

Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 - Parte 1: Quadro generale

Performance of masonry buildings in the seismic sequence of Central Italy 2016 - Part 1: Overview

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. Milanese², 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

La sequenza sismica del 2016-2017 dell'Italia centrale ha avuto inizio il 24 agosto 2016, seguita da altri tre eventi principali, l'ultimo dei quali avvenuto il 18 gennaio 2017. Questa sequenza ha provocato danni significativi in una porzione molto vasta dell'Italia centrale, a cavallo tra le quattro regioni di Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo. Nella zona colpita, le strutture in muratura costituiscono una porzione significativa del costruito esistente. Questo articolo ha l'obiettivo di descrivere e commentare il comportamento sismico degli edifici residenziali in muratura ordinaria, partendo da un'analisi critica dei danni osservati in seguito agli eventi della sequenza sismica. Nell'area interessata, che è caratterizzata da una storia sismica densa di eventi di elevata intensità, il costruito esistente è caratterizzato prevalentemente da edifici in muratura di pietra con orizzontamenti lignei e/o volte. A causa di eventi sismici relativamente frequenti anche nel recente passato (Valnerina 1979, Umbria-Marche 1997, L'Aquila 2009), in diversi edifici si è potuta riscontrare la presenza di interventi di consolidamento e presidi antisismici, che hanno in alcuni casi limitato il danneggiamento. Tuttavia, le proprietà spesso molto scadenti dei materiali utilizzati (malte) e un livello di manutenzione inadeguato di vecchi edifici, spesso non abitati in modo continuativo, hanno determinato un comportamento sismico largamente insoddisfacente in molti siti. Sotto questo aspetto, si è riscontrata anche una sistematica differenza tra i danni subiti da comuni, anche vicini, ma appartenenti a regioni diverse, con una diversa storia. Come in altri eventi recenti, gli edifici moderni in muratura, sia pure in numero limitato nella zona, hanno mostrato danni molto limitati.

Parole chiave: vulnerabilità, progettazione sismica, interventi di consolidamento, muratura di pietra, muratura di mattoni, muratura in blocchi.

Abstract

The seismic sequence of 2016-2017 in central Italy started on the 24th of August 2016. This event was followed by three other main events, the last of which occurred on the 18th of January 2017. This sequence induced severe damage in a very wide area of central Italy, spanning across the four regions of Lazio, Umbria, Marche and Abruzzi. Masonry structures constitute a significant percentage of the building stock in the affected area. This paper aims at describing and commenting the seismic behavior of residential unreinforced masonry buildings, starting from a critical analysis of the damages observed after the seismic events of the sequence. The existing building stock of the area is mainly characterized by stone masonry buildings with wooden floors and/or with vaults. Thanks to the occurrence of relatively frequent seismic events of significant intensity even in the recent past (Valnerina 1979, Umbria-Marche 1997, L'Aquila 2009), the damage in several buildings was limited by the presence of strengthening intervention or aseismic devices. However, in many sites, the seismic behavior was largely unsatisfactory, due to the use of very poor materials (mortar) and due to the inadequate maintenance conditions of old buildings. Along these lines, significant differences could be observed in the damage level occurred in nearby municipalities, belonging to different regions, with a different history. Similarly to what occurred in other recent events, very limited damage was instead observed in case of modern masonry buildings, although they are only few in the affected area.

Keywords: Vulnerability, seismic design, strengthening, stone masonry, brick masonry, block masonry.

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, Italy.

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 Pavia, Padova.

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

1. Introduzione

La sequenza sismica che ha interessato l'Italia centrale nel 2016 ha avuto inizio il 24 agosto, con un terremoto di magnitudo momento M_w 6.0 con epicentro localizzato nel comune di Accumoli. Questo evento è stato seguito da innumerevoli altre scosse, di cui le principali sono avvenute il 26 ottobre in prossimità di Castelsantangelo sul Nera (M_w 5.9), il 30 ottobre vicino a Norcia (M_w 6.5) e il 18 gennaio 2017 in prossimità di Capitignano (M_w 5.5). La Figura 1 riporta le mappe di scuotimento in accelerazione massima del terreno (PGA) prodotte dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://shakemap.rm.ingv.it>) per le quattro scosse di cui sopra, mentre Figura 2 riporta le corrispondenti mappe di scuotimento in intensità strumentale Mercalli Cancani Sieberg (MCS, ottenute applicando le relazioni di conversione di Faenza and Michelini, 2010, 2011).

La sequenza sismica ha prodotto danni consistenti in una zona molto ampia dell'Italia centrale, interessando ben quattro diverse regioni: Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo.

