbano
presso Medolla, Strada
Provinciale 5.

Figura 4
Stalla-fienile in via
Alberghini a Buonacompria,
comune di Cento.

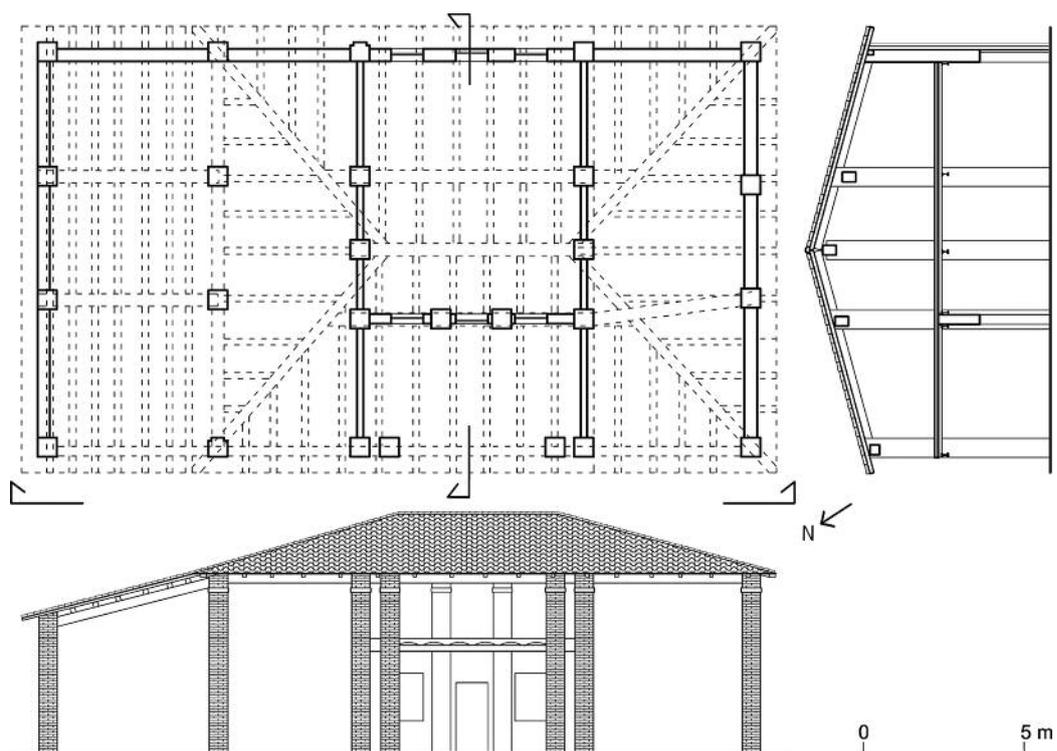


Figura 5
Casella vicino a Finale
Emilia, in via per Modena,
vicino a via Colombarina
(sopralluogo del 21 maggio
2012).



2. Danni all'edilizia ordinaria urbana

2.1 Danno strutturale agli edifici esistenti

Gli edifici esistenti in muratura costituiscono una porzione significativa del costruito nella zona colpita dal terremoto. La maggior parte di queste strutture, compresi edifici del patrimonio culturale come chiese, monasteri, palazzi e castelli, è realizzata con muratura in mattoni con malta di calce. Dal momento che l'area colpita è stata classificata come 'sismica' solo molto recentemente (dal 2003), gli edifici esistenti in muratura sono spesso caratterizzati dalla mancanza di una concezione strutturale e di dettagli costruttivi adeguati, con una conseguente elevata vulnerabilità sismica. Per esempio, diversi collassi locali di porzioni di edifici residenziali e agricoli sono riconducibili alla presenza di coperture spingenti in legno, all'assenza di efficaci connessioni fra strutture orizzontali e verticali, all'amplificazione dell'azione sismica lungo l'altezza dell'edificio. La Figura 6 mostra alcuni esempi di collassi parziali dovuti alla presenza di coperture in legno semplicemente appoggiate sulla cima dei muri perimetrali, senza alcuna capacità di contrastare il collasso fuori piano della porzione sommitale dei muri e, in alcuni casi, anche spingenti. In alcuni casi, in presenza di ulteriori elementi di vulnerabilità, il collasso ha coinvolto la parte superiore della facciata. Un esempio è il caso dell'edificio di Moglia

riportato in basso a sinistra in Figura 6, in cui si osservano una distanza significativa tra le principali pareti perpendicolari alla facciata e la presenza di aperture sistematicamente poste in prossimità delle intersezioni tra le pareti.

Questo tipo di danno ha interessato anche diversi edifici strategici, come ad esempio il municipio di Moglia riportato in basso a destra in Figura 6, determinandone l'inagibilità nella fase di emergenza. Come evidente in Figura 7, la gravità di questo tipo di danno, relativamente frequente, varia da casi di collasso della sola porzione superiore della facciata, lontano dalle connessioni con i muri ortogonali, fino al crollo completo della struttura di copertura, in seguito al collasso della porzione superiore di tutti i muri che la sostenevano. In alcuni casi (Figura 7) si sono inoltre osservati collassi di timpani caratterizzati da valori limitati di compressione verticale.

In molti altri casi (si vedano alcuni esempi in Figura 8), i meccanismi locali dovuti all'interazione tra la struttura di copertura e i muri perimetrali sono stati solamente attivati, causando danni senza tuttavia raggiungere una condizione di collasso.

