

Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 - Parte 2: Esempi di centri colpiti

Performance of masonry buildings in the seismic sequence of Central Italy 2016 - Part 2: case studies of affected municipalities

Alfredo Fragomeli¹, Alessandro Galasco¹, Francesco Graziotti², Gabriele Guerrini², Stylianos Kallioras³, Guido Magenes^{1,2}, Daniele Malomo², Martina Mandirola¹, Carlo F. Manzini¹, Beatrice Marchesi¹, Riccardo R. Milanesi², Paolo Morandi¹, Andrea Penna^{1,2}, Andrea Rossi³, Annalisa Rosti², Maria Rota¹, Ilaria E. Senaldi², Umberto Tomassetti², Serena Cattari⁴, Francesca da Porto⁵, Luigi Sorrentino⁶ ■

Sommario

Gli eventi della sequenza sismica dell'Italia centrale (il primo avvenuto il 24 agosto 2016 e l'ultimo il 18 gennaio 2017) hanno provocato danni significativi in un'area vasta che interessa le regioni di Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo. Nella parte 1 di questo lavoro, si sono discussi e commentati i danni osservati agli edifici ordinari in muratura, che costituiscono la maggior parte del costruito nella zona colpita. In questa parte 2, si presenta una serie di esempi di centri urbani colpiti dai terremoti, mettendo in rilievo le diverse caratteristiche degli edifici e gli effetti di queste sul danno osservato. In particolare, si è rilevata una differenza di comportamento tra gli edifici situati in centri che sono stati interessati nel recente passato di altri terremoti, in cui pertanto si ha una presenza abbastanza sistematica di presidi antisismici (è il caso, ad esempio, di Norcia), rispetto ad altri comuni in cui il costruito presentava caratteristiche di maggiore vulnerabilità, nonostante fossero classificati in zona sismica anche da oltre 100 anni, con le conseguenze tristemente note a tutti.

Parole chiave: Vulnerabilità sismica, interventi di miglioramento/adeguamento sismico, muratura di pietra, muratura di mattoni, danno cumulato.

Abstract

The events of the seismic sequence of Central Italy (the first of which occurred on the 24th of August 2016 and the last on the 18th of January 2017) induced severe damages in a very large area, involving the regions of Lazio, Umbria, Marche and Abruzzi. Part 1 of this work discussed and analysed damages occurred to ordinary masonry buildings, which constitute the majority of the building stock in the affected area. This part 2 presents a series of case studies of urban centres affected by the earthquakes of this sequence, highlighting the different characteristics of the buildings and their effects on the observed damage. In particular, a better performance was observed for buildings located in centres that were recently affected by previous events, in which antiseismic devices are quite systematically present (as for example in the case of Norcia). This is not the case for other municipalities, in which the building stock is characterized by a higher vulnerability, with the consequences that are unfortunately known to everybody, despite the fact that the seismic classification of these areas dates back even to more than 100 years ago.

Keywords: Seismic vulnerability; strengthening interventions; stone masonry; brick masonry; cumulated damage.

1. Introduzione

La sequenza sismica che ha colpito l'Italia centrale tra il 2016 e il 2017 è stata descritta in dettaglio in altri lavori (ad es. Luzi et al., 2017; Borzi et al., 2018; Iervolino et al., 2018), così come sono stati descritti gli effetti su alcune tipologie di strutture, quali edifici in muratura (Sorrentino et al., 2018), edifici in calcestruzzo armato (Masi et al., 2018) e ponti (Di Sarno et al., 2018). Sono stati inoltre studiati gli effetti su tipologie specialistiche, quali ospedali (Santarsiero et al., 2018) e scuole (Di Ludovico et al., 2018), nonché il comportamento degli elementi non strutturali (Perrone et al., 2018) e gli aspetti geotecnici (Lanzo et al., 2018).

¹ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica - Eucentre, Pavia.

² Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia, Pavia.

³ Programma ROSE, UME School, IUSS, Pavia.

⁴ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università degli Studi di Genova, Genova.

⁵ Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova, Padova.

⁶ Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma, Roma.

Nella parte 1 di questo lavoro (Fragomeli et al., 2017), si è presentata una sintesi critica del danno agli edifici ordinari in muratura, illustrando i caratteri generali e le peculiarità del costruito nelle aree colpite. In questa seconda parte, vengono invece analizzati con maggior dettaglio alcuni dei centri più interessati dallo scuotimento e dal danno, evidenziando, caso per caso, il ruolo delle caratteristiche costruttive e dei materiali utilizzati sul comportamento sismico degli edifici.

Si discute inoltre l'efficacia di alcuni interventi di consolidamento sismico, messi in atto a seguito di precedenti eventi che hanno colpito la stessa zona (Norcia 1859, Valnerina 1979, Umbria-Marche 1997, L'Aquila 2009). Un esempio significativo è quello del comune di Norcia, in cui la presenza sistematica di presidi antisismici storici e interventi moderni ha consentito una prestazione generalmente soddisfacente degli edifici del centro storico, permettendo anche la riapertura delle attività economiche in tempi relativamente rapidi. Situazioni molto più drammatiche sono state invece osservate in centri più piccoli, dove gli interventi di consolidamento erano mancanti o, in alcuni casi, inefficaci, a causa della scarsa qualità muraria e/o di dettagli costruttivi insufficienti.

Laddove possibile, si riportano esempi di aggravamento del danno nel corso della sequenza (Mouyiannou et al., 2014), mettendo a confronto le condizioni di alcuni edifici in seguito alle diverse scosse.

La Figura 1 mostra la zona colpita dagli eventi della sequenza sismica, con l'indicazione degli epicentri degli eventi del 2016 e delle località che saranno prese in considerazione nei prossimi paragrafi.

Figura 1
Mappa della zona interessata dalla sequenza sismica dell'Italia Centrale, con l'indicazione dei Comuni considerati in questo lavoro e degli epicentri degli eventi principali.



2. Amatrice e frazioni

Borgo simbolo del terremoto che all'alba del 24 agosto 2016 ha colpito le aree montane del Centro Italia a cavallo fra Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo, Amatrice (RI) è stata devastata con tanta violenza da spingere il sindaco a dichiarare poche ore dopo la scossa: "Il paese non c'è più". Ad aggravare il pesante bilancio dei danni alle costruzioni hanno poi contribuito le scosse di ottobre 2016 e gennaio 2017, che hanno provocato ulteriori crolli di numerose strutture già lesionate dal primo evento. Il centro urbano è stato infatti soggetto a valori registrati di PGA in direzione orizzontale pari a 0.87 g e 0.53 g per i terremoti del 24 agosto e del 30 ottobre, mentre per il terremoto del 18 gennaio, è stata stimata una PGA dell'ordine di 0.36 g. I valori registrati di PGA in direzione verticale sono stati pari a 0.40 g e 0.32 g per i primi due eventi sismici.

Il centro storico è principalmente costituito da aggregati di edifici in muratura di pietra naturale e ciottoli di fiume dalla tessitura irregolare, talvolta listata, a due o più paramenti malamente ammassati, con o senza nucleo incoerente all'interno. La qualità dei materiali è spesso scadente, con impiego estensivo di elementi arrotondati e malte povere. Proprio la scarsa qualità della

muratura tipica del luogo può essere considerata, insieme all'entità della prima scossa, all'origine della diffusa disgregazione dei corpi murari. Nei casi più fortunati, questa disgregazione ha provocato il collasso locale di uno o di entrambi i paramenti (Figura 2a) o la formazione di ampie lesioni a taglio, senza compromettere la stabilità globale del fabbricato, ma di frequente si sono verificati collassi fuori piano di intere pareti (Figura 2b), specialmente se non direttamente caricate dai solai, o il ribaltamento dei cantonali. In numerose circostanze il collasso di alcune pareti o la loro inclinazione fuori piombo hanno provocato la perdita di appoggio di solai e coperture, con il conseguente crollo di interi edifici o porzioni di aggregato (Figura 2c e Figura 2d). In presenza di murature tanto scadenti, eventuali interventi di rinforzo, come l'inserimento di incatenamenti e/o cordoli o la realizzazione di orizzontamenti pesanti in calcestruzzo armato, sono risultati molto spesso vani e inefficaci. Danni consistenti si sono registrati anche nell'immediata periferia del capoluogo, caratterizzata da fabbricati isolati di costruzione generalmente più recente rispetto al centro storico. In quest'area, sono presenti edifici in muratura di pietra naturale a due o più paramenti, listata o meno, con diverso grado di regolarità e ammorsamento. In alcuni casi, si è potuta osservare l'efficacia, in termini di prevenzione del collasso, della combinazione di corpi murari di buona qualità con diaframmi di piano rigidi ben collegati fra loro, che ha permesso lo sviluppo di meccanismi di taglio nel piano delle pareti (Figura 3a e b). Non sono