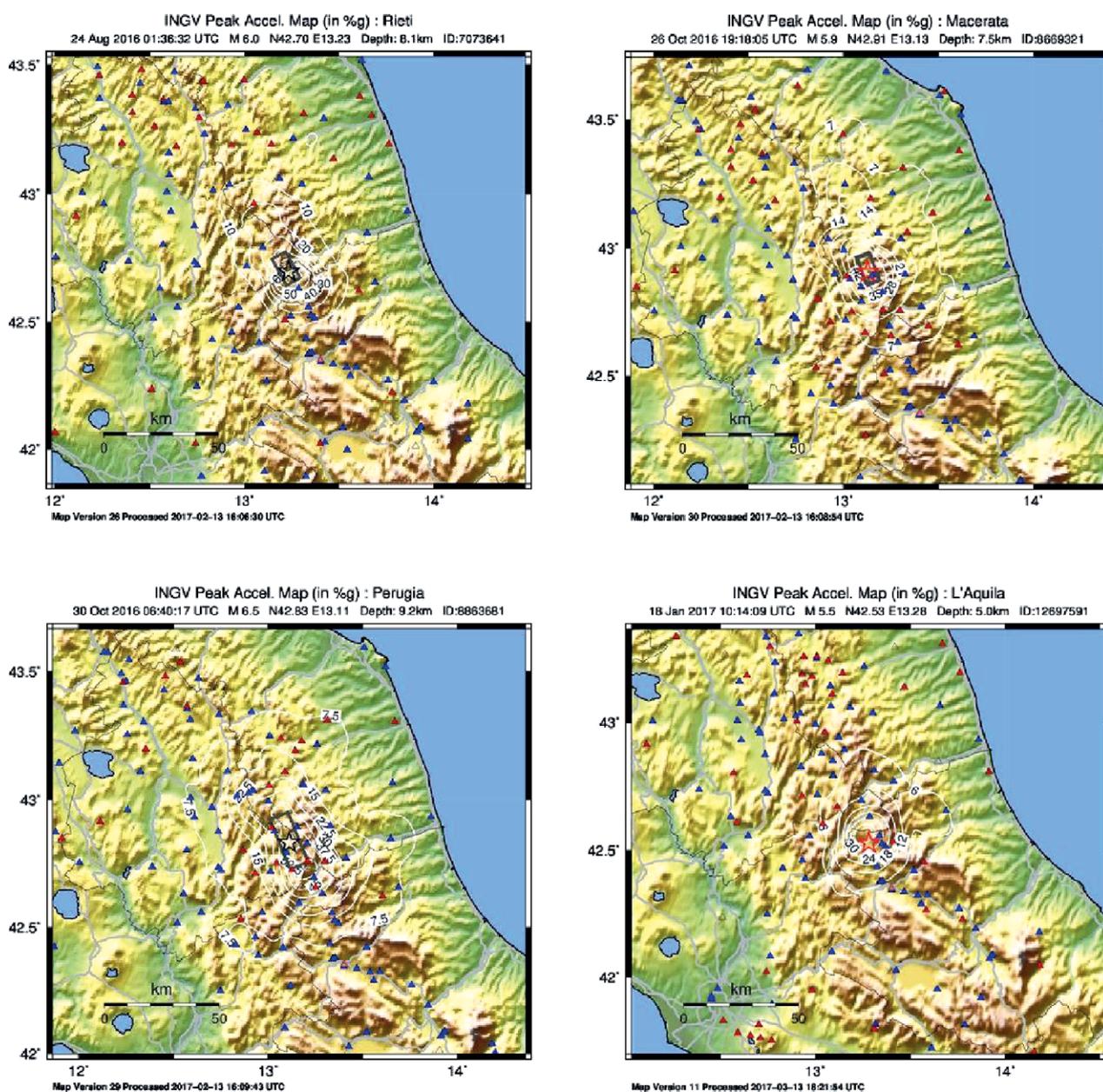


Figura 1

Mappe di scuotimento in PGA per i quattro eventi principali della sequenza: M_w 6.0 del 24 agosto 2016, M_w 5.9 del 26 ottobre 2016, M_w 6.5 del 30 ottobre 2016 e M_w 5.5 del 18 gennaio 2017 (<http://shakemap.rm.ingv.it>).

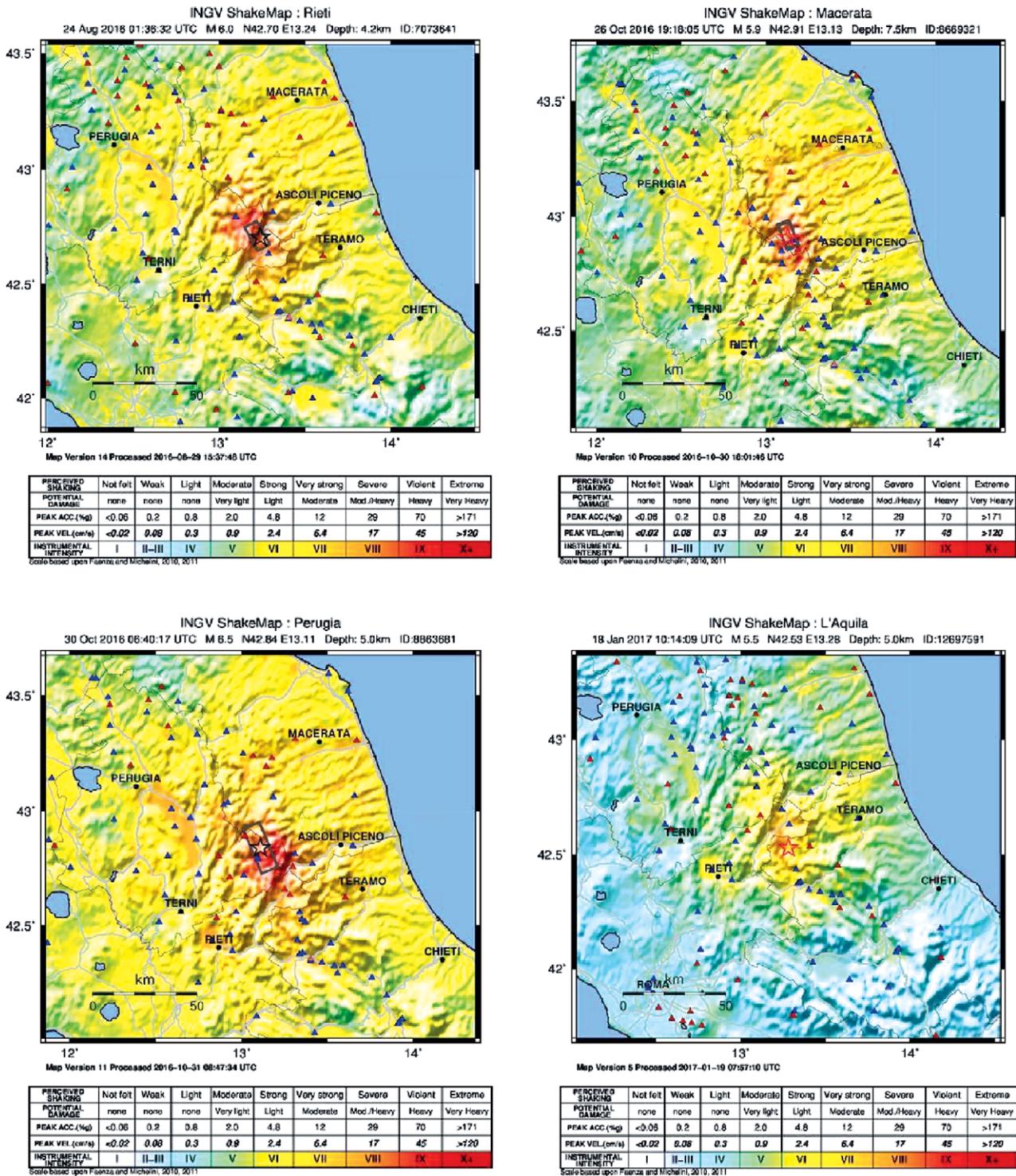


Figura 2
Mappe di scuotimento in intensità strumentale MCS per i quattro eventi principali della sequenza: M_w 6.0 del 24 agosto 2016, M_w 5.9 del 26 ottobre 2016, M_w 6.5 del 30 ottobre 2016 e M_w 5.5 del 18 gennaio 2017 (<http://shakemap.rm.ingv.it>).

Dopo la prima scossa del 24 agosto, dopo le scosse del 26 e 30 ottobre e dopo la scossa del 18 gennaio, sono stati effettuati rilievi macrosismici, al fine di attribuire ad ogni località colpita da ciascun evento sismico un valore di intensità, secondo la scala macrosismica europea (EMS, Grünthal 1998). Tali valori sono riportati in Tabella 1, per le località maggiormente colpite dalle scosse di agosto e di ottobre, mentre non si riportano i risultati del rilievo effettuato dopo la scossa di gennaio (Arcoraci et al., 2017), in quanto non sono riportati valori aggiornati per le località in Tabella 1.

La tabella mostra come il danno sia divenuto via via più severo al procedere della sequenza, come dimostrato dai valori progressivamente crescenti dell'intensità macrosismica attribuita ai diversi comuni. Per esempio, alla località di Castelluccio di Norcia, era stata assegnata una intensità macrosismica di VI-VII dopo la scossa di agosto, che è diventata pari a IX-X dopo le scosse di ottobre.

Tabella 1 - Valori di intensità macrosismica (EMS) osservata a seguito degli eventi del 24 agosto (Albini et al., 2016) e dopo le scosse del 26 e del 30 ottobre (Arcoraci et al., 2016) e valori di PGA e $S_a(0.3s)$, stimati a partire dalle mappe di scuotimento (<http://shakemap.rm.ingv.it>), per alcune delle località più colpite dai quattro eventi principali della sequenza sismica dell'Italia centrale.