Gli edifici che non hanno presentato questo tipo di danno hanno mostrato una risposta caratterizzata da un comportamento d'insieme, governato dalla risposta delle pareti nel loro piano,



Figura 6
Collapsi parziali fuori piano di facciate in muratura causati da coperture in legno spingenti, nei centri storici di Concordia sulla Secchia (in alto) e Moglia (in basso) (rilievo del 30 maggio 2012).

Figura 7
 Collapsi dovuti all'interazione tra la copertura e le pareti a Sant'Antonio in Mercadello (in alto a sinistra), San Felice sul Panaro (in alto a destra), Mirandola (in basso a sinistra) e Novi di Modena (in basso a destra) (rilievo del 30 maggio 2012).



Figura 8
 Danni dovuti all'interazione tra la copertura e le pareti, osservati a Novi di Modena (in alto a destra e in basso) e Cento (in alto a sinistra).





Figura 9
Danni alle fasce murarie a
Mirandola: meccanismi di
rottura per taglio (9b e 9c)
e pressoflessione (9a).

Figura 10
Danni a piattabande in
muratura che supportano
fasce di piano (Mirandola,
a sinistra e Poggio Rusco, a
destra).

come confermato dal danno osservato nei maschi e nelle fasce. Durante i rilievi post-terremoto, si sono notati diversi casi di danno alle fasce murarie. Questi elementi, talora considerati di secondaria importanza, sono sovente tra i primi a lesionarsi durante un sisma. In particolare, danni per taglio nel piano delle fasce sono stati piuttosto comuni e sono stati osservati anche in assenza di catene che applicassero una compressione assiale a questi elementi. Questa osservazione suggerisce che nelle fasce deformate si possa essere generata una forza orizzontale di compressione a causa della presenza dei solai di piano che ne impedivano la deformazione assiale (si veda ad esempio la Figura 9b).

Come osservato in prove di laboratorio (ad es. Beyer & Dazio, 2012), il tipo di meccanismo di danno nelle fasce è anche influenzato in modo significativo dal tipo di architrave che le sostiene. In caso di architrave in legno, si sono osservati principalmente meccanismi di rottura per pressoflessione, mentre le fasce con architravi costituiti da archetti in muratura hanno tipi-

camente mostrati rotture per taglio. Come evidente dalle immagini in Figura 10, il collasso di fasce supportate da piattabande in sola muratura risulta potenzialmente più pericoloso per le persone che si trovino all'interno o immediatamente all'esterno degli edifici, a causa della possibile caduta di porzioni di muratura. In diversi casi, la presenza di fasce deboli ha impedito la diffusione del danno ad altri elementi strutturali. Al contrario, in caso di fasce più resistenti, il danno si è sviluppato principalmente nei maschi murari dei primi piani. La Figura 11 riporta un esempio per ciascuna di queste due situazioni e un caso in cui si sono osservati danni sia ai maschi murari sia alle fasce.

Si sono inoltre osservati molti casi di edifici in muratura che hanno mostrato prestazioni soddisfacenti, con danni lievi o moderati. In particolare, edifici con connessioni adeguate tra parete e parete e tra parete e strutture orizzontali, con uno spessore sufficiente dei maschi murari e una percentuale sufficiente di muratura (rapporto tra l'area delle pareti e l'area totale di piano), non-



Figura 11
Edifici in cui il danno nel piano è concentrato nei maschi murari (11a, Moglia), nelle fasce (11b, Mirandola) e in entrambi gli elementi strutturali (11c, Rovereto sulla Secchia).

Figura 12
Immagini di due edifici che hanno mostrato una prestazione globalmente soddisfacente: il teatro di Novi di Modena (1926, sinistra) e un edificio a Cavezzo (destra).



Figura 13
Un'immagine del municipio di San'Agostino, gravemente danneggiato (rilievo del 30 maggio 2012).



ché con un adeguato apparecchio murario hanno in generale subito danni limitati. Alcuni esempi di una buona prestazione globale di edifici esistenti sono riportati in Figura 12. Nella parte sinistra della figura, si può osservare il danno subito dal teatro di Novi di Modena, che ha subito soltanto il collasso della cimasa della facciata principale, mentre per il resto il danno

è stato limitato dalla presenza di catene distribuite in modo regolare nell'edificio. La parte destra della Figura 12 mostra invece un edificio di Cavezzo che non ha subito danni nelle strutture perimetrali. Si sono inoltre osservati diversi casi di murature a doppio paramento, originariamente concepite con orizzontamenti pesanti appoggiati sul paramento interno e, solo par-



Figura 14
Concentrazione del danno nelle torrette: danno e successivo collasso di una torretta d'angolo a San Felice sul Panaro (sinistra e centro) e danno nel piano ai maschi di una torretta a Moglia (destra).



Figura 15
Collasso di un edificio nel centro storico di Concordia sulla Secchia. La fotografia mostra che la facciata dell'edificio era costituita da due paramenti di muratura in laterizio non collegati.



Figura 16
Esempi di collasso del paramento esterno in pareti in laterizio multi-paramento: dettaglio dell'edificio collassato a Concordia sulla Secchia (16a) e collassi parziali di edifici a San Felice sul Panaro (16b) e a Mirandola (16c).

zialmente, su quello esterno, con conseguenti effetti di instabilità del paramento interno e martellamento di quello esterno.

In alcuni edifici si sono invece osservati danni più significativi e in qualche modo anomali, generalmente a causa di qualche singolarità della struttura che ne ha aumentato la vulnerabilità sismica. Un esempio significativo è il caso

di edifici con pareti di grande luce con notevoli snellezze verticali e orizzontali, accoppiate nel caso peggiore ad una irregolarità strutturale, come ad esempio nel caso famoso del municipio di Sant'Agostino (Figura 13), in cui l'ampia sala consiliare ha chiaramente costituito un elemento di debolezza dell'organismo strutturale.