Figura 2

Centro storico di Amatrice dopo la scossa del 24 agosto: (a) disgregazione di un paramento murario esterno; (b) collasso fuori piano di una parete; (c) crolli lungo corso Umberto I in direzione est e (d) in direzione ovest.

tuttavia mancati i crolli parziali, soprattutto collassi fuori piano di pareti nonostante la presenza di cordoli, e i collassi totali. Un'altra tipologia costruttiva diffusa nella periferia del capoluogo è rappresentata dai telai in calcestruzzo armato tamponati con blocchi di laterizio, calcestruzzo alleggerito, o pietra, costruiti nella seconda metà del secolo scorso, sui quali si sono riscontrate criticità di vario livello. In alcuni casi, i problemi si sono limitati agli elementi non strutturali, quali tamponature, divisori e rivestimenti, interessati da estesa fessurazione a taglio nel piano ed eventuale collasso fuori piano (Figura 3c). Tuttavia, in più di un edificio si è rilevata una deleteria interazione fra i puntoni diagonali formatisi nelle tamponature e i pilastri o i nodi dei telai, caratterizzati da armatura trasversale insufficiente o totalmente assente (Figura 3d). A causa della poca attenzione per i dettagli costruttivi e delle esigue armature trasversali, tipiche del periodo di costruzione, la sovrapposizione delle armature longitudinali alle estremità dei pilastri è risultata talvolta inefficace, così come l'ancoraggio delle barre delle travi nei nodi. Lo sfilamento delle armature e la crisi dei nodi ha provocato poi la perdita di continuità fra gli elementi dei telai, che in alcune circostanze si è tradotta in collassi parziali o totali degli edifici (Figura 3e).

Figura 3
Periferia di Amatrice dopo la scossa del 24 agosto:
(a, b) lesioni a taglio nel piano di pareti in muratura;
(c) danni alle tamponature di un edificio in c.a.; (d) crisi a taglio di un pilastro in c.a.;
(e) collasso totale di un edificio a telaio tamponato.



Il comune di Amatrice include, oltre al capoluogo, una settantina di frazioni e località. Questi piccoli centri, tipicamente rurali, sono costituiti principalmente da edifici in muratura di pietra naturale di scarsa qualità, realizzati con malte tanto povere (di fatto anche prive di leganti nella loro composizione) da avere spesso la consistenza del fango. Le frazioni sono state colpite dalla sequenza sismica con maggiore o minore intensità in ragione della loro distanza epicentrale e degli effetti di amplificazione locale. Durante i sopralluoghi ai centri disseminati lungo la Strada Provinciale 20, si è riscontrata una situazione particolarmente drammatica a Petrana, un piccolo agglomerato rurale con una decina di residenti, dove tutti gli edifici sono stati gravemente danneggiati, con numerosi collassi parziali o totali (Figura 4a). Una simile devastazione è stata osservata a Sant'Angelo (Figura 4b) e a Saletta (Figura 4c), frazioni con un centinaio e una trentina di residenti, rispettivamente. Anche in questi piccoli centri la quasi totalità dei fabbricati ha riportato gravi lesioni o crolli.

Meno disastrose sono invece apparse le condizioni di San Capone, dove solo una parte degli edifici è stata interessata da danni o

crolli e dove, a settembre 2016, ancora risiedevano alcuni dei circa venti abitanti. Notevoli sono i casi di due edifici in muratura di blocchi semipieni a fori verticali con solai in latero-cemento, che non hanno riportato danni apparenti. Uno di questi in particolare, realizzato in aggregato strutturale con edifici più vecchi, e ancora in costruzione il 24 agosto 2016, non ha risentito del collasso di una delle unità adiacenti (Fragomeli et al., 2017). Questo conferma il comportamento spesso soddisfacente delle strutture in muratura di recente concezione, come già evidenziato in altri terremoti (Bracchi et al., 2012; Penna et al., 2014).



Figura 4
Frazioni di Amatrice dopo la scossa del 24 agosto:
(a) Petrana; (b) Sant' Angelo;
(c) Saletta.



Figura 5
Alcuni esempi di collasso per ribaltamento fuori piano di pareti esterne, osservati ad Accumoli dopo il sisma del 24 agosto (in basso).

3. Accumoli (RI)

Il comune di Accumoli è stato uno dei più colpiti dal sisma del 24 agosto, con una PGA stimata di 0.76 g (Fragomeli et al., 2017). I maggiori crolli, osservati a seguito di tale evento, hanno interessato in larga parte edifici in muratura, resi vulnerabili dall'impiego di una tipologia muraria a tessitura irregolare in conci di pietra di varia pezzatura, caratterizzata da una malta di qualità generalmente scadente. Tra i meccanismi di danno osservati in modo ricorrente vi è l'espulsione fuori piano di pareti perimetrali in muratura a doppio paramento, caratterizzata dalla mancanza di collegamento trasversale, come mostrato in Figura 5.

Il frequente collasso per ribaltamento fuori piano di intere pareti disposte parallelamente alla direzione di orditura dei solai, dimostra una diffusa carenza o inadeguatezza di collegamento con gli elementi di orizzontamento. Anche in questo comune,



si sono infatti riscontrati molteplici casi in cui le ristrutturazioni edilizie hanno previsto il getto di solai con cordoli in breccia. Il collasso di pareti fuori piano ha riguardato sia questi casi che edifici con solai lignei originali.

Data la scarsa resistenza intrinseca dei materiali costituenti la tipologia muraria (in particolare le malte di qualità scadente) e la presenza di una tessitura non omogenea, molti edifici hanno esibito un quadro di danno caratterizzato da gravi lesioni nel piano, localizzate prevalentemente in corrispondenza delle fasce murarie (Figura 6 a).

Si è osservata inoltre la presenza ricorrente di angolate, realizzate con conci di maggiori dimensioni, che, seppure utili quali elementi di legatura tra pareti ortogonali, in alcuni casi sono state oggetto di espulsione fuori piano, data la minore resistenza della muratura adiacente (Figura 6b).

Figura 6
Alcuni esempi di danni riscontrati dopo il sisma del 24 agosto ad Accumoli: danno nel piano e incipiente espulsione del cantonale.



L'evento del 30 ottobre è stato caratterizzato da una PGA stimata di 0.50g. A causa dell'incrementata vulnerabilità delle costruzioni dovuta al danno pregresso, questo evento ha causato la quasi totale distruzione del centro storico, come mostrato in Figura 7.

Figura 7
Immagini del centro storico di Accumoli raso al suolo a seguito dell'evento sismico del 30 ottobre (in (b) è un fotogramma tratto dal video disponibile su <https://youtu.be/NJXn1M33OQ?t=13>).



La Figura 8 mostra l'evoluzione del danno, a seguito degli eventi sismici di agosto e ottobre, ad un edificio residenziale in muratura di pietrame di varia pezzatura con presenza di ripianamenti in laterizio, posti ad intervalli regolari.

Dalle immagini in figura si osserva la totale inefficacia del cordolo perimetrale in copertura, collassato a seguito delle repliche immediatamente successive all'evento di agosto. Il cordolo, realizzato su una muratura scadente, risulta mal collegato, debolmente armato e con conglomerato cementizio di scarsa qualità. Si rileva inoltre la presenza di gravi lesioni da martellamento con la costruzione adiacente.

Il fabbricato si mostra totalmente collassato a seguito dell'evento di ottobre. L'edificio di destra, malgrado fosse costruito con una tipologia muraria simile e pur esibendo un importante danneggiamento nel piano, non ha tuttavia raggiunto il collasso.

Si segnala la presenza di un edificio nel centro storico, che ha subito solo lievi danni superficiali sia dopo l'evento di ottobre (Figura 9), sia dopo le scosse di gennaio. L'edificio, di recente ristrutturazione (successiva al 2011, sulla base delle immagini di Google Streetview), è caratterizzato dalla presenza di molteplici catene in entrambe le direzioni e una muratura completamente ristilata con malta di ottima qualità.



Figura 8
Evoluzione del danno di un edificio residenziale in muratura listata nel comune di Accumoli, frazione Illica, a seguito degli eventi sismici del 24 agosto, del 30 ottobre e del 18 gennaio.