Località	I EMS		PGA [g]				Sa(0.3s) [g]			
	24/08	30/10	24/08	26/10	30/10	18/01	24/08	26/10	30/10	18/01
Amatrice	X	XI	0.59	0.07	0.36	0.36	1.03	0.17	0.54	0.55
Saletta (Amatrice)	X	-	0.78	0.10	0.43	0.18	1.59	0.23	0.70	0.33
Retrosi (Amatrice)	VIII	IX	0.47	0.06	0.32	0.29	0.78	0.14	0.48	0.46
Sant'Angelo (Amatrice)	IX-X	-	0.73	0.08	0.38	0.24	1.32	0.19	0.58	0.38
San Capone (Amatrice)	-	-	0.77	0.10	0.41	0.16	1.55	0.22	0.71	0.28
Pescara d/T (Arquata d/T)	X	XI	0.43	0.18	0.50	0.12	0.82	0.27	1.03	0.15
Vezzano (Arquata d/T)	VII	VII-VIII	0.32	0.14	0.49	0.12	0.59	0.21	0.91	0.14
Arquata d/T	VIII-IX	IX-X	0.25	0.13	0.45	0.10	0.45	0.17	0.76	0.10
Illica (Accumoli)	IX	X-XI	0.76	0.11	0.51	0.13	1.54	0.23	0.94	0.25
Accumoli	VIII	X	0.76	0.11	0.50	0.12	1.54	0.23	0.94	0.28
Castelsantangelo s/N	-	IX	0.26	0.47	0.44	0.05	0.45	1.03	0.91	0.07
Castelluccio (Norcia)	VI-VII	IX-X	0.36	0.33	0.50	0.10	0.65	0.56	1.14	0.14
San Pellegrino (Norcia)	VII-VIII	IX-X	0.38	0.20	0.55	0.06	0.76	0.26	1.30	0.14
Preci	VI	VII-VIII	0.25	0.28	0.35	0.04	0.42	0.59	0.70	0.05
Camerino	-	VII-VIII	0.06	0.15	0.18	0.02	0.09	0.20	0.39	0.03
Tolentino	-	VII	0.09	0.10	0.10	0.02	0.15	0.16	0.33	0.04
Ussita	-	-	0.26	0.49	0.39	0.04	0.40	1.04	0.73	0.06
Pieve (Ussita)	-	VIII	0.26	0.51	0.39	0.04	0.40	1.04	0.73	0.06
Visso	VI	VIII-IX	0.25	0.50	0.42	0.04	0.41	0.95	0.68	0.05
Borgo S. Antonio (Visso)	-	VIII-IX	0.23	0.47	0.39	0.04	0.38	0.89	0.65	0.05
Offida	-	-	0.07	0.06	0.09	0.02	0.12	0.10	0.14	0.07
Falerone	V	V	0.07	0.07	0.06	0.04	0.12	0.12	0.12	0.07
Caldarola	-	VII-VIII	0.11	0.16	0.16	0.02	0.18	0.24	0.33	0.04
Amandola	VI	VII	0.09	0.17	0.11	0.01	0.13	0.21	0.19	0.02
Cossignano	-	-	0.04	0.03	0.05	0.02	0.08	0.06	0.11	0.04
Sarnano	V-VI	V-VI	0.08	0.13	0.11	0.36	0.13	0.21	0.21	0.02
Pieve Torina	-	VIII	0.13	0.28	0.28	0.18	0.30	0.30	0.46	0.04

La Tabella 1 riporta inoltre i valori di PGA e di accelerazione spettrale in corrispondenza di un periodo di 0.3 s ($S_a(0.3 s)$), derivati dalle mappe di scuotimento prodotte dall'INGV per i comuni colpiti. Si osserva come la scossa del 24 agosto abbia prodotto valori di PGA compresi tra 0.04 g e 0.78 g, con valori di accelerazione spettrale a 0.3s compresi tra 0.08 g e 1.59 g. La scossa del 26 ottobre ha invece prodotto valori di scuotimento generalmente più bassi, con PGA tra 0.03 g e 0.51 g, con $S_a(0.3 s)$ tra 0.06 g e 1.04 g. Tuttavia, in alcune località (ad es. Castelsantangelo sul Nera e Ussita), lo scuotimento è stato decisamente più severo di quello risentito il 24 agosto. La scossa del 30 ottobre ha prodotto PGA tra 0.05 g e 0.55 g, con $S_a(0.3 s)$ tra 0.11 g e 1.3 g. Infine, la scossa del 18 gennaio ha generato un scuotimento più lieve, con PGA tra 0.01 g e 0.36 g e $S_a(0.3 s)$ tra 0.02 g e 0.55 g per le località riportate in Tabella 1.

Secondo quanto riportato dai media, la scossa principale ha causato 241 vittime ad Accumoli e Amatrice e 51 ad Arquata del Tronto. Nonostante non siano state diffuse statistiche ufficiali al riguardo, la maggior parte delle vittime è legata ai danni e/o collassi di edifici in muratura ordinaria, la cui vulnerabilità è stata già messa in rilievo in altri terremoti italiani recenti, tra cui quello del 1997 in Umbria-Marche (Spence e D' Ayala 1999), quello del 2002 in Molise (Decanini et al. 2004), quello del 2009 a L'Aquila (D' Ayala and Paganoni 2011) e del 2012 in Emilia (Bracchi et al., 2012; Penna et al. 2014).

Questo articolo si concentra sulla valutazione del comportamento sismico degli edifici residenziali in muratura ordinaria, partendo da una descrizione del costruito delle aree colpite, per poi passare alla discussione ed interpretazione dei danni osservati. In particolare, si metteranno in rilievo le criticità emerse per quanto riguarda dettagli costruttivi e materiali utilizzati e l'effetto (in alcuni casi benefico, in altri meno efficace) di interventi recenti di consolidamento a seguito di eventi sismici precedenti.

2. Caratteristiche degli edifici nelle zone colpite

Esaminando i dati rilevati dall'ultimo censimento ISTAT del 2011 nelle province appartenenti al cosiddetto cratere sismico, si può notare come la maggioranza degli edifici residenziali sia costituita da edifici in muratura portante con una percentuale che supera in media il 61% del totale di edifici censiti (Figura 3). Per quanto riguarda l'epoca di costruzione degli edifici residenziali, i dati censuali mostrati in Figura 3 indicano che la maggioranza degli edifici in muratura sono antecedenti al 1918 o costruiti in buona parte fino al 1960, mentre gli edifici realizzati con struttura portante in cemento armato risalgono agli anni '70 e '80. Si tratta in maggioranza di edifici di due o tre piani di altezza, in media oltre il 40% e il 30% rispettivamente, e in generale in buono stato di conservazione (Figura 4).

Considerando alcuni tra i comuni più colpiti dagli eventi sismici dell'agosto e ottobre 2016, si nota come la presenza di edifici in muratura sia prevalente rispetto ad altre tipologie costruttive, con diffusione superiore al 85% per i comuni di Norcia, Visso, Amatrice e Accumoli, e che l'epoca di realizzazione sia antecedente al 1960 in media per il 60% degli edifici residenziali, di cui circa la metà antecedente i primi decenni del XX secolo (Figura 5).