Altri esempi di concentrazione del danno

dovuta a qualche forma di irregolarità strutturale sono riportati nella Figura 14, che mostra danni nel piano e collassi di torrette in muratura che si elevano al di sopra del piano di gronda o del colmo della copertura, o che presentano supporti molto snelli.

Alcuni edifici, con muratura di laterizio inadeguata ingranata, hanno subito danni molto significativi a causa del collasso fuori piano del paramento esterno. Un esempio impressionante è quello di un edificio a Concordia sulla Secchia (Figura 15) in cui la facciata era costituita da due paramenti non collegati, invece che da un unico muro che avrebbe potuto fare affidamento sull'intero spessore della parete. In questo caso, come evidente nel dettaglio riportato in Figura 16, era presente una fodera in laterizi a una testa semplicemente addossata alla parete pre-esistente a due teste. In Figura 16 sono riportati anche altri esempi simili di collassi parziali dei paramenti esterni e di inadeguato ingranamento trasversale, osservati anche nelle chiese (Sorrentino et al., 2012). Altre carenze strutturali sono state messe in evidenza, in alcuni casi, dalle scosse di intensità relativamente elevata che hanno colpito ripetutamente gli stessi edifici.

La Figura 17 riporta un esempio interessante di questa situazione, costituito da un edificio in muratura di Cavezzo, composto da due unità strutturali costruite in tempi diversi. L'unità d'angolo era stata addossata a quella esistente, attraverso morse a tre filari ogni dodici. L'evento del 20 maggio ha messo in evidenza l'inefficacia di questa connessione, evidenziando la cesura costruttiva anche a seguito del martellamento tra le due porzioni. Gli eventi del 29 maggio hanno peggiorato significativamente questo danno, causando il collasso della porzione strutturale aggiunta.

Come evidente anche dalla Tabella 1, la condizione finale degli edifici, in particolare quelli

nella parte occidentale della zona danneggiata dall'evento principale del 20 maggio, deve essere associata a un processo di accumulo del danno. Quasi tutti gli eventi di magnitudo maggiore di 5.0 della sequenza hanno infatti fatto registrare un'accelerazione di picco maggiore di 0.25 g alla stazione di Mirandola.

In alcuni casi, la mancanza di manutenzione ha senz'altro contribuito ad aggravare la vulnerabilità sismica, soprattutto per quanto riguarda l'effetto del degrado del legno sull'efficienza strutturale dei sistemi di copertura e dei solai. Inoltre, le qualità meccaniche della muratura di mattoni tradizionali sono molto sensibili alla qualità della malta, che se soggetta a degrado o se già originariamente di bassa qualità rende i setti murari vulnerabili anche ad azioni nel piano.

Come già avvenuto per i maggiori terremoti passati in Italia, anche nel caso dell'Emilia si sono presentate diverse criticità associate alla vulnerabilità sismica dei centri storici, legate per esempio al comportamento strutturale degli aggregati edilizi, all'interazione negativa tra edifici adiacenti in presenza di irregolarità in elevazione, al martellamento di strutture adiacenti. In alcuni casi, inoltre, la presenza di danni severi ad un numero relativamente ridotto di edifici ha portato alla chiusura e all'evacuazione di interi centri storici, a causa delle difficoltà di esodo e soccorso in stradine anguste potenzialmente occupate da detriti, e del rischio di caduta di macerie e di elementi non strutturali. Ciò ha causato anche deviazioni del traffico, come per esempio nel caso di Rovereto sulla Secchia. Ovviamente in questi casi è necessario implementare tutte le misure di sicurezza necessarie, ma esempi recenti di eventi sismici (ad es. Nocera Umbra, 1997 e L'Aquila, 2009) hanno mostrato che maggiore è il periodo di inattività di un centro cittadino, maggiori sono i costi socio-economici aggiuntivi rispetto a quelli direttamente causati dai danni del terremoto.

Figura 17
Effetto delle scosse ripetute su una porzione di edificio addossata a un edificio pre-esistente senza un'adeguata connessione strutturale né un giunto sismico: danno causato dall'evento del 20 maggio (a sinistra, cortesia di M. Messori) e collasso della porzione aggiunta (a destra) a seguito del terremoto del 29 maggio.



2.2 Danno strutturale alle costruzioni moderne

Le strutture in muratura moderna tipiche di questa zona sono principalmente costituite da edifici in muratura ordinaria, normalmente fino a 3 piani, con prevalenza di strutture murarie realizzate con blocchi in laterizio a foratura verticale, sebbene siano stati rilevati anche alcuni edifici realizzati con diverse tipologie di blocchi in calcestruzzo. In questa area sono inoltre presenti anche molti edifici in muratura armata, principalmente realizzati con blocchi in laterizio o con blocchi in calcestruzzo di aggregati leggeri. La muratura non armata di laterizio è di norma realizzata utilizzando blocchi di medio/grande spessore (normalmente in un intervallo compreso tra 25 e 45 cm), con una percentuale di foratura di circa il 45%-50%. Vengono utilizzati sia letti di malta ordinari (spessore del giunto compreso tra 10 e 15 mm) sia, più di recente, letti di malta sottili (spessore normalmente inferiore a 3 mm) posati su blocchi rettificati, mentre i giunti verticali sono usualmente riempiti sull'intero spessore di blocchi lisci o in apposite tasche. Le costruzioni realizzate con blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato utilizzano elementi pieni e giunti di malta posati in strati sottili. La muratura armata è di norma costituita da blocchi a fori verticali con cavità di dimensione opportuna che consentono l'inserimento delle barre verticali in acciaio, mentre l'armatura orizzontale è disposta nello spessore dei letti di malta.