Figura 9
Edificio del centro storico di Accumoli rimasto quasi indenne (almeno all'esterno) a seguito dell'evento sismico del 30 ottobre.

4. Arquata

Il comune di Arquata del Tronto si compone di diverse frazioni, alcune delle quali sono localizzate su alture e pendii. Tra queste, Arquata capoluogo e Pescara del Tronto sono state quelle maggiormente colpite, mentre le frazioni di fondovalle, ad esempio Vezzano, hanno subito danni molto più contenuti. Rispetto ad altre località colpite, l'abitato di Arquata capoluogo presenta edifici in muratura con numero di piani complessivo anche molto elevato. Il comune è stato classificato in zona sismica solo nel 1983 e pertanto il costruito non può contare su una presenza sistematica di presidi antisismici.

Durante i terremoti del 24 agosto, 26 ottobre, 30 ottobre e 18 gennaio, nel centro di Arquata si sono stimate PGA in direzione orizzontale dell'ordine di 0.25 g, 0.13 g, 0.45 g e 0.10 g. Alcune zone del capoluogo del Comune sono state gravemente danneggiate dalla scossa del 24 agosto (Figura 10a), mentre altre aree hanno subito lesioni meno estese (Figura 10b); si sono anche osservati cedimenti di muri di sostegno dei pendii su cui sorge il centro (Figura 10c), che possono aver indotto dissesti alle fondazioni degli edifici. Buona parte del centro è stata rasa al suolo dal terremoto del 30 ottobre (Figura 10d).

Il centro storico è principalmente costituito da aggregati di edifici in muratura di pietra naturale a tessitura irregolare, costruiti su due paramenti poco ammassati con materiali di qualità povera; talvolta sono presenti cantonali in blocchi squadrati di dimensioni maggiori. Data la conformazione del centro, arroccato a cavallo di un'altura, gli edifici presentano un numero di piani fuori terra diverso a seconda del lato considerato (fondazioni su più livelli a causa del pendio). Le coperture originali sono tipicamente a struttura lignea, così come gli orizzontamenti, anche se talvolta si incontrano solai misti con putrelle in acciaio e tavelloni o voltine in laterizio. Alcuni edifici presentano sopraelevazioni.

A seguito della scossa di agosto 2016, si sono osservati collassi locali dovuti a disgregazione della muratura, distacco e

Figura 10

Evoluzione del danno ad Arquata del Tronto: (a, b) centro storico dopo la scossa del 24 agosto; (c) cedimento di un muro di sostegno e danno al manto della strada di accesso al centro, dopo la scossa del 24 agosto; (d) crolli diffusi dopo la scossa del 30 ottobre.



Figura 11

Centro storico di Arquata del Tronto dopo la scossa del 24 agosto: (a) disgregazione della muratura, distacco e instabilità dei paramenti murari; (b) collasso fuori piano di una parete; (c) lesioni a taglio nel piano di una parete; (d) lesioni da interazione fra unità strutturali adiacenti di un aggregato.



instabilità dei paramenti murari (Figura 11a), meccanismi di ribaltamento delle pareti, soprattutto se non caricate dai solai (Figura 11b), o dei cantonali, meccanismi di taglio nel piano delle pareti (Figura 11c) e danni dovuti all'interazione fra unità strutturali adiacenti negli aggregati (Figura 11d). I suddetti meccanismi hanno talvolta provocato il collasso parziale o totale degli edifici.

Interventi di consolidamento successivi hanno comportato in alcuni casi l'aggiunta di solette in calcestruzzo sopra gli orizzontamenti originali, in altri la sostituzione di solai e coperture con sistemi più pesanti in latero-cemento o in calcestruzzo armato; questi ultimi sono invece presenti fin dalla costruzione nelle strutture più recenti. In certi edifici sono stati realizzati cordoli in calcestruzzo armato o inserite catene metalliche. Tuttavia, la qualità scadente della muratura ha reso inefficaci alcune di queste soluzioni (Figura 12).



Figura 12
Soluzioni inefficaci negli edifici in pietra del centro storico di Arquata del Tronto: (a) copertura e cordoli in calcestruzzo armato e solai in latero-cemento in un edificio del secolo scorso; (b) sostituzione di solai in legno con solai in latero-cemento e inserimento di catene metalliche in un edificio storico.

La frazione di Pescara del Tronto, costituita principalmente da edifici in muratura di pietra (generalmente con fondazioni superficiali), è stata quasi interamente distrutta a causa della frana del pendio su cui era costruita buona parte del paese (Figura 13a), innescata dall'evento del 24 agosto. La frana ha trascinato il paese verso la sottostante SS4 Salaria, causando pesanti limitazioni del traffico per diversi mesi.

Lungo la via d'accesso a Pescara del Tronto, accanto alle strutture in muratura portante gravemente lesionate, si trovava un paio di edifici realizzati nella seconda metà del Novecento con telaio in calcestruzzo armato e tamponature in blocchi di laterizio, ora demoliti. Queste strutture, non interessate dalla frana, presentavano danni estesi a tamponature e pareti divisorie in muratura (Figura 13b), e crisi per taglio di nodi e pilastri imputabili al mancato rispetto della gerarchia delle resistenze, all'inadeguatezza delle armature trasversali e all'interazione con i puntoni diagonali formati nelle tamponature (Figura 13c, d). A causa della poca attenzione per i dettagli costruttivi, l'ancoraggio nei nodi delle barre longitudinali delle travi e la giunzione per sovrapposizione delle armature dei pilastri sono risultati di scarsa efficacia (Figura 13d).



Figura 13
Pescara del Tronto dopo la scossa del 24 agosto: (a) frana e devastazione del centro abitato; (b) danni alle tamponature di un edificio in c.a.; (c) interazione fra tamponature e pilastri in c.a.; (d) crisi a taglio di un pilastro e di un nodo d'angolo in c.a.

5. Visso, Ussita e Castelsantangelo Sul Nera

Fortemente danneggiati sono stati anche i comuni di Visso, Ussita e Castelsantangelo sul Nera, in provincia di Macerata, localizzati a pochi chilometri dall'epicentro dell'evento sismico del 26 ottobre. I tre paesi sono stati oggetto di numerosi crolli e, tra gli edifici ordinari maggiormente colpiti, una buona percentuale riguarda edifici in muratura di vecchia costruzione.

La Figura 14 riporta alcune immagini di danni ad edifici in muratura del centro storico di Visso, ove numerosi sono stati i casi di rotazione fuori piano di porzioni sommitali di facciate, rispetto ad assi in prevalenza orizzontali, localizzati in corrispondenza dei solai dei piani superiori. Molto frequenti sono stati anche i casi di espulsione della cortina esterna di

pareti in pietra a paramenti scollegati, che, in alcune situazioni, hanno rivelato l'utilizzo inappropriato del laterizio per locali aggiustamenti in facciata (Figura 14b).

La Figura 15 mostra, invece, lo stato di danno a seguito dell'evento sismico del 30 ottobre di due edifici multipiano con telai in calcestruzzo armato. Entrambi caratterizzati da un'elevata irregolarità in pianta e in elevazione, sono stati oggetto della formazione di un meccanismo di piano debole, con rottura in sommità di alcuni pilastri al piano terra. L'attivazione dei meccanismi, soprattutto nei piani inferiori, è tipica di edifici dotati di forti tamponature e tramezzature a tutti i piani, ad eccezione del primo.

La Figura 16 mostra l'evoluzione del danno subito dalla scuola materna "Pietro Capuzi" di Visso, dopo gli eventi del 24 agosto e del 26 ottobre. L'edificio, costituito da una struttura in muratura portante in blocchi di pietra a spacco, si sviluppa su quattro livelli, di cui tre fuori terra, ed è dotato di una copertura lignea a padiglione. La struttura ha subito l'effetto degli eventi sismici del 24 agosto e del 26 ottobre, accusando una PGA di 0.33 g e 0.48 g rispettivamente. L'evento di ottobre ha determinato il ribaltamento del cantonale e di porzioni delle due pareti ortogonali al piano superiore.

Figura 14

Esempi di danni osservati dopo l'evento sismico del 30 ottobre ad edifici in muratura del centro storico di Visso.



Figura 15

Formazione di piano debole di edifici intelaati in calcestruzzo armato con tamponature nel comune di Visso. Le foto sono state scattate dopo l'evento sismico del 30 ottobre.



Figura 16

Stato di danno della scuola elementare "Pietro Capuzi" dopo gli eventi del 24 agosto e del 26 ottobre.