Dall'elaborazione dei dati raccolti nei rilievi di agibilità post-sisma a seguito dei terremoti dell'Abruzzo del 1984, Umbria-Marche 1997 e L'Aquila 2009 (Rosti, 2016; Rosti et al., 2017), che hanno riguardato anche zone interessate dagli eventi sismici del 2016, è risultato che, su un campione di circa 150000 edifici rilevati, più dell'83% è costituito da strutture in muratura, di cui il 50.2% in muratura a tessitura irregolare o di cattiva qualità e di altezza inferiore ai 5 piani (Tabella 2 e Figura 6).

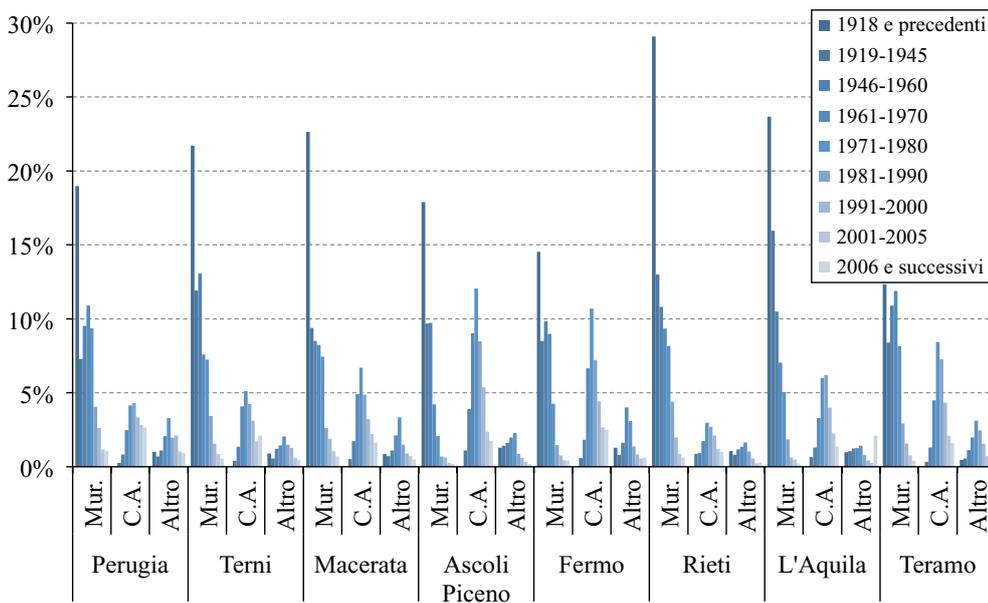


Figura 3
Censimento 2011: Tipologia costruttiva rispetto all'anno di costruzione a livello provinciale (ISTAT, 2011).

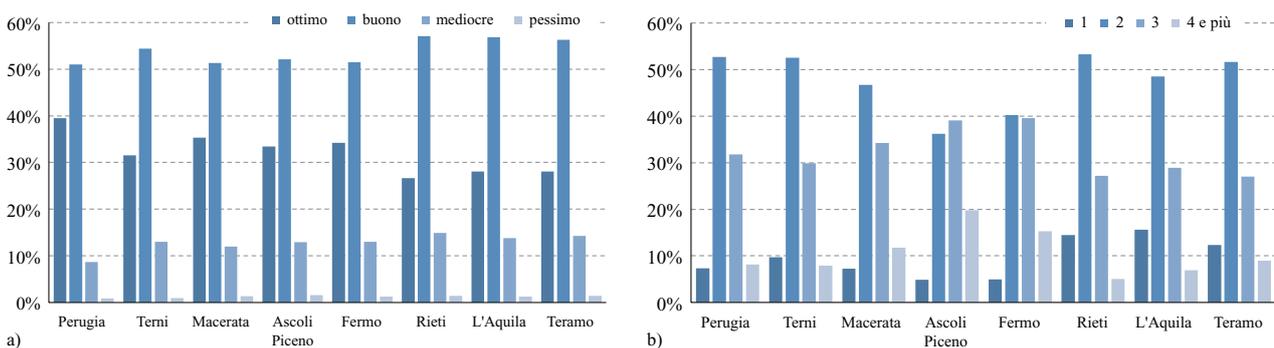


Figura 4
Suddivisione degli edifici della zona del cratere in funzione dello stato di conservazione (a) e del numero di piani fuori terra (b), a livello provinciale (ISTAT 2011)(in basso).

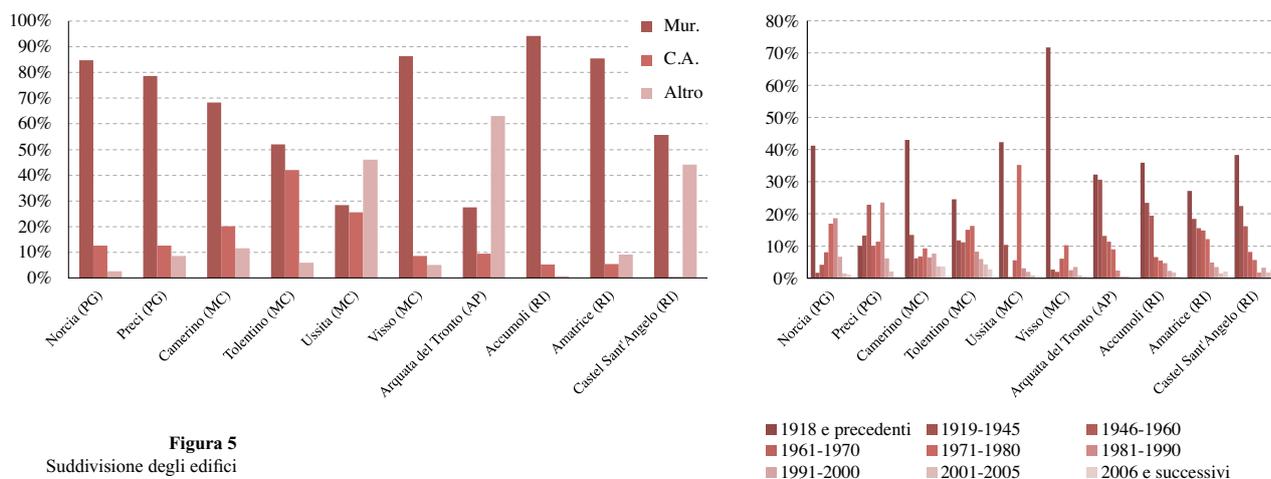


Figura 5
Suddivisione degli edifici della zona del cratere in funzione della tipologia costruttiva (a) e dell'anno di costruzione (b), per alcuni dei comuni più danneggiati (ISTAT 2011)(in alto).

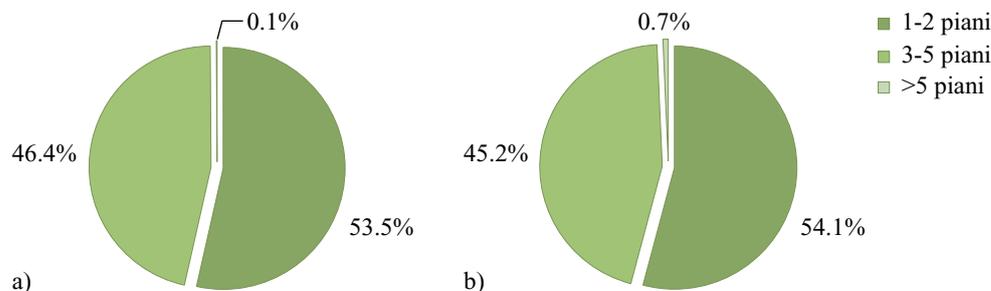


Figura 6
Elaborazione dei dati dei rilievi di agibilità post-sisma in funzione del numero di piani per edifici in muratura in pietra a tessitura irregolare (a) e a tessitura regolare (b).