Gli edifici in muratura di recente costruzione dovrebbero essere concepiti, progettati e realizzati in modo da inibire le principali fonti di vulnerabilità presenti nelle strutture in muratura storica, rispettando le prescrizioni di progetto presenti nelle norme antisismiche nazionali che promuovono l'uso di blocchi con una sufficiente robustezza e di forma regolare, che limitano la snellezza delle pareti, che impongono la realizzazione di connessioni efficaci all'intersezione tra muri e tra muri e solai/coperture attraverso l'esecuzione di cordoli in c.a. continui a livello di ogni piano e a livello di copertura, favorendo un comportamento scatolare di insieme, una sufficiente rigidità nel piano dei diaframmi e una certa regolarità della struttura.

Sono stati effettuati una serie di rilievi post-sismici su differenti tipologie di edifici in muratura portante moderna al fine di valutare la prestazione sismica di differenti sistemi strutturali anche in funzione dell'azione sismica stimata o misurata nelle stazioni accelerometriche. In particolare, sono stati compiuti sopralluoghi su 70 edifici di datazione relativamente certa: 47 su edifici in muratura ordinaria di laterizio, 16 su edifici in muratura armata di laterizio, 4 su edifici in muratura ordinaria in blocchi di calce-

struzzo aerato autoclavato e 3 su edifici in muratura armata in blocchi di calcestruzzo con aggregati leggeri (Manzini e Morandi, 2012; da Porto et al., 2012). In alcuni casi, gli edifici in muratura presentano elementi verticali in c.a. (generalmente pilastri in c.a. o pareti snelle in c.a.) sia all'interno della pianta dell'edificio sia all'esterno, per esempio per sostenere la struttura dei portici o dei balconi. Nel seguito verrà descritto con maggior dettaglio lo stato di 5 edifici in muratura (uno in muratura non armata di laterizio, uno in muratura armata di laterizio, uno in muratura ordinaria con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato, uno in muratura armata con blocchi in calcestruzzo di aggregati leggeri, uno in muratura ordinaria di laterizio realizzato alla fine degli anni '60), presi come riferimento del comportamento tipico delle rispettive tipologie. Viene inoltre riportato il caso di un quartiere residenziale ubicato a Rovereto sulla Secchia, frazione di Novi di Modena, nel quale si sono manifestati danni piuttosto rilevanti su alcuni edifici in muratura ordinaria oltre che su edifici a telaio in c.a. tamponati. Sulla mappa di Figura 1 sono riportati alcuni cerchi verdi con una numerazione da 1 a 6 che identificano i 6 siti considerati.

Il primo caso è rappresentato da un edificio in muratura ordinaria di laterizio a 2 piani costruito nel 2009 ed ubicato a Finale Emilia, nella frazione di Casoni di Sopra a circa 9 km Sud/Sud-Est dal capoluogo e ad una distanza epicentrale di circa 10 km da entrambi gli eventi sismici del 20 e del 29 Maggio. La stima della PGA per questo sito è di 0.20-0.30 g relativamente al primo evento e di 0.26 g per il secondo. L'edificio è costituito da pareti perimetrali aventi spessore pari a 45 cm e pareti interne di 30 cm di spessore realizzate con blocchi in laterizio alleggerito a fori verticali con percentuale di foratura di circa il 45%, giunti di malta sottili e giunti verticali caratterizzata da tasca riempita di malta. I solai intermedio e di copertura sono rigidi nel proprio piano e la struttura risulta sostanzialmente regolare in pianta ed in elevazione. Non sono state osservate né fessurazioni né cavillature né danno di alcun tipo nei muri interni, in quelli esterni e nei componenti non strutturali. L'immagine riportata in Figura 18.a), scattata immediatamente dopo il principale evento sismico del 29 Maggio 2012, mostra la parte esterna dell'edificio, esente da danno.

Il secondo caso è rappresentato da un edificio a tre piani in muratura armata realizzato con blocchi in laterizio a fori verticali che risulta non danneggiato (Figura 18b). Le pareti esterne ed interne possiedono uno spessore pari rispettivamente a 30 cm e 25 cm e la configurazione

strutturale è molto regolare sia in pianta che in elevazione. Questo edificio, adibito a residenza e realizzato nel 2009, è situato a S. Felice sul Panaro ad una distanza di 10 km e di 4 km dagli epicentri dei due eventi sismici principali. Il valore di PGA stimata relativamente all'evento del 20 di Maggio è risultato pari a 0.29 g (Bozzoni et al., 2012), mentre l'accelerazione registrata dopo l'evento del 29 Maggio nella stazione sismica di S. Felice sul Panaro, temporaneamente installata a poche centinaia di metri dall'edificio, è risultata essere di 0.22 g.

Il terzo caso esposto è un edificio ad un piano in muratura ordinaria realizzato con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato e giunti di malta di tipo sottile caratterizzato da murature di spessore pari a 40 cm lasciate al rustico senza la posa di intonaco; l'edificio, del 2006, è adibito a deposito agricolo; la copertura, leggera, risulta impostata su due differenti livelli. La struttura è ubicata nel comune di Carpi a circa 4 km Sud-Est dal capoluogo ad una distanza epicentrale di 31 km e 19 km. La PGA stimata per l'evento del 20 maggio è inferiore a 0.10 g ed è pari a 0.14 g per il 29 maggio. Su questo edificio non è stato evidenziato nessun tipo di danno (Figura 18c).