Danni severi sono stati osservati anche nel comune di Ussita, prevalentemente costituito da edifici in muratura della medesima tipologia muraria riscontrata a Visso. A titolo di esempio, si riportano in Figura 17 alcune immagini di edifici in muratura danneggiati per taglio, con tipica fessurazione a croce di S. Andrea.



Figura 17
Quadro fessurativo esibito da edifici in muratura di Ussita e frazioni dopo il sisma del 30 ottobre.

Altrettanto significativi sono stati i danni riportati a Castelsantangelo sul Nera, molto vicino all'epicentro del terremoto del 26 ottobre. La Figura 18 mostra alcune immagini tratte dalle vie del paese.



Figura 18
Esempi di danno ad edifici in muratura di Castelsantangelo sul Nera (maggio 2017).

6. Camerino (MC) e Tolentino (MC)

Un altro centro fortemente danneggiato è il comune di Camerino (MC) che è stato soggetto a PGA stimate di 0.06 g durante il sisma del 24 agosto 2016, 0.15 g il 26 ottobre, 0.18 g il 30 ottobre e 0.02 g il 18 gennaio 2017. Il nucleo storico della città, disposto sulla sommità di un colle, conserva ancora l'impianto urbanistico di origine medievale, circondato da fortificazioni risalenti al XIV secolo. Il centro della città è caratterizzato da aggregati di edifici, realizzati sia in muratura di mattoni sia in muratura mista di pietra e laterizio, quest'ultima con tessitura irregolare e a più paramenti spesso mal collegati tra loro. I palazzi di maggior pregio storico-architettonico sono in genere di impianto rinascimentale con successive modifiche spesso ottocentesche. Inoltre, è da notare la presenza diffusa di interventi di consolidamento (per esempio, catene metalliche disposte a livello dei solai) anche recenti, realizzati dopo il terremoto di Umbra e Marche del 1997.

A seguito delle scosse del 24 agosto 2016, la città di Camerino ha riportato alcuni danni che hanno determinato la chiusura

per inagibilità di tutte le principali chiese e di alcuni edifici privati. Collassi locali e seri danneggiamenti a quasi tutti gli edifici del centro storico e di alcuni quartieri periferici sono stati causati, poi, dagli eventi sismici del 26 e 30 ottobre 2016, che hanno portato l'estensione della "zona rossa" a tutto il centro storico.

Sopralluoghi eseguiti in seguito agli eventi di gennaio 2017 fino al luglio 2017 hanno permesso di valutare la risposta sia di aggregati di edifici, sia di casi specifici, in particolare palazzi storici che sono stati esaminati anche all'interno. I quadri fessurativi mostrano livelli di danno da lieve a significativo, a seconda della qualità muraria e della configurazione degli edifici, dovuti sia alla risposta nel piano delle pareti, sia all'attivazione di meccanismi di ribaltamento fuori piano.

Gli edifici del centro storico, in particolare le unità strutturali alle estremità degli aggregati con sviluppo lineare o in posizione d'angolo nell'isolato di appartenenza, sono stati soggetti a meccanismi di ribaltamento fuori dal piano, che in alcuni casi hanno portato anche al collasso di porzioni di struttura significative. I meccanismi più ricorrenti, dovuti non solo alla posizione degli edifici nell'aggregato ma anche alla scarsità di collegamenti tra diaframmi e murature perimetrali o all'assenza di interventi di miglioramento delle connessioni, riguardano il ribaltamento dei cantonali e delle angolate o il ribaltamento composto di cunei diagonali coinvolgente più piani, come mostrato in Figura 19.

Figura 19
Meccanismi di ribaltamento fuori piano: (a) e (b) cuneo diagonale coinvolgente più piani, (c) angolata.



Nel caso di edifici in muratura di pietra con tessitura irregolare a più paramenti, oltre a danni locali dovuti al distacco del paramento esterno causato dalla scarsa qualità dei materiali, sono stati rilevati casi di ribaltamento semplice di parete a uno o più piani (Figura 20).

Figura 20
Meccanismi di ribaltamento fuori piano: (a) (b) e (c) collassi dovuti al ribaltamento di parete, (d) ed (e) fessure verticali identificano il meccanismo di ribaltamento per tutta l'altezza dell'edificio.



Per quanto concerne il comportamento delle pareti nel loro piano, esaminando le strutture principalmente dall'esterno, nel caso di edifici con buona qualità, i danni interessano per la maggior parte le fasce murarie, spesso a tutti i piani, e talvolta i maschi, più frequentemente del piano terra, come mostrato in Figura 21.



Figura 21
Risposta nel piano di facciate.



Figura 22
Danni alle fasce murarie.

I danni alle fasce murarie sono dovuti sia a rotture per taglio che per pressoflessione, come mostrato in Figura 22. In caso di edifici intonacati, si nota inoltre il distacco di porzioni di intonaco in corrispondenza delle aree fessurate.

Per quanto riguarda i maschi murari, a seconda delle caratteristiche della muratura e delle proporzioni geometriche, si sono rilevati quadri fessurativi tipici di rotture per taglio diagonale e per pressoflessione (Figura 23).

Figura 23
Danni ai maschi murari: (a), (b) e (c) rottura per taglio diagonale, (d) ed (e) fessure orizzontali alle estremità dei maschi dovute al comportamento a pressoflessione.



A causa dello scuotimento prodotto dagli eventi sismici, l'interazione tra unità strutturali adiacenti in un aggregato edilizio ha determinato lesioni che dipendono dalla tipologia di connessione tra i diversi edifici e dalle possibili variazioni in altezza delle facciate. Durante i sopralluoghi, sono state rilevate infatti fessure verticali continue apertesi in corrispondenza dei giunti tra facciate, indicative della scarsità di connessioni trasversali (Figura 24). Nel caso di edifici adiacenti con facciate complanari ma di altezza differente il quadro fessurativo è tipico dei casi di martellamento, come è visibile in Figura 25.

Figura 24
Fessure verticali in corrispondenza dei giunti di connessione tra edifici adiacenti.



Come detto in precedenza, danni consistenti sono stati rilevati non solo nel centro storico di Camerino, ma anche nei quartieri periferici. Danneggiamenti alle tamponature in laterizio sono stati rilevati in edifici residenziali costruiti in telai in c.a., dovuti sia alla risposta nel piano e alla possibile interazione con il telaio adiacente (Figura 26), sia al ribaltamento di uno o più paramenti fuori dal proprio piano (Figura 27).

Tra gli edifici lesionati dagli eventi sismici e ispezionati anche all'interno, si è scelto di riportare il caso di Palazzo Riccioni, sede degli uffici postali al piano terra e residenze ai livelli superiori (Figura 28). L'edificio, costituito da 3 piani fuori terra, pianta regolare e risalente al XV secolo, è in muratura portante non armata con tessitura non regolare (mattoni e pietre



Figura 25
Danni dovuti al martellamento tra edifici adiacenti con variazioni in altezza.



Figura 26
Risposta nel piano delle tamponature su strutture con telaio in c.a. a Camerino (in basso).



Figura 27
Danni dovuti al ribaltamento fuori dal piano di uno o più paramenti delle tamponature.



sbozzate), con alcune aree interessate dalla presenza di catene. Nel sopralluogo condotto dopo gli eventi di gennaio 2017, l'edificio presentava gravi danni, visibili dall'esterno, alla maggior parte dei maschi e delle fasce. Alcune di queste lesioni sono riconducibili all'attivazione di meccanismi di ribaltamento fuori piano delle pareti e dei cantonali. Si sono inoltre rilevati distacchi parziali di porzioni murarie, come riportato nella Figura 28.

Figura 28
Palazzo Riccioni
(Camerino, MC): alcuni esempi del significativo stato di danneggiamento riscontrato dopo le scosse di gennaio.



Alcuni centri abitati sono stati oggetto di sopralluoghi ripetuti a seguito dei vari eventi sismici, che hanno permesso di valutare l'evoluzione del danno e il suo aggravamento. È questo il caso del comune di Tolentino (MC), che è stato soggetto a valori di PGA stimata di 0.09 g durante il sisma del 24 agosto 2016, 0.10 g il 30 ottobre 2016 e 0.02 g il 18 gennaio 2017. A titolo di esempio di evoluzione del danno, si è scelto di documentare la situazione riscontrata in uno dei palazzi storici del centro, Palazzo Parisani-Bezzi (Figura 29). L'edificio, situato in pianura, è costituito da 3 piani fuori terra senza interrato (superficie media di piano di circa 600 m²). La costruzione è in muratura con tessitura regolare (mattoni), con alcune aree interessate dalla presenza di catene e cordoli; si è rilevata anche la presenza di pilastri isolati in muratura al piano terreno. Gli orizzontamenti sono costituiti da travi in legno con soletta deformabile e la copertura risulta essere non spingente leggera.