Tabella 2 - Sintesi dei dati raccolti nei rilievi di agibilità post-sisma in seguito ai terremoti di Abruzzo 1984, Umbria-Marche 1997 e L'Aquila 2009: elaborazione dei dati riguardo al numero di piani e tipologie costruttive.

N° Piani	Mista	C.A.	Muratura a tessitura irregolare o di cattiva qualità	Muratura a tessitura regolare e di buona qualità	Acciaio
1-2	4286	6172	40757	26969	589
3-5	3397	10258	35331	22502	23
>5i	37	1015	79	346	1
Totale	7720	17445	76167	49817	613

Le località interessate dalla sequenza sismica del 2016 sono prevalentemente centri abitati di limitate dimensioni, con una popolazione spesso al di sotto dei 5000 abitanti. La loro collocazione su pendici o in sommità di rilievi collinari o montagnosi ne ha determinato lo sviluppo urbano nei secoli, con assetti viari influenzati dalla morfologia del terreno, in alcuni casi di dimensioni ridotte e spesso con orientamento parallelo alle linee di pendenza. I centri storici sono generalmente costituiti da aggregati urbani lineari sorti seguendo l'andamento delle strade. All'interno dei centri storici convivono sia edifici in stato di forte degrado o abbandono preesistente, sia costruzioni che hanno subito interventi di manutenzione o consolidamento in seguito ad eventi sismici precedenti, come nel caso di Norcia e alcuni comuni limitrofi. Edifici di costruzione più recente sono il risultato dell'espansione intorno ai centri storici originari (Figura 7, a) o di un loro prolungamento lungo le direttrici viarie principali (Figura 7 b) o, infine, sono stati realizzati in aree adiacenti ma morfologicamente differenti (Figura 7 c).

I rilievi svolti dagli autori tra l'agosto 2016 e il maggio 2017 hanno confermato quanto le caratteristiche delle murature degli edifici siano eterogenee e dipendenti non solo dall'epoca di costruzione ma anche dal luogo in cui essi sorgono. Nei centri storici, gli edifici più antichi sono realizzati prevalentemente in muratura in pietrame disordinata o a conci sbozzati, con tessitura irregolare (Figura 8), in prevalenza costituiti da due o tre paramenti, soprattutto nei centri collocati tra i Monti della



Figura 7
Vista aerea dei comuni di:
(a) Norcia (PG);
(b) Amatrice (RI);
(c) Accumoli (RI) -
fonte: Google Earth.



Figura 8
Esempi di viste frontali di
paramenti murari in pietra
con tessitura irregolare a
Castelsantangelo sul Nera (a)
e Amatrice, frazione Retrosi
(b).

Laga e la Valnerina. Gli elementi utilizzati sono generalmente non squadri, di dimensioni variabili e forma irregolare, oppure ciottoli di fiume (Figura 9 e Figura 10). Le murature sono spesso realizzate con leganti scadenti e con scarsità di diatoni di collegamento tra i paramenti stessi (Figura 10).

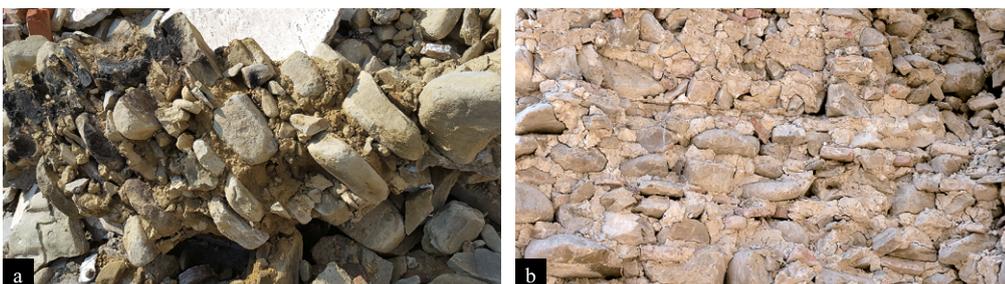


Figura 9
Sezione longitudinale di
paramenti murari in pietra
con tessitura irregolare
ad Amatrice, frazione
Sant'Angelo (a) e Amatrice
(b).

Figura 10
Sezioni trasversali di paramenti murari in pietra con tessitura irregolare e malta con leganti di scarsa qualità (Amatrice, frazione Sant' Angelo).



Anche nei casi in cui la muratura in pietra sia di tessitura irregolare, si è notata la presenza di pietre cantonali, soprattutto negli edifici di testata degli aggregati urbani o in edifici isolati (Figura 11), la cui funzione è quella di garantire un migliore collegamento tra pareti disposte ortogonalmente tra loro. Murature in pietra con tessitura regolare e materiali di buona qualità, perlomeno nei paramenti esterni, sono stati utilizzati in edifici di particolare pregio o che rivestivano funzioni pubbliche o religiose. Nei centri abitati posti nelle zone collinari del Fermano e del Maceratese, gli edifici costruiti fino al XIX secolo sono per la maggior parte caratterizzati da una muratura in mattoni pieni a più teste o a sacco (Figura 11) invece che in pietra. Per quanto concerne gli edifici costruiti nel XX secolo, è ricorrente l'uso di muratura in pietra listata (Figura 12) oppure realizzata con blocchi di pietra tenera, per esempio in tufo, per edifici costruiti fino al secondo dopoguerra (spesso in presenza di solai in cemento armato come mostrato in Figura 12). Nelle aree di espansione, soprattutto tra il 1970 e il 1990 sono stati realizzati edifici con telai in cemento armato tamponati con muratura in blocchi di laterizio o di calcestruzzo aerato autoclavato (Figura 13).

Figura 11
Presenza di pietre cantonali ad Accumoli (a) e Preci (b); Muratura in mattoni pieni a Offida (c).

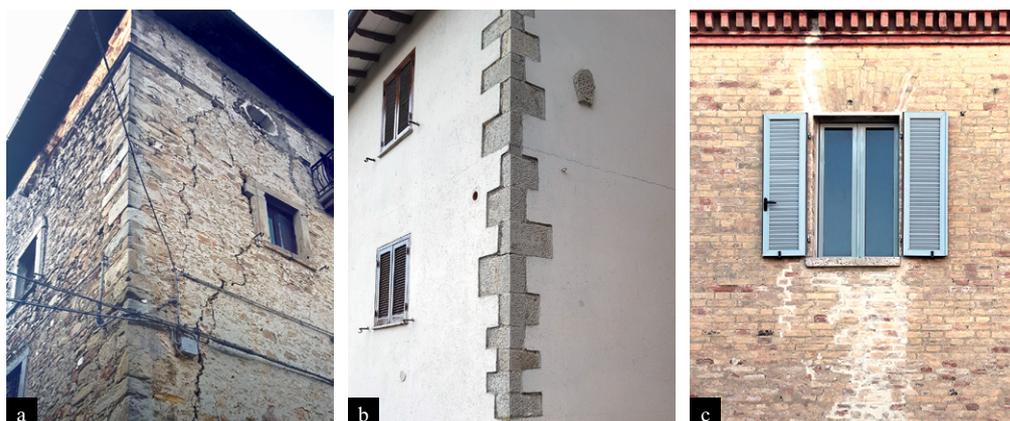




Figura 12
(a) Muratura in pietra listata (Illica); (b) Muratura in blocchi di tufo (Amatrice, frazione Saletta).