Il quarto caso è rappresentato da un edificio in muratura armata a due piani più piano mansardato realizzato con blocchi in calcestruzzo con aggregati leggeri, ubicato a Vigarano Mainarda. Lo spessore portante delle pareti è di

24.5 cm ed i blocchi sono caratterizzati da un assemblaggio di una parte portante, di un pannello isolante e di un elemento esterno in muratura di calcestruzzo non strutturale. L'armatura verticale è costituita da piccoli pilastri in c.a. inseriti nei fori dei blocchi, mentre l'armatura orizzontale è posizionata nei letti di malta. Con riferimento ai due principali eventi sismici considerati, le distanze epicentrali risultano di circa 22 km e 33 km ed i valori della PGA stimata sono di 0.10-0.20 g ed inferiori a 0.05 g. Nonostante l'azione sismica riferita ai due eventi sismici di riferimento non sia stata particolarmente elevata (soprattutto quella relativa al secondo terremoto), altri scuotimenti di una certa intensità hanno colpito la zona, quale per esempio l'evento di magnitudo M_w pari a 5.1 delle 15.18 del 20 Maggio con epicentro localizzato a soli 1.5 km da questo edificio. Tuttavia, come illustrato nella Figura 18d, l'edificio non presenta nessun tipo di danneggiamento.

In Figura 19 sono illustrati alcuni dei danni subiti da un edificio residenziale di quattro piani in muratura portante non armata in laterizio costruito alla fine degli anni '60 ed ubicato a Finale Emilia (distanza epicentrale pari a 8 km ed a 16 km e PGA stimata pari a 0.30 g ed a 0.23 g con riferimento, rispettivamente, agli eventi principali del 20 e del 29 maggio). Il danno è principalmente concentrato in corrispondenza del piano terra, dove ampie fessure diagonali si sono manifestate sia nelle pareti

Figura 18
Esempi di edifici non danneggiati dagli eventi sismici: a) edificio a due piani in muratura ordinaria di laterizio nella frazione di Casoni di Sopra nel comune di Finale Emilia; b) Edificio in muratura armata di laterizio a tre piani a S. Felice sul Panaro; c) edificio ad un piano in muratura ordinaria realizzato con blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato nel comune di Carpi; d) edificio in muratura armata con blocchi in calcestruzzo con aggregati leggeri, ubicato a Vigarano Mainarda.



strutturali interne ed esterne, sia nei tamponamenti. Le pareti in muratura portante, costituite da blocchi in laterizio a foratura verticale con spessore di 20 cm, sono collegate ai solai in latero-cemento mediante cordoli in c.a. Questo edificio, nonostante presenti un adeguato collegamento fra le pareti strutturali e gli orizzontamenti, sufficientemente rigidi nel proprio piano, non era stato calcolato per resistere alle forze laterali e non soddisfa i moderni criteri di progettazione sismica, a causa della mancanza di una adeguata quantità (o "densità") di pareti strutturali, soprattutto lungo una delle due direzioni principali. Questa deficienza provoca elevati livelli di sforzo di compressione verticale sulle pareti strutturali, snelle e di ridotto spessore, del piano terra, e quindi una riduzione della capacità deformativa nel piano delle pareti stesse per attivazione di meccanismi di rottura a taglio, con formazione di fessure tipicamente ad andamento diagonale.

Danni strutturali e non strutturali piuttosto estesi, su edifici di recente costruzione, con struttura portante sia a telaio in c.a. tamponato sia in muratura portante non armata, sono stati registrati in un quartiere residenziale nella zona nord/nord-ovest di Rovereto sulla Secchia, frazione di Novi di Modena, ad una distanza epicentrale dai due eventi sismici principali del 20 e del 29 maggio, rispettivamente, di 22 km e di 11 km. In questo quartiere sono stati oggetto di indagine dodici edifici di recente costruzione in muratura portante non armata in laterizio, a tre o quattro piani fuori terra. La maggior parte di questi edifici è stata costruita fra la fine degli anni '90 ed il 2003, uno risultava in costruzione nel 2003 ed uno è stato edificato dopo il 2003; fra questi edifici, si sono individuati due gruppi distinti, ciascuno di tre edifici identici per tipologia. Dall'indagine svolta è risultato che solo due edifici non hanno riportato alcun danno visibile o lesione, neppure leggera, e sono ancora agibili. Le altre costruzioni sono