A seguito del sopralluogo condotto dopo gli eventi di ottobre, tutto l'edificio è risultato inagibile a causa di danni estesi alla maggior parte della struttura verticale (maschi e fasce). Anche in questo caso, queste fessurazioni sono in parte associate all'attivazione di meccanismi di ribaltamento fuori piano delle pareti. Lesioni di modesta entità si sono rilevate anche in corrispondenza delle scale e nei punti di innesto delle travi della copertura e dei solai. Un ulteriore sopralluogo, avvenuto dopo le scosse di gennaio, ha evidenziato come l'esecuzione di buona parte delle opere provvisorie suggerite a seguito del danno precedente (cerchiature, fasciature...) abbia evitato un ulteriore eccessivo aggravamento del quadro fessurativo, come testimoniato dalle immagini riportate nella Figura 29.



Figura 29
Palazzo Parisani-Bezzi (Tolentino, MC): confronto dei danni alle fasce e maschi murari di pareti esterne ed interne dopo le scosse di ottobre 2016 (a e c) e di gennaio 2017 (b e d).

7. Norcia

La storia della città di Norcia, sita a cavallo fra la Valnerina e i Monti Sibillini, è stata scandita nel corso dei secoli dal susseguirsi di eventi sismici di notevole intensità, che ne hanno progressivamente plasmato il tessuto urbano. Città natale di San Benedetto e sede del monastero e della basilica a lui dedicati, Norcia mantenne a partire dal Basso Medioevo fino all'Unità d'Italia un ruolo non marginale nell'ambito dello Stato Pontificio. Data la sua importanza, la città fu oggetto di una prima legge in materia di costruzioni antisismiche, in seguito al devastante terremoto del 1859. Pochi mesi prima dell'annessione al Regno d'Italia, infatti, venne emanata dall'amministrazione pontificia una norma che limitava l'altezza degli edifici ad un massimo di due piani, imponeva l'impiego di materiali adeguati e il rispetto di proporzioni geometriche, richiedeva l'approvazione del progetto e la vigilanza durante la costruzione, e impediva di costruire su terreni ritenuti non idonei. Tuttavia, a causa della complessa situazione politica e dell'opposizione dei proprietari e delle autorità locali, la nuova legge non fu mai applicata nella sua interezza. Bisogna poi aspettare più di un secolo, fino ai terremoti del 1979 e del 1997, perché si diffonda abbastanza capillarmente la pratica del consolidamento sismico degli edifici.

I criteri introdotti nell'ottocento e i rinforzi eseguiti di recente hanno contribuito a limitare l'entità dei danni dovuti alla sequenza sismica del 2016-2017. Durante i terremoti del 24 agosto, 26 ottobre e 30 ottobre 2016, a Norcia si sono registrate PGA in direzione orizzontale pari a 0.37 g, 0.37 g e 0.49 g, mentre i valori di PGA registrata in direzione verticale sono stati pari a 0.22 g, 0.21 g e 0.37 g (stazione NRC della Rete Accelerometrica Nazionale). La prima scossa ha indotto lesioni

contenute agli edifici residenziali in muratura del centro storico; danni leggermente maggiori sono stati invece rilevati sulle chiese e sulle palazzine della periferia della città. Il bilancio si è significativamente aggravato dopo la scossa del 30 ottobre 2016, avvertita con maggiore intensità, che ha provocato il collasso di numerose chiese e l'aggravamento delle condizioni degli edifici del centro, della periferia e delle frazioni. Dopo circa due mesi dalla scossa del 30 ottobre, una porzione del centro storico ricca di attività commerciali era nuovamente accessibile.

Il centro storico è principalmente costituito da aggregati di edifici in muratura di pietra naturale a due o più paramenti, con diverso grado di regolarità, ammassamento e qualità dei materiali a seconda del periodo storico di costruzione. Abbastanza diffusi sono l'aumento graduale di spessore dei muri al piano terra e l'impiego di contrafforti e cantonali in blocchi squadri di dimensioni maggiori (Figura 30a). Non mancano sopraelevazioni o espansioni successive. Gli interventi di consolidamento più comuni consistono in iniezioni di malta, intonaci armati, cordoli o elementi verticali di confinamento in calcestruzzo armato, connessioni pareti-solai, e catene metalliche (Figura 30b). La qualità della muratura generalmente buona, combinata con l'efficacia dei rinforzi, può aver favorito una risposta globale degli edifici, riducendo l'incidenza dei collassi locali dei paramenti murari, dei meccanismi di ribaltamento fuori piano, e dei crolli rispetto alla situazione riscontrata in altre località. Si sono invece osservate con maggiore frequenza lesioni dovute alla deformazione nel piano delle pareti (Figura 30c), all'interazione fra unità strutturali adiacenti (Figura 30d) e, in alcuni casi, a cedimenti delle fondazioni, indotti da infiltrazioni d'acqua o perdite delle condutture (Figura 30e). I collassi nel centro storico hanno principalmente coinvolto le chiese, fra le quali la basilica di San Benedetto (Figura 30f); le cause di questo comportamento sono molteplici, ma fra esse si annoverano la maggiore vulnerabilità intrinseca di queste architetture e la minore efficacia degli interventi di rinforzo consentiti su tali manufatti.

Figura 30
Centro storico di Norcia al termine della sequenza sismica: (a) contrafforti e cantonali di edifici in muratura; (b) intonaco armato, capi-chiave di catene metalliche e collegamenti pareti-solai; (c) lesioni a taglio nel piano delle pareti in muratura; (d) lesioni da interazione fra unità di un aggregato; (e) lesioni da cedimento in fondazione; (f) basilica di S. Benedetto collassata.



Condizioni critiche sono state rilevate anche sugli edifici della periferia della città, in particolare nella zona residenziale a nord del centro e in quella produttiva a sud. Fino agli anni settanta del secolo scorso sono stati realizzati edifici residenziali in muratura portante di pietra, con blocchi abbastanza regolari disposti solitamente su due paramenti, ma anche in muratura di laterizio, di tufo o mista. In alcuni casi si è riscontrata la presenza di intonaco armato solo su un lato delle pareti. Queste strutture hanno subito danni di entità variabile, inclusi meccanismi di taglio nel piano (Figura 31a), distacco dei paramenti e ribaltamento fuori piano delle facciate (Figura 31b), e meccanismi di piano debole (Figura 31c e d). I suddetti meccanismi hanno talvolta provocato il collasso parziale o totale degli edifici. Una possibile causa della vulnerabilità di queste strutture può essere imputabile all'assenza, alla discontinuità o al debole collegamento dei rinforzi volti ad aumentare la resistenza dei pannelli murari. La mancanza di catene metalliche può aver invece consentito il ribaltamento fuori piano di alcune pareti, soprattutto se non direttamente caricate dagli orizzontamenti, nonostante la realizzazione di cordoli e intonaci armati.



Figura 31
Edifici in muratura nella periferia di Norcia al termine della sequenza sismica:
(a) lesioni a taglio nel piano delle pareti e collasso fuori piano del timpano;
(b) collasso fuori piano di una parete con intonaco armato interno e cordoli;
(c) collasso per piano debole al semi-interrato di un edificio con intonaco armato esterno solo ai piani superiori;
(d) collasso per piano debole del primo piano.

Accanto alle strutture in muratura portante, nella periferia di Norcia si trovano edifici realizzati nella seconda metà del novecento con telaio in calcestruzzo armato e tamponature a uno o due paramenti in blocchi di laterizio o tufo. In molti casi si sono registrati danni non strutturali, come la fessurazione nel piano o il collasso fuori piano dei paramenti murari di tamponature e tramezzi (Figura 32a). Tuttavia, in più di un edificio si sono osservate crisi per taglio di nodi e pilastri, dovute all'inadeguatezza delle armature trasversali e all'interazione con le tamponature (Figura 32b). La formazione di puntoni diagonali nelle murature non strutturali ha infatti introdotto forze di taglio concentrate sui pilastri e sui nodi, mentre la presenza di finestre a nastro ha provocato l'effetto di pilastro tozzo (Figura 32c). A causa di dettagli costruttivi insufficienti e delle esigue armature trasversali, tipiche del periodo di costruzione, l'ancoraggio delle barre longitudinali delle travi nei nodi d'estremità è risultata spesso inefficace (Figura 32b), così come la giunzione per sovrapposizione delle armature dei pilastri. Si sono instaurati meccanismi di piano debole anche in strutture a telaio tamponato (Figura 32c), che talvolta ne hanno provocato il collasso (Figura 32d).