Figura 13
Edificio con telaio in c.a. con tamponature in blocchi in laterizio pluristrato a Camerino (a) ed edificio con telaio in c.a. con tamponature in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato monostrato (b), ad Amatrice (a sinistra).

Figura 14
Solai lignei: travi appoggiate su paramento interno ad Amatrice (a) e travi appoggiate sull'intera sezione muraria ad Accumoli (b); volte in muratura al piano terra di alcuni edifici di Amatrice (c) (in basso).



Per quanto riguarda gli edifici in pietra più antichi, i solai e i tetti sono generalmente realizzati con strutture lignee flessibili. Le travi lignee, nel caso di muratura in pietra, poggiano nella maggioranza dei casi sul paramento più interno, anche se sono state rilevate delle eccezioni (Figura 14). In alcuni centri abitati, come per esempio Amatrice, il piano terra degli edifici, spesso adibito a deposito o ad attività commerciali, è caratterizzato dalla presenza di volte in muratura (Figura 14). Negli edifici di pregio, come palazzi e ville, oltre che nelle chiese, l'uso di volte anche decorate, realizzate in muratura o in "camorcanna", è più frequente (Figura 15).

Molte delle località interessate dalla sequenza sismica del 2016, in particolare sia Amatrice e i Monti della Laga, sia Norcia e la Valnerina, avevano già subito danni anche consistenti in seguito a diversi terremoti di cui si ha notizia a partire dal XIV secolo. Norcia è fra i primi esempi in Italia di normativa edilizia di tipo antisismico, varata a seguito del terremoto del 1859, in cui si danno disposizioni relative alla costruzione di nuovi edifici. La legge imponeva che le costruzioni non dovessero superare i due piani, le porte e le finestre dovessero essere realizzate secondo specifiche norme. Era necessario che

Figura 15
(a) Volte in muratura decorate a Tolentino (Palazzo Sangallo); (b) Volte non strutturali realizzate in camorcanna a Falerone.



il materiale da costruzione utilizzato fosse di ottima qualità: era proibito l'utilizzo dei ciottoli dei fiumi per le costruzioni e i muri dovevano avere spessore di almeno 60cm con profilo a scarpa (Reale et al., 2004). A seguito dell'entrata in vigore di tali norme, oltre a quelle successive, in comuni come Norcia, Ussita e Visso si nota un uso diffuso di catene, sia metalliche che lignee, quest'ultime inserite nello spessore della muratura, a livello di tutti i solai allo scopo di migliorare la connessione tra pareti e limitare l'attivazione di meccanismi di ribaltamento fuori piano (Figura 16).

In anni più recenti, successivamente al terremoto del 1979 della Valnerina molti edifici in muratura sono stati rinforzati, anche se in alcuni casi con dettagli costruttivi non adeguati. Come già rilevato a seguito dei terremoti Umbria-Marche del 1997 e L'Aquila del 2009, solai e coperture lignee sono stati sostituiti con diaframmi in latero-cemento, con l'aggiunta di cordoli in cemento armato, in alcuni casi realizzati in breccia, nonostante la qualità muraria degli edifici su cui si è intervenuto non fosse adeguata per questo tipo di intervento. Per esempio, la Figura 17 mostra diversi interventi di consolidamento succedutisi nel tempo nello stesso edificio: oltre a catene lignee inserite all'interno dello spessore murario durante la costruzione dell'edificio, si nota la presenza di catene metalliche a cui si aggiungono i solai con travi in acciaio realizzati al di sopra delle volte in muratura e una copertura di recente realizzazione in latero-cemento con cordolo perimetrale, quest'ultimo con scarso o assente collegamento con la muratura sottostante.

Figura 16
Uso sistematico di catene metalliche a Visso (a) e Ussita (b).



Figura 17
Interventi di consolidamento su solai e coperture; inserimento di catene metalliche e presenza di catene lignee all'interno dei paramenti murari ad Amatrice (a); cordolo sommitale in cemento armato ad Amatrice (b).



In alternativa alla sostituzione dei solai originali con diaframmi in latero-cemento, in alcuni casi le strutture lignee originali sono state recentemente consolidate con travi o capriate metalliche collegate a cordoli in acciaio (Figura 18).

Tra gli interventi effettuati a seguito del terremoto del 1979 in Valnerina, frequente è stata l'applicazione di intonaci armati. Questo tipo di consolidamento è risultato molto diffuso a Norcia e nelle località vicine. In Figura 19 sono mostrati alcuni esempi di applicazione in cui, tuttavia, la posa dell'intonaco ha interessato le pareti murarie ad esclusione dei cantonali, come invece sarebbe teoricamente più opportuno per una migliore prestazione dell'intervento di consolidamento (anche se la risposta osservata è comunque molto soddisfacente).



Figura 18
Uso di elementi metallici in copertura.



Figura 19
Applicazioni di intonaco armato a Norcia (a) e (b) e Preci (c).

3. Meccanismi di danno osservati

3.1 Meccanismi di danno osservati negli edifici in pietra

Gli edifici storici ed antichi in pietra rappresentano una buona parte del costruito esistente nell'area colpita dagli eventi sismici del 2016 e 2017. I danni osservati hanno in generale mostrato la considerevole vulnerabilità di queste costruzioni, data la presenza di carenze strutturali che riguardano la composizione muraria, frequentemente costituita da pietrame informe, malta di scarsa qualità e assenza di monoliticità trasversale, e la mancanza di adeguate connessioni tra muri perpendicolari e/o tra le pareti e la struttura di copertura.

L'assenza di integrità strutturale è un tipico fattore di vulnerabilità negli edifici in pietra. Quando i muri non sono adeguatamente collegati alle estremità, sotto l'azione sismica ciascuna parete tende a vibrare in modo indipendente. In queste condizioni, le pareti perpendicolari alla direzione del moto tendono a vibrare fuori piano e a instabilizzarsi, se non addirittura a crollare. In diversi casi, la mancanza di integrità strutturale è stata evidenziata dal danneggiamento e/o dalla separazione delle pareti alle intersezioni (Figura 20 e Figura 21). In Figura 20, le lesioni di distacco della facciata hanno un andamento tendenzialmente verticale, per la mancanza di adeguata connessione della facciata con le pareti ortogonali. In Figura 21, invece, le lesioni di distacco coinvolgono una porzione del muro perpendicolare. L'occorrenza di questi meccanismi è influenzata anche da fattori quali la presenza e disposizione delle aperture, l'orientamento dei solai, l'eventuale presenza di muri portanti interni perpendicolari alla facciata e la loro connessione con la facciata stessa (D'Ayala and Paganoni, 2011).