risultate invece inagibili a causa del livello di danneggiamento subito, variabile fra moderato a molto grave. Si sono rilevati danni significativi, concentrati principalmente in corrispondenza delle pareti strutturali al piano terra, con formazione di fessure diagonali e bi-diagonali, in alcuni casi anche molto ampie, e collassi parziali in corrispondenza degli spigoli delle pareti d'angolo. Sono inoltre state rilevate fessure bi-diagonali a taglio anche al primo piano di alcuni edifici. Alcune immagini dei danni sono riportate in Figura 20. Molte delle lesioni più significative riscontrate negli edifici risultano orientate approssimativamente secondo la direzione nord-sud ed hanno interessato i maschi paralleli alla direzione della via di accesso alle abitazioni. Le pareti orientate secondo tale direzione, in parecchi casi, presentano ampie aperture (ad esempio, gli accessi alle autorimesse) e quindi una ridotta presenza di muratura portante. Questo tipo di danno può inoltre suggerire un possibile effetto di direttività dell'azione sismica. La PGA stimata per la zona è di 0.10-0.20 g e 0.24-0.26 g per i due eventi sismici principali, secondo i criteri definiti nell'introduzione. Il sisma ha colpito con grande intensità e quasi indiscriminatamente differenti tipologie strutturali (sia edifici in muratura portante sia a telaio tamponato in c.a.) in un'area piuttosto limitata, circondata da altre che sono risultate interessate da un livello di danneggiamento molto minore delle strutture. Questa localizzazione del danno potrebbe anche essere legata ad un effetto di sito che ha amplificato localmente lo scuotimento, per quanto questa ipotesi sia da verificare. In ogni caso l'elevato livello di danno riscontrato sugli edifici di questa zona è sicuramente in buona parte attribuibile alla vulnerabilità degli edifici stessi (tenendo conto che la maggior parte di questi è stata edificata prima della riclassificazione sismica del sito e dunque senza l'applicazione di alcun principio di progettazione antisismica).



Figura 19
Edificio a quattro piani fuori terra in muratura portante non armata in laterizio di Finale Emilia, costruito senza alcun criterio antisismico.

Figura 20
Alcuni esempi di danneggiamento subito da edifici in muratura portante non armata in laterizio in un quartiere residenziale a Rovereto sulla Secchia.



Figura 21
Esempi di danno a comignoli in muratura e prefabbricati.

2.3 Danno non strutturale

Come accennato nell'introduzione, il danno non strutturale ha causato due delle vittime dell'evento di M_w 5.8 del 29 maggio. Uno degli esempi più comuni di danno non strutturale osservato sia negli edifici esistenti sia in quelli nuovi consiste nella crisi dei comignoli, in muratura o prefabbricati. Alcuni esempi sono riportati in Figura 21, dove si vede che, a causa dello scuotimento, i comignoli tendono a separarsi in

blocchi che poi ruotano o scorrono rigidamente uno rispetto all'altro, spesso fino al collasso. Negli edifici esistenti sono stati inoltre osservati anche altri tipi di danni non strutturali. La Figura 22 mostra alcuni esempi di danni al manto di copertura in tegole, a balaustre e a elementi parasole in laterizio. Questi danni possono essere particolarmente pericolosi per la sicurezza delle persone che si trovino appena al di fuori o che escano dall'edificio. I movimenti



Figura 22
Esempi di danni non strutturali in edifici esistenti in muratura: collasso di parasole in laterizio (in alto a sinistra), incipiente collasso della balaustra in pietra di un balcone (in basso a sinistra), dislocamento di tegole (in alto a destra) e collasso di balcone in pietra (in basso a destra).

delle tegole possono inoltre causare infiltrazioni di acqua piovana, inducendo ulteriore degrado agli elementi in legno delle coperture.

3. Danni all'edilizia rurale

L'edilizia rurale ha mostrato una vulnerabilità sismica molto variabile, complessivamente bassa nelle residenze e molto alta nelle stalle-fienili e nelle *caselle*.

La maggior differenza risiede nelle più elevate snellezze (altezza/spessore e interasse muri trasversali/spessore) delle pareti perimetrali in stalle-fienili rispetto alle case. Inoltre le stalle-fienili presentano configurazioni estremamente irregolari, sia in pianta sia in elevazione. In alcuni casi i muri interni, quando presenti, non sono estesi all'intera altezza dei pilastri (Figura 4a) o non sono presenti su entrambi i lati dei pilastri (Figura 3b). Inoltre i portici sono più frequenti nelle stalle-fienili che nelle abitazioni.

Rispetto al danneggiamento osservato negli edifici in muratura in occasione di altri terremoti italiani, anche le costruzioni rurali hanno raramente subito la disgregazione della muratura, anche se è stato osservato qualche esempio di ingranamento trasversale inadeguato (Figura 23). Ciò è naturalmente legato all'impiego di mattoni regolari anziché elementi lapidei irregolari (Figura 3d). Pertanto, sebbene la malta presenti un limitato contenuto di calce e possa talvolta esser molto erosa dagli agenti atmosferici, la muratura di mattoni raramente subisce mec-

anismi di disgregazione della tessitura.

Il principale punto debole delle abitazioni è costituito dalle strutture orizzontali, in particolare il tetto, realizzato con elementi lignei debolmente collegati fra loro e alle murature di elevazione, nonché potenzialmente spingenti (Figura 2, Figura 24). Una simile condizione non è significativamente diversa nei casi in cui solai latero-cementizi, privi di un'efficace soletta, abbiano sostituito le originarie strutture lignee. Ciò comporta per le facciate una maggiore vulnerabilità rispetto al caso di vincolo sommitale efficace (Sorrentino et al., 2008). Alcuni casi di collassi pressoché completi sono stati ispezionati in prossimità del fiume Secchia (Figura 25); la concentrazione di questi esempi induce a ritenere possibile un'amplificazione locale del moto sismico del terreno.

Come anticipato, stalle-fienili e *caselle* hanno mostrato una vulnerabilità molto elevata (Figura 23).

Le tamponature molto snelle, costruite fra i pilastri, sono frequentemente collassate fuori del piano, specialmente quando realizzate in foglio (Figura 5). La connessione fra pilastri e tamponatura è risultata in genere inefficace.

Collassi fuori del piano hanno interessato anche muri perimetrali più spessi, specie in assenza di muri trasversali (Figura 24). In questi casi il tetto, necessariamente poggiato sulle lunghe facciate, è collassato, probabilmente contribuendo con la propria spinta ai ribaltamenti fuori del piano delle pareti. In assenza di significativa spinta del tetto, è

Figura 23
Complesso rurale in via
Santa Liberata, vicino a
Medolla.