Tra le frazioni del Comune di Norcia, quella di Castelluccio (10 km a nord-est del centro) è stata visitata dopo il terremoto del 24 agosto 2016; a causa dell'interruzione dei collegamenti stradali non è stato possibile accedervi dopo la violenta scossa del 30 ottobre. Gli edifici di Castelluccio sono realizzati principalmente in muratura di pietra naturale a più paramenti dalla tessitura irregolare, con o senza nucleo interno; l'ammorsamento fra i paramenti non è sempre garantito e l'impiego di cantonali non è molto diffuso. Si trovano elementi lapidei più o meno squadrati, talvolta molto sottili, e malta di dubbia qualità; non mancano inserti o sopraelevazioni in blocchi o mattoni di tufo e laterizio. Confrontando le foto scattate nel mese di settembre 2016 (Figura 33a) con le immagini satellitari di Google Maps successive a ottobre 2016 (Figura 33b), si evince un notevole peggioramento del quadro di danno a Castelluccio, caratterizzato dal collasso di numerosi edifici in parte già indeboliti dalle scosse precedenti. Alcune delle strutture superstiti erano state interessate da recenti interventi di consolidamento, fra i quali la diffusa ristilatura dei giunti e anche ricostruzioni almeno parziali.

Figura 32

Edifici a telaio in c.a. tamponato nella periferia di Norcia al termine della sequenza sismica: (a) danni alle tamponature di un telaio in c.a.; (b) crisi a taglio di pilastri e nodi in c.a. e perdita di ancoraggio delle barre longitudinali; (c) meccanismo di piano debole con crisi a taglio per pilastro tozzo dovuto alle finestre a nastro; (d) collasso per piano debole del piano terra.



Anche la frazione di San Pellegrino, a soli 6 km a sud-est del centro di Norcia, è stata interessata da significativi danni agli edifici (Figura 33c). Vi si trovano strutture in muratura di diverse età, talvolta sopraelevate o espansive in epoche successive, costruite con materiali e dettagli di qualità variabili: pietra naturale a tessitura irregolare con paramenti non sempre ben ammorsati, blocchi di tufo e mattoni o blocchi di laterizio. Sono presenti anche edifici intelaiati in calcestruzzo armato con

Figura 33

Frazioni di Norcia:
 (a) Castelluccio dopo la scossa del 24 agosto;
 (b) Castelluccio al termine della sequenza sismica (www.google.it/maps);
 (c) San Pellegrino al termine della sequenza sismica;
 (d) lesioni a taglio nel piano e conseguente collasso fuori piano di maschi murari e tamponature a San Pellegrino.



tamponature in muratura. I meccanismi di danno e collasso sono riconducibili a quelli osservati nel capoluogo (Figura 33d): effetti di martellamento fra unità adiacenti negli aggregati, meccanismi a taglio nel piano delle pareti, distacco e ribaltamento fuori piano dei paramenti, meccanismi di piano debole, e fessurazione o ribaltamento delle tamponature dei telai.

8. Conclusioni

L'articolo presenta una descrizione critica dei danni osservati in alcuni dei centri maggiormente colpiti dalla sequenza sismica che ha interessato l'Italia centrale nel 2016-2017, con particolare riferimento alle strutture in muratura e agli edifici in calcestruzzo armato con tamponature in muratura. Si mettono in rilievo le caratteristiche architettonico-costruttive degli edifici dei diversi centri, discutendone l'influenza sui quadri di danno riscontrati.

L'area colpita è molto vasta e include centri con una storia sismica intensa e ricca anche di eventi distruttivi in epoca recente. Questo ha anche permesso di osservare l'efficacia relativa di alcune tecniche di intervento impiegate negli ultimi decenni, così come di evidenziarne o confermarne i limiti, anche in funzione delle caratteristiche costruttive degli edifici in cui sono state applicate.

In alcune località, la disponibilità di rilievi multipli a seguito dei diversi eventi principali ha consentito di osservare l'aggravarsi del danno dovuto alle scosse successive, che in molti casi ha portato al collasso di edifici precedentemente danneggiati.

Bibliografia

- Borzi B., Faravelli M., Polli D.A. (2018) - Central Italy sequence: simulated damage scenario for the main shocks of 2016, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Bracchi S., da Porto F., Galasco A., Graziotti F., Liberatore D., Liberatore L., Magenes G., Mandirola M., Manzini C.F., Masiani R., Morandi P., Palmieri M., Penna A., Rosti A., Rota M., Sorrentino L., Tondelli M. (2012) - Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica del 2012 in Emilia, *Progettazione Sismica*, No. 03, pp. 141-161.
- Di Ludovico M., Digrisolo A., Moroni C., Graziotti F., Manfredi V., Prota A., Dolce M., Manfredi G. (2018) - Remarks on damage and response of school buildings during the Central Italy earthquake sequence, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Di Sarno L., da Porto F., Guerrini G., Calvi P., Camata G., Prota A. (2018) - Seismic performance of bridges during the 2016 Central Italy earthquakes, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Fragomeli A., Galasco A., Graziotti F., Guerrini G., Kallioras S., Magenes G., Malomo D., Mandirola M., Manzini C.F., Marchesi B., Milanese R.R., Morandi P., Penna A., Rossi A., Rosti A., Rota M., Senaldi I.E., Tomassetti U., Cattari S., da Porto F., Sorrentino L. (2017) - Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016. Parte 1: Quadro generale, *Progettazione Sismica*, Vol. 8, No. 2.
- Iervolino I., Baltzopoulos G., Chioccarelli E., Suzuki A. (2018) - Seismic actions on structures in the near-source region of the 2016 central Italy sequence, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Lanzo G., Tommasi P., Ausilio E., Aversa S., Bozzoni F., Cairo R., D'Onofrio A., Durante M.G., Foti S., Giallini S., Mucciacciaro M., Pagliaroli A., Sica S., Silvestri F., Vessia G., Zimmario P. (2018) - Reconnaissance of Geotechnical Aspects of the 2016 Central Italy Earthquakes, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Luzi L., Pacor F., Puglia R., Lanzano G., Felicetta C., D'Amico M., Michelini A., Faenza L., Lauciani V., Iervolino I., Baltzopoulos G., Chioccarelli E. (2017) - The Central Italy Seismic Sequence between August and December 2016: Analysis of Strong-Motion Observations, *Seismological Research Letters*, Vol. 88, No. 5, pp. 1219-1231.
- Masi A., Chiauzzi L., Santarsiero G., Manfredi V., Biondi S., Spacone E., Del Gaudio C., Ricci P., Manfredi G., Verderame G.M. (2018) - Seismic response of RC buildings during the Mw 6.0 August 24, 2016 Central Italy earthquake: the Amatrice case study, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Mouyianou A., Penna A., Rota M., Graziotti F., Magenes G. (2014) - Implications of cumulated seismic damage on the seismic performance of unreinforced masonry buildings, *Bulletin of the New Zealand Society of Earthquake Engineering*, Vol. 47, No. 2, pp. 157-170.
- Penna A., Morandi P., Rota M., Manzini C.F., da Porto F., Magenes G. (2014) - Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 2255-2273.
- Perrone D., Calvi P.M., Nascimbene R., Fischer E., Magliulo G. (2018) - Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy Earthquake, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Santarsiero G., Di Sarno L., Giovinazzi S., Masi A., Cosenza E., Biondi S. (2018) - Performance of the health care facilities during the 2016-2017 Central Italy seismic sequence, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Sorrentino L., Cattari S., da Porto F., Magenes G., Penna A. (2018) - Seismic Behavior of Ordinary Masonry Buildings During the 2016 Central Italy Earthquakes, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering*.

Gli Autori

Alfredo Fragomeli

Alfredo Fragomeli, nato a Napoli nel 1990 e cresciuto a Roccella Jonica, ha conseguito la laurea in Ingegneria Civile presso l'Università della Calabria, specializzandosi in ambito strutturale presso l'Università degli studi di Pavia. Comincia la sua attività di ricerca nell'ambito della valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture in muratura presso l'IST di Lisbona, proseguendo presso Eucentre, con il quale si impegna inoltre come tecnico volontario nelle missioni di sopralluogo per conto della Protezione Civile in seguito agli eventi sismici in centro Italia. Lavora attualmente in ambito strutturale infrastrutturale in azienda leader nel settore.