Numerosi sono i casi di collasso fuori piano di intere facciate di edifici, come mostrato dalla Figura 22. In Figura 22 (a), il ribaltamento della facciata ha coinvolto un solo muro ortogonale, data la posizione di estremità della costruzione rispetto all'aggregato. Si osserva che un ulteriore elemento di vulnerabilità è rappresentato dalla considerevole distanza tra due muri portanti. Inoltre, nonostante il crollo degli orizzontamenti intermedi, la volta del pian terreno non sembra essersi danneggiata.



Figura 20
Distacchi della facciata ad Accumoli (a) e (b) e Vezzano, frazione di Arquata del Tronto, (c) e (d)(in alto).



Figura 21
Distacco della facciata con coinvolgimento del muro ortogonale (Castelsantangelo sul Nera)(a destra).

La Figura 22 (b e c) illustra il collasso fuori piano di un edificio situato ad Accumoli. Si osserva la mancanza di adeguata connessione trasversale nella sezione muraria. Inoltre, il carico è trasferito dalle strutture orizzontali sui soli paramenti interni. In molti casi, il ribaltamento fuori piano ha interessato soltanto la porzione superiore della facciata (Figura 23). In questi casi, l'interazione tra il muro e la struttura di copertura riveste un ruolo fondamentale. Negli edifici più antichi, la presenza di strutture di copertura lignee, talvolta spingenti e senza alcuna capacità di contrastare il collasso fuori piano della porzione superiore delle pareti, può rappresentare un'ulteriore causa di collasso parziale. Anche la presenza e disposizione delle aperture hanno influenzato il tipo di meccanismo di collasso (Figura 23, d, e).

In diversi casi, inoltre, si è verificato il distacco e collasso delle angolate, confermando l'assenza di adeguata connessione alle estremità (Figura 24).

Come già accennato, l'elevata vulnerabilità degli edifici in pietra, con numerosi casi di crolli parziali e totali, è stata causata principalmente dalla composizione muraria. La maggior parte dei danni più gravi è imputabile alla mancanza di adeguata connessione trasversale nella tessitura muraria, alla cattiva apparecchiatura dei paramenti e alle pessime caratteristiche della muratura, generalmente costituita da pietrame dalla forma irregolare e da malta di scarsa qualità. La Figura 25 mostra l'instabilità fuori piano del paramento esterno di un edificio in pietra, situato nel centro storico di Visso e un caso di mancanza di connessione trasversale tra due paramenti in pietra.



Figura 22
Ribaltamento fuori piano dell'intera facciata con coinvolgimento del muro ortogonale a Pieve, frazione di Ussita (a) e collasso fuori piano dell'intera facciata ad Accumoli (b) e (c).



Figura 23
Meccanismi di ribaltamento fuori piano della sommità della facciata ad Amatrice (a), Castelsantangelo sul Nera (b), Visso (c) e (d) e Preci, Abbazia S. Eutizio (e) (a sinistra e in basso).



Figura 24
Danni alle angolate a Illica, Accumoli (a), all'Ospedale Grifoni di Amatrice (b) e in un edificio di Amatrice (c).

Figura 25
Instabilità fuori piano del paramento esterno di un edificio a Visso (a) e mancanza di connessione trasversale tra i paramenti di un edificio a Sant'Angelo, frazione di Amatrice (b).



La Figura 26 riporta ulteriori esempi in cui si evidenziano le pessime caratteristiche della muratura, quali la scadente qualità della malta, la presenza di pietrame di forma irregolare e varie dimensioni e la mancanza di connessione trasversale nella sezione muraria. La muratura di scadente qualità, disgregandosi, ha reso in alcuni casi inefficace la presenza di catene e cordoli perimetrali in c.a. (Figura 27).

Figura 26
Crolli per insufficiente qualità della muratura a Sant'Angelo, frazione di Amatrice, (a) e (b) e nella scuola elementare di Caldarola (c).





Figura 27
Esempio di inefficacia dei cordoli dovuto alla scarsa qualità della muratura (Amatrice).

Altri danni sono stati causati dall'inadeguata connessione tra la struttura di copertura e i muri sottostanti e/o dall'interazione della copertura con le pareti. La Figura 28 (a) e (b) mostra coperture lignee collassate all'interno della costruzione. In particolare, in Figura 28 (b) il fuori piombo dei muri perimetrali è evidente. Un altro esempio di danno, causato dall'interazione tra la copertura ed i muri perimetrali e, probabilmente, dovuto alla spinta esercitata dai puntoni della copertura sulle pareti in corrispondenza delle intersezioni, è illustrato in Figura 28 (c).

Diverse costruzioni hanno riportato danni nel piano, con lesioni di vario grado ed estensione nei maschi e nelle fasce murarie (Figura 29). Interessante è il caso di alcuni edifici nel centro storico di Visso, in cui la presenza di adeguati incatenamenti ha inibito l'attivazione di meccanismi di collasso fuori piano, consentendo lo sviluppo di meccanismi nel piano.



Figura 28
Esempi di collasso della copertura a Borgo Sant'Antonio, frazione di Visso, (a) ed Amatrice (b); danno per interazione tra la copertura e le pareti perimetrali a Castelsantangelo sul Nera (c).

Figura 29
Meccanismi di danno nel piano ad Amatrice (a), Sant' Angelo di Amatrice (b), Visso (c) e Accumoli (d).



Anche costruzioni che hanno mostrato un buon comportamento sismico hanno tuttavia presentato danni localizzati. Nel caso dell'edificio in Figura 30, si osserva il distacco delle cornici lapidee delle aperture e dei blocchi in pietra conca nelle fasce murarie, non adeguatamente ammortati al pietrame irregolare.

Figura 30
Distacco di cornici lapidee in corrispondenza delle aperture ad Accumoli.



Infine, un aspetto critico legato alla vulnerabilità sismica dei centri storici riguarda il comportamento degli aggregati, in cui si ha spesso interazione tra corpi di fabbrica adiacenti, che produce danni locali dovuti al martellamento tra gli stessi (Figura 31). In alcuni casi, si sono evidenziati meccanismi di collasso fuori piano della facciata (Figura 32) e danneggiamenti nel piano (Figura 33) anche negli edifici in pietra più moderni. Diversamente, il collasso dell'edificio mostrato in Figura 34 è avvenuto per la formazione di un piano debole a livello del garage.



Figura 31
Interazione tra corpi di fabbrica adiacenti ad Illica, Accumoli (a) e Preci (b) (a sinistra).

Figura 32
Danni fuori piano di edifici in pietra moderni a Norcia (a) ed Amatrice (b)(in basso).



Figura 33
Danni fuori piano di edifici in pietra moderni a Norcia (a) ed Amatrice (b).



Figura 34
Collasso dell'edificio per la formazione di un piano debole al piano seminterrato (Norcia).