Figura 24
Edificio rurale di abitazione
presso San Prospero.



Figura 25
Complesso rurale in via
San'Antonio, presso
San'Antonio in Mercadello:
a) prima del sisma (Google
Street View); b) il 14
giugno.



Figura 26
Complesso rurale in via
Santa Liberata, vicino
Medolla. Stalla-fienile: a)
prima del sisma (Google
Street View); b) il 13
giugno.





Figura 27
Stalla-fienile a Montalbano,
presso Medolla, sulla
Strada Provinciale 5.



Figura 28
Stalla-fienile crollato vicino
a Finale Emilia, in via per
Modena, vicino via
Canalvecchio.

interessante sottolineare che, grazie alla qualità dell'apparecchio, le immorsature d'angolo hanno usualmente mostrato prestazioni soddisfacenti.

Gli edifici rurali con pilastri presentano danneggiamenti specifici. I pilastri mostrano talvolta fuori piombo (Figura 3b). In altri casi uno o più pilastri sono ribaltati (Figura 25a). La sezione trasversale di un pilastro mostra l'assenza di ingranamento fra nucleo e paramento esterno (Figura 25b); non di meno non sono state osservate disgregazioni. L'interazione con il tetto non è di immediata interpretazione, ma la connessione fra elementi strutturali orizzontali e verticali è senza dubbio debole; inoltre nelle strutture orizzontali è spesso particolarmente evidente l'assenza di manutenzione nell'edilizia rurale. Ovviamente la crisi delle colonne ha comportato la crisi catastrofica delle coperture (Figura 23b).

Un altro danno tipico è stata la rottura a taglio di pilastri resi tozzi dalle tamponature delle stalle presenti al piano terra (Figura 4a). La *casella* in Figura 5 ha subito un meccanismo trasversale, con ribaltamento della porzione sommitale del muro posteriore, la fessurazione e il fuori piombo di due dei pilastri frontali. La crisi della cimasa, malgrado sia più tozza dei pilastri, può forse spiegarsi, almeno in parte, con il cosiddetto effetto-scala che rende dinamicamente più stabile un corpo dondolante più grande di un altro (Sorrentino et al., 2006).

Pressoché nessuna crisi nel piano è stata osservata nelle stalle-fienili e nelle *caselle*, certamente

a causa dell'assenza di collegamenti fra pareti d'elevazione e strutture orizzontali, nonché per l'elevata flessibilità e la scarsa robustezza di queste ultime.

Infine è bene sottolineare che la prestazione complessiva è da confrontare con il moto sismico del terreno, che è stato severo e confrontabile con quello di alcune aree di forte scuotimento a L'Aquila. Peraltro, rispetto al terremoto del 2009, si osserva una maggiore predominanza delle componenti di medio e lungo periodo, particolarmente pericolose per i meccanismi di corpi dondolanti (Sorrentino et al., 2006).

4. Conclusioni

Il rilievo del danno agli edifici esistenti in muratura di laterizio colpiti dalla sequenza sismica del maggio 2012 in Emilia ha messo in evidenza alcuni elementi di vulnerabilità ricorrenti, tipici delle strutture in muratura non concepite per resistere alle azioni sismiche. Tuttavia, la maggior parte degli edifici esistenti in muratura ha mostrato di possedere una resistenza intrinseca alle azioni orizzontali. A differenza dei rilievi effettuati dopo i principali terremoti italiani (ad es. Carocci e Lagomarsino, 2009) e internazionali (ad es. Javed et al., 2006), che hanno riguardato principalmente edifici in muratura di pietra, i danneggiamenti osservati negli edifici in muratura in mattoni dell'Emilia hanno mostrato il verificarsi di meccanismi di collasso fuori piano limitatamente a casi speci-

fici, ovvero la presenza di coperture spingenti e/o combinazioni di spessore insufficiente delle pareti e qualche forma di irregolarità strutturale. L'architettura rurale, che tanto contribuisce al carattere peculiare della campagna padana, ha mostrato vulnerabilità molto diverse fra residenze, da un lato, stalle-fienili e *caselle*, dall'altro. La configurazione e le elevate snellezze di seconde e terze rispetto alle prime spiegano la differenza di prestazione. La carenza di manutenzione e l'inadeguatezza dei dettagli costruttivi sono confrontabili fra le diverse tipologie, anche se risultano meno decisive nelle abitazioni; esse hanno contribuito alle prestazioni sismiche largamente insufficienti, comunque da valutare tenendo presente la severità delle scosse registrate, in una zona non frequentemente colpita da eventi tellurici.

I risultati dei rilievi post-sismici effettuati hanno evidenziato, nella grande maggior parte dei casi, una prestazione sismica soddisfacente degli edifici moderni in muratura, senza danni significativi negli elementi strutturali o non strutturali, anche nelle zone di massimo scuotimento. Questo comportamento è stato osservato in particolare negli edifici più recenti con un numero di piani limitato (2 o al massimo 3 piani), caratterizzati da una densità muraria sufficiente e costruiti con materiali di buona qualità, seguendo i più recenti principi in materia di dettagli costruttivi. Tuttavia, dall'altro lato, un numero limitato di edifici in muratura ordinaria di recente costruzione ha subito un danno significativo con la formazione di fessure diagonali e bi-diagonali concentrate in prevalenza nelle

pareti del piano terra. Una possibile spiegazione potrebbe essere ricercata nel fatto che la maggior parte di questi edifici danneggiati è stata realizzata prima del 2003 in assenza di progettazione sismica (possibili carenze nella qualità dei materiali e nei dettagli costruttivi, bassa sezione muraria complessiva), sebbene dovrebbe anche essere opportunamente indagata l'ipotesi di eventuali effetti locali del suolo, in particolare per il sito ubicato nella frazione di Rovereto sulla Secchia.