Alessandro Galasco

Alessandro Galasco si è laureato con lode all'Università di Genova, dove ha poi conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Strutturale. È autore di un programma di calcolo per le strutture in muratura, chiamato Tremuri, che è stato da subito utilizzato in ambito accademico dove a tutt'oggi è impiegato in varie università italiane e straniere. La versione commerciale del programma, sviluppata successivamente, è molto diffusa a livello professionale in Italia e in altri paesi europei. Dopo il conseguimento del dottorato di ricerca, è stato titolare di assegni di ricerca presso l'Università di Pavia e collabora con la Fondazione Eucentre di Pavia nell'area 'Muratura e Monumenti'. È autore e coautore di pubblicazioni scientifiche e di testi dedicati al mondo professionale. Esercita inoltre la professione sia in qualità di consulente sia di progettista.

Francesco Graziotti

Francesco Graziotti è ricercatore di Tecnica delle Costruzioni presso il dipartimento di ingegneria civile ed architettura dell'Università di Pavia. Ha conseguito il Master of Science in ingegneria strutturale presso l'Università di California a San Diego ed il dottorato di ricerca in ingegneria sismica e sismologia presso l'Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia. Dal 2010, anno di inizio del suo dottorato, i suoi studi si sono rivolti all'interpretazione del comportamento sismico di strutture in muratura. In questi anni ha avuto modo di collaborare all'esecuzione di molte prove di laboratorio (statiche e dinamiche) e di mettere a punto modelli numerici per l'interpretazione del comportamento sismico di tali strutture. Sta attualmente collaborando con la fondazione Eucentre nell'ambito di un progetto sulla valutazione della vulnerabilità di costruzioni esistenti nella regione di Groningen (Paesi Bassi) soggette a rischio sismico indotto da estrazione di gas naturale.

Gabriele Guerrini

Gabriele Guerrini è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia, dove collabora anche con la Fondazione Eucentre. Ha conseguito le lauree triennale e magistrale in Ingegneria Civile all'Università di Bologna, per poi specializzarsi con un master e un dottorato di ricerca in Ingegneria Strutturale presso il campus di San Diego dell'Università della California. I suoi interessi di ricerca e professionali riguardano principalmente l'analisi e la progettazione sismica delle strutture mediante approccio "performance-based", con particolare riferimento a: costruzioni in muratura nuove ed esistenti, anche di interesse storico; strutture in cemento armato normale e precompresso; strutture composte acciaio-calcestruzzo; soluzioni a danno contenuto, quali sistemi auto-ricentranti e isolamento sismico; sperimentazione su materiali, componenti e sistemi strutturali; dinamica e analisi non lineare delle strutture.

Stylianos Kallioras

Stylianos Kallioras è nato ad Atene, Grecia, nel 1990 e si è laureato in Ingegneria Civile, indirizzo Strutture, presso l'Università di Patrasso nel 2014. Ha conseguito il Master in Ingegneria Sismica (MEEES) presso la UME Graduate School di Pavia e l'Università di Grenoble Alpes, Francia nel 2016. Attualmente è dottorando di ricerca della UME Graduate School in Ingegneria Sismica e Sismologia (ROSE). I suoi interessi principali riguardano la valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture in muratura mediante prove di laboratorio dinamiche e statiche e modellazione numerica.

Guido Magenes

Guido Magenes si è laureato in Ingegneria Civile presso l'Università di Pavia, ha conseguito un Master of Science presso la University of California San Diego, USA e un Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture, consorzio Politecnico di Milano/Università di Pavia. Attualmente è Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia e Responsabile della sezione Muratura della Fondazione Eucentre. Ha oltre 25 anni di esperienza di ricerca, teorica e sperimentale, nel campo del comportamento statico e sismico di strutture in muratura e in cemento armato e relative tecniche e strategie di rinforzo/riabilitazione. È stato responsabile di numerosi progetti di ricerca finanziati da enti pubblici e da vari soggetti industriali. È autore di oltre 200 pubblicazioni scientifiche e per i suoi contributi nel campo delle strutture in muratura è stato invitato a presentare keynote lectures a diverse conferenze internazionali.

Daniele Malomo

Daniele Malomo nasce il 25/09/1989 a Roma, dove consegue nel 2015, presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", la laurea magistrale in Ingegneria Edile-Architettura U.E. con il massimo dei voti. Elabora una tesi sperimentale sulle strutture voltate in pietra da taglio, in collaborazione con altre realtà accademiche, tra cui il Politecnico di Bari, l'Università di Roma Tre e la Princeton University. Nell'ottobre del 2015 viene ammesso al corso di dottorato in Ingegneria Civile e Architettura, sotto la supervisione del Prof. Andrea Penna. La sua ricerca riguarda la micro-modellazione della muratura, basato su un approccio agli elementi discreti. Nel 2017 svolge attività sul campo per il Sisma Centro Italia per conto di Eucentre, rilevando il danno e la vulnerabilità per più di 80 strutture storiche. Nello stesso anno è Visiting PhD student presso la Cambridge University, con cui collabora attivamente su tematiche inerenti la modellazione di strutture in muratura non armata.

Martina Mandirola

Martina Mandirola, si è laureata, con lode, in Ingegneria Civile, indirizzo Strutture, all'Università degli Studi di Pavia nel 2010. Nel 2014 ha conseguito il Master in Ingegneria Sismica presso la ROSE School di Pavia. Dal 2011 collabora con l'Eucentre dove si occupa, in particolare, di tematiche legate allo sviluppo di modelli semplificati a telaio equivalente per la simulazione numerica della risposta sismica edifici in muratura a singolo e doppio paramento e simulazione di prove sperimentali eseguite sia su componenti strutturali sia su provini di edifici in scala reale (prove dinamiche su tavola vibrante). È stata coinvolta in campagne di rilievo del danno, dell'agibilità e della vulnerabilità degli edifici (soprattutto monumentali e strategici) a seguito degli eventi sismici che hanno colpito l'Emilia Romagna nel maggio-giugno 2012 e il Centro Italia nell'agosto-ottobre 2016 e gennaio 2017. È autrice/coautrice di diverse pubblicazioni scientifiche.

Carlo Filippo Manzini

Carlo Filippo Manzini svolge da oltre 10 anni attività di ricerca nell'ambito della valutazione del comportamento sismico delle strutture in muratura. In particolare, si occupa di modellazione numerica e di sviluppo di software per la valutazione della risposta sismica di edifici in

muratura (è co-autore del codice SAM II, motore di calcolo del software commerciale ANDILWall) e per l'analisi e la verifica assistita, ai sensi delle norme nazionali ed europee, di elementi strutturali e non strutturali in muratura e di applicativi finalizzati alla elaborazione dati ed alla restituzione grafica di prove sperimentali pseudo-statiche e dinamiche. È inoltre coinvolto nell'attività didattica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia, svolgendo seminari didattici ed assistenza alla didattica nell'ambito del Corso di "Tecnica delle Costruzioni". Ha inoltre partecipato alle attività emergenziali di valutazione post-sisma a seguito dei terremoti dell'Aquila (2009) e dell'Emilia (2012).

Beatrice Marchesi

Beatrice Marchesi è nata a Broni (PV) nel 1991 e si è laureata in Ingegneria Civile, indirizzo Strutture, presso l'Università degli Studi di Pavia nel 2016. Attualmente collabora come ricercatrice presso la Fondazione Eucentre di Pavia. Le sue principali mansioni riguardano la progettazione di prove di laboratorio dinamiche e statiche su edifici residenziali e componenti in muratura del costruito olandese e la restituzione ed elaborazione dei dati sperimentali raccolti. Ha partecipato alle attività di rilievo del danno ad edifici di culto colpiti dalla sequenza sismica del 2016-2017 dell'Italia centrale sotto il coordinamento congiunto del Dipartimento della Protezione Civile, del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo e del consorzio Reluis.

Riccardo Raimondo Milanese

Riccardo Raimondo Milanese è assegnista di ricerca presso il DICAR dell'Università di Pavia, dove svolge soprattutto ricerca sperimentale e numerica sul comportamento sismico delle tamponature. Ha conseguito il dottorato di ricerca in Understanding and Managing the Extremes presso lo IUSS di Pavia occupandosi della risposta sismica delle tamponature, con particolare attenzione all'ideazione e allo sviluppo di un tamponamento antisismico a giunti scorrevoli, per il quale è stato ottenuto un brevetto. Iscritto all'Albo dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia.