La prestazione degli elementi non strutturali, come comignoli e balaustre, è stata tanto scarsa da compromettere in molti casi la sicurezza degli abitanti di edifici danneggiati solo lievemente, in particolare nei centri storici. È confermata pertanto la necessità di prestare maggiore attenzione ai dettagli costruttivi di tali elementi, verificandone la risposta.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Francesca Bozzoni e Carlo Lai, per aver messo a disposizione le elaborazioni relative alla stima del moto del terreno.

Questa ricerca è stata in parte svolta nell'ambito della Convenzione "Dipartimento di Protezione Civile - Consorzio ReLUIS", firmata in data 24 settembre 2009 (repertorio n. 823), Progetto Esecutivo 2009-2012, Area Tematica 1, Linea di Ricerca 1, Task 1. Gli autori ringraziano gli architetti Alessandra Marotta (ricerche bibliografiche sull'edilizia rurale) ed Elisabetta Raglione (Figura 4a).

Bibliografia

- Arcoraci L., Berardi M., Bernardini F., Brizuela B., Caracciolo C.H., Castellano C., Castelli V., Cavaliere A., Del Mese S., Ercolani E., Graziani L., Maramai A., Massucci A., Rossi A., Sbarra M., Tertulliani A., Vecchi M., Vecchi S. (2012) - Rapporto macrosismico sui terremoti del 20 (M_l 5.9) e del 29 maggio 2012 (M_l 5.8 e 5.3) nella pianura Padano-Emiliana, QUEST-INGV, www.ingv.it.
- Beyer K., Dazio A. (2012) - Quasi-Static Cyclic Tests on Masonry Spandrels, *Earthquake Spectra*, Volume 28, No. 3, pp. 907-929.
- Bozzoni F., Lai C.G. (2012) - Comunicazione personale.
- Bozzoni F., Lai C.G., Scandella L. (2012) - Preliminary results of ground-motion characteristics, *Annals of Geophysics* 55, 4, pp. 609-614.
- Breventano S. (1576) - Trattato del terremoto, a cura di Paola Albini, 2007, IUSS Press, Pavia.
- Carocci C.F., Lagomarsino S. (2009) - Gli edifici in muratura nei centri storici dell'Aquilano, *Progettazione Sismica*, n. 3.
- Castellano A. (1986) - La casa rurale in Italia, Electa, Milano.
- Da Porto, F., Guidi G., Nicolini L. (2012) - Report pre-
- liminare sul comportamento degli edifici in muratura portante moderni durante la sequenza sismica nella Pianura Padana-Emiliana 2012, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università degli Studi di Padova, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy/>.
- Di Pasquale S. (2003) - Arte del costruire. Tra conoscenza e scienza, Marsilio, Venezia.
- Guidoboni E. (1987) - Delli rimedi contra terremoti per la sicurezza degli edifici: la casa antisismica di Pirro Ligorio (sec.XVI). In: *Tecnica e società nell'Italia dei secoli XII-XVI: undicesimo Convegno internazionale: Pistoia, 28-31 ottobre 1984, Centro italiano di studi di storia e d'arte, Pistoia*, pp. 215-228.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. and Valensise G. (2007) - CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500). INGV-SGA. <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- ISTAT (2001) - 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, dawinci.istat.it.
- Javed M., Khan A.N., Penna A., Magenes G. (2006)

- Behaviour of Masonry Structures During the Kashmir 2005 Earthquake, Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland – paper n. 1077.
- Liberatore L., Sorrentino L., Liberatore D., Decanini L.D. (2012) - Failure of Modern Structures Induced by the Emilia (Italy) 2012 Earthquakes, Engineering Failure Analysis, under review.
- Manzini C.F., Morandi P. (2012) - Rapporto preliminare sulle prestazioni ed i danneggiamenti agli edifici in muratura portante moderni a seguito degli eventi sismici emiliani del 2012, Eucentre, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy/>.
- OPCM 3274 2003 (2003) - Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", G.U. n.105 del 8 maggio 2003, S.O. n. 72, Allegato 1.
- Ortolani M. (1953) - La casa rurale nella pianura emiliana, Centro di studi per la geografia etnologica, Firenze.
- Penna, A., Magenes G. (2012) - Masonry Structures, in Decanini et al. 2012, Report on the March 27th 2010 Maule (Chile) earthquake, EUCENTRE Report 01/2012, IUSSPress, Pavia.
- Sorrentino L., Masiani R., Decanini L.D. (2006) - Overturning of rocking rigid bodies under transient ground motions, Structural Engineering and Mechanics, Volume 22, No. 3, pp. 293-310.
- Sorrentino L., Masiani R., Griffith M.C. (2008) - The vertical spanning strip wall as a coupled rocking rigid body assembly, Structural Engineering and Mechanics, Volume 29, No. 4, pp. 433-453.
- Sorrentino L, Liberatore L, Decanini LD, Liberatore D (2012) - The performance of churches in the Emilia, 2012, earthquakes. Inviato al Bulletin of Earthquake Engineering
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G. (2009) - Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): Seismotectonic implications. Bollettino della Società Geologica Italiana 128 (2), 605-613.