Paolo Morandi

Paolo Morandi è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura dell'Università di Pavia. Ha ottenuto il dottorato di ricerca (2006) ed il Master di II livello (2003) in Ingegneria sismica presso la ROSE School di Pavia, dopo aver conseguito la Laurea in ingegneria civile (2001) presso l'Università di Pavia. Dal 2003 collabora con la Fondazione Eucentre. I suoi principali interessi professionali e di ricerca scientifica riguardano lo studio numerico e sperimentale della risposta sismica di edifici in muratura portante ed in c.a. con tamponature. Coinvolto nella redazione di vari documenti normativi al livello nazionale e internazionale (attualmente è delegato italiano del WG2 del CEN TC250/SC6 EN 1996-3), è autore/coautore di più di 60 pubblicazioni scientifiche in ambito nazionale ed internazionale nel campo dell'ingegneria sismica ed è coautore del solutore SAMII, software per l'analisi non lineare e la verifica sismica di edifici in muratura e c.a.

Andrea Penna

Andrea Penna, laureato in Ingegneria Civile (Strutture) all'Università di Genova e Dottore di Ricerca in Ingegneria Sismica al Politecnico di Milano, è stato assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Genova prima di divenire Ricercatore alla Fondazione Eucentre. Attualmente è Professore Associato di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia. I suoi interessi di ricerca si concentrano principalmente sulla risposta sismica delle strutture in muratura nuove ed esistenti (con e senza interventi di consolidamento), dei monumenti e dei centri storici, spaziando dalla modellazione numerica (coautore del programma TREMURI) alla ricerca sperimentale. È stato coinvolto in varie missioni sul campo a seguito di eventi sismici in Italia e all'estero. È autore di oltre 150 pubblicazioni scientifiche ed è stato keynote speaker in alcune conferenze internazionali.

Andrea Rossi

Andrea Rossi, nato nel 1987 a Reggio Emilia, è studente di dottorato della UME Graduate School presso lo IUSS di Pavia, dopo aver già conseguito il Master universitario di II livello in Ingegneria Sismica (ROSE) presso la stessa sede nel 2015. Ha ottenuto a pieni voti la laurea magistrale in Ingegneria Civile presso l'Università degli Studi di Parma nel 2012. I suoi interessi riguardano principalmente lo studio degli edifici in muratura, sia portante che di tamponamento, per valutarne la risposta e la loro vulnerabilità nei confronti dell'azione sismica. Ha seguito diverse prove in laboratorio per la caratterizzazione meccanica della muratura ed anche di tipo dinamico su tavola vibrante su edifici in muratura portante non armata in scala reale. Attualmente è coinvolto nella modellazione numerica di strutture a telaio in cemento armato con pareti di tamponamento in muratura.

Annalisa Rosti

Annalisa Rosti si è laureata con lode nel 2012 in ingegneria civile (indirizzo strutture) presso l'Università di Pavia. Nel 2014 ha conseguito il diploma di Master in ingegneria sismica presso la scuola di Comprensione e Gestione delle Situazioni Estreme (UMESchool, IUSS Pavia). Ha conseguito il titolo di dottore di ricerca in ingegneria sismica nel dicembre 2016 presso l'Istituto di Studi Superiori (IUSS) di Pavia. Attualmente collabora con il settore di ricerca "Strutture in muratura" presso Fondazione Eucentre.

Maria Rota

Maria Rota si è laureata con lode in Ingegneria Civile (indirizzo Strutture) presso l'Università degli Studi di Pavia nel 2002. Nel 2004 ha conseguito un master di II livello in Ingegneria Sismica presso l'Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia (IUSS) e nel 2007 ha conseguito il dottorato in Ingegneria Sismica presso lo IUSS Pavia. È stata quindi assegnista di ricerca dell'Università di Pavia (Dipartimento di Meccanica Strutturale) e attualmente è ricercatrice presso la Fondazione Eucentre (dal 2011), sezione strutture in muratura. La sua ricerca riguarda principalmente la valutazione della risposta sismica e dell'affidabilità di strutture in muratura esistenti tenendo conto delle diverse incertezze, la previsione della vulnerabilità sismica del costruito a partire da dati empirici e da modelli analitici e la definizione dell'input sismico per analisi dinamiche non lineari. È autrice di oltre 70 pubblicazioni scientifiche.

Ilaria Senaldi

Ilaria Senaldi si è laureata nel 2007 in Ingegneria Edile-Architettura e nel 2012 ha conseguito il dottorato di Ricerca (PhD) in Ingegneria Sismica presso l'Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia (IUSS). Attualmente è assegnista di ricerca Post-Doc presso il DiCAR dell'Università degli Studi di Pavia. La sua attività di ricerca è rivolta allo studio della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura e alla valutazione dell'influenza ed efficacia di interventi di consolidamento. Ha partecipato a diverse campagne sperimentali con prove su tavola vibrante di edifici in muratura e si è occupata dell'analisi e interpretazione dei dati acquisiti riguardante le prove dinamiche. Un ulteriore ambito di ricerca riguarda lo studio della risposta sismica di aggregati edilizi esistenti in muratura. Ha preso parte a rilievi di agibilità in seguito ai terremoti di L'Aquila del 2009 e Christchurch (NZ) del 2010-2011.

Umberto Tomassetti

Umberto Tomassetti è un dottorando presso il dipartimento di ingegneria civile ed architettura dell'Università di Pavia. Ha conseguito il Master of Science in ingegneria sismica e sismologia presso lo IUSS di Pavia e la laurea magistrale in ingegneria edile-architettura presso l'Università degli studi di Pavia.

Il suo ambito di ricerca è volto all'interpretazione del comportamento sismico di strutture in muratura. In questi anni ha avuto modo di collaborare all'esecuzione di molte prove di laboratorio (statiche e dinamiche) presso il laboratorio Eucentre e di mettere a punto modelli numerici per l'interpretazione del comportamento sismico di tali strutture.

Serena Cattari

Serena Cattari, nata a Genova il 28 agosto 1978, Dottore di Ricerca in Ingegneria Strutturale e Geotecnica (Università di Genova, 2007), dal 2011 è Ricercatore a Tempo Determinato presso la Scuola Politecnica dell'Università di Genova (afferenza Dip. DICCA).

L'attività di ricerca è rivolta alle seguenti principali tematiche: ingegneria sismica; valutazione della sicurezza sismica secondo approcci prestazionali e affidabilistici; modellazione di costruzioni esistenti in muratura e miste muratura-c.a., ordinarie e monumentali; analisi di vulnerabilità sismica a larga scala per costruzioni esistenti.

È autrice di oltre 100 pubblicazioni scientifiche e dal 2006 collabora allo sviluppo del codice di calcolo Tremuri. Ha partecipato a numerosi progetti nazionali ed internazionali e dal 2003 al rilievo dei danni sismici in occasione dei recenti terremoti italiani. Ha partecipato alla redazione del documento CNR DT 212 per la valutazione affidabilistica della sicurezza sismica.

Francesca da Porto

Laureata in Ingegneria edile a Padova nel 2000 e dottore di ricerca nel 2005 presso l'Università di Trento, ha svolto attività di ricerca anche presso l'Universitat Politècnica de Catalunya, lo U.S. Department of Interior e lo Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Lubiana. È professoressa associata di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università di Padova, dove svolge anche il ruolo di Prettore all'Edilizia. Autrice di circa 200 articoli scientifici, ha coordinato progetti europei ed è titolare di finanziamenti pubblici e privati. Ha svolto intense attività di supporto alla gestione delle emergenze sismiche, in collaborazione con Protezione Civile, ReLUIS e MIBACT. È revisore scientifico di molte riviste scientifiche e valutatore di diverse agenzie di finanziamento internazionali. È vicepresidente della Commissione Ingegneria strutturale - SC 6 dell'UNI, delegato nazionale presso il CEN e membro di uno dei project team per la riscrittura degli eurocodici.

Luigi Sorrentino

Luigi Sorrentino ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria delle Strutture presso Sapienza, dove attualmente è Ricercatore di Tecnica delle Costruzioni. Ha preso parte ai progetti di ricerca del consorzio ReLUIS (Rete Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica) sin dalla sua costituzione. Ha partecipato ha scambi scientifici con istituzioni accademiche e di ricerca Europa, Asia, Oceania, America. Gli interessi di ricerca riguardano primariamente la prestazione sismica delle costruzioni in muratura. È revisore delle principali riviste di ingegneria sismica e ingegneria strutturale. È membro del Gruppo di Lavoro 1, costruzioni in muratura, per la revisione dell'Eurocodice 8 – Costruzioni in zona sismica.