3.2 Meccanismi di danno osservati negli edifici in muratura di mattoni

Molto diffusi, nelle zone oggetto dei sopralluoghi, sono gli edifici residenziali in muratura in mattoni di calcestruzzo (Figura 35), tufo (Figura 36) e, in alcuni casi, laterizio. Tali costruzioni consistono, in genere, in configurazioni strutturali a due o più piani fuori terra in cui sono presenti cordoli di piano in c.a. e, in alcuni casi, solai dotati di una certa rigidezza nel proprio piano, anche se non sempre provviste di tutti i dettagli costruttivi tali da garantirne un adeguato comportamento “scatolare”. Gli edifici hanno subito, nella maggior parte dei casi, meccanismi di danno dominati da una risposta nel piano delle pareti, con formazione di lesioni mono- o bi-diagonali per taglio nei maschi (Figura 37) e, meno frequentemente, nelle fasce murarie. In alcuni casi, tali lesioni sono risultate accompagnate da attivazione di meccanismi locali di ribaltamento. In altre situazioni, gli edifici hanno subito un danneggiamento caratterizzato da lesioni orizzontali a livello degli orizzontamenti (Figura 38), probabilmente causato dallo scorrimento di un piano rispetto a quello sottostante, a seguito di elevata differenza nella distribuzione di rigidezza/resistenza in elevazione.

Figura 35
Edificio residenziale in muratura in mattoni di calcestruzzo in frazione Saletta, comune di Amatrice: lesioni causate da probabile scorrimento del piano superiore rispetto al piano terra.





Figura 36
Edificio in muratura in mattoni di tufo sito a Saletta, frazione di Amatrice, con lesioni diagonali a taglio nei letti di malta con probabile incipiente attivazione di meccanismi locali di ribaltamento ed espulsione di cunei di muratura; dettaglio del cordolo di piano in c.a. (b).



Figura 37
Edifici residenziali in muratura in mattoni di diversi materiali (laterizio, calcestruzzo, tufo) a Norcia; lesioni diagonali a taglio nei maschi murari.



Figura 38
Edificio residenziale in muratura in mattoni a San Pellegrino, frazione di Norcia, oggetto di recente sopraelevazione in muratura in laterizio; lesione continua a livello dell'ultimo orizzontamento causata da probabile scorrimento del piano superiore in differente tecnologia rispetto alla porzione sottostante, più rigida.



3.3 Meccanismi di danno osservati negli edifici in muratura moderna in blocchi

Gli edifici in muratura moderna dovrebbero essere concepiti, progettati e realizzati, al fine di inibire le principali fonti di vulnerabilità tipiche delle strutture in muratura storica, nel rispetto delle prescrizioni riportate nelle norme antisismiche, che promuovono l'utilizzo di blocchi di forma regolare e con sufficiente robustezza, limitano la snellezza delle pareti, impongono la realizzazione di connessioni efficaci all'intersezione tra i muri e tra i muri ed i solai e le coperture, attraverso l'esecuzione di cordoli in c.a. adeguatamente armati e continui a livello di ogni piano ed a livello di copertura favorendo così un comportamento scatolare di insieme, una sufficiente rigidezza nel piano dei diaframmi ed una certa regolarità della struttura.

La percentuale di edifici realizzati in muratura moderna in blocchi presenti in zona è relativamente ridotta rispetto al costruito in muratura storica in pietra, in muratura in mattoni ed alle strutture a telaio in c.a. con tamponamenti. Nel corso dei sopralluoghi effettuati sono stati individuati alcuni casi studio, rappresentati da edifici residenziali di recente costruzione. Si presentano per primi i casi di due edifici residenziali a tipologia monofamiliare, siti nella frazione San Capone di Amatrice. Entrambi gli edifici, ancora in fase di costruzione al momento degli eventi sismici, sono stati realizzati in muratura ordinaria a due piani fuori terra; le strutture murarie dei due edifici sono in blocchi in laterizio a foratura verticale di medio/grande spessore, con una percentuale di foratura di circa il 45%-50%, letti di malta ordinari e giunti verticali riempiti sull'intero spessore.

Il primo edificio, illustrato in Figura 39, è inserito in un aggregato di costruzioni in muratura storica. La struttura è caratterizzata dalla presenza di cordoli ed architravi in c.a., di un solaio intermedio in latero-cemento, rigido nel proprio piano, e di una copertura leggera in legno, non spingente. L'edificio, pur irregolare nella disposizione delle aperture, non risulta aver riportato alcun tipo di danneggiamento, a fronte del collasso completo di uno degli edifici ad essa adiacenti e dell'elevato livello di danno riscontrato, durante il sopralluogo, nel costruito della frazione.

Il secondo edificio, illustrato in Figura 40, è invece isolato. I solai intermedio e di copertura sono realizzati in latero-cemento e sono quindi rigidi nel proprio piano e la struttura risulta sostanzialmente regolare in pianta ed in elevazione, pur in presenza di alcuni sfalsamenti negli allineamenti murari, con la sola eccezione di un corpo laterale ad un piano, addossato alla costruzione principale; anche in questo caso sono presenti nell'edificio cordoli di piano ed architravi in c.a. al di sopra delle aperture. Non è stato rilevato danno di alcun tipo nei muri interni, in quelli esterni e nei componenti non strutturali, con la sola eccezione di una leggera lesione orizzontale, localizzata all'interfaccia fra il cordolo sommitale di copertura e la struttura muraria sulla facciata esterna, in corrispondenza di un angolo della costruzione.

Figura 39
Edificio residenziale in muratura "moderna" in blocchi, inserito in aggregato strutturale a San Capone, frazione di Amatrice: visione di insieme (a) e (b), dettaglio della struttura muraria e del solaio intermedio (c) e dettaglio della copertura lignea e del cordolo sommitale in c.a. (d).



Il terzo caso, illustrato in Figura 41, è rappresentato da un edificio residenziale in aggregato a tre piani fuori terra, sito nella frazione San Pellegrino di Norcia. La struttura, realizzata in muratura portante in laterizio, presenta cordoli di piano in c.a., copertura lignea non spingente su due livelli differenti e risulta priva di giunti strutturali all'interfaccia con gli edifici aggregati. Il danno rilevato nella muratura è infatti tipico del fenomeno di martellamento fra i diversi corpi strutturali: lesioni orizzontali a livello degli orizzontamenti, lesioni localizzate per schiacciamento della muratura in corrispondenza della zona di contatto, lesioni diagonali nei maschi murari del livello superiore per effetto della concentrazione della richiesta di spostamento interpiano.



Figura 40
Edificio residenziale isolato in muratura “moderna” in blocchi a San Capone (Amatrice): visione di insieme (a), danno rilevato all’interfaccia fra cordolo sommitale e muratura (b), dettaglio dell’architrave continuo al di sopra delle aperture nella parete di facciata al piano terra (c), muratura (d), solaio (e) e dettaglio della copertura (f).

Figura 41
Edificio residenziale in muratura “moderna” in blocchi, inserito in aggregato strutturale a San Pellegrino (Norcia): visione d’insieme (a) e dettaglio del danno dovuto a martellamento (b).

3.4 Meccanismi di danno osservati negli elementi non strutturali

3.4.1 Danni alle tamponature

Le tamponature, siano esse inserite in strutture in c.a. (come nella maggioranza dei casi) o in acciaio, rappresentano uno degli elementi di vulnerabilità dell’edificio. In aggiunta, sono spesso presenti in strutture che non sono state progettate considerando la loro esistenza e, quindi, il loro comportamento in caso di sisma. Inoltre, di sovente si aggiungono deficienze progettuali e/o costruttive che spesso sfociano in dettagli inadeguati. I danni rilevati nei tamponamenti sono stati quindi diffusi e, in alcuni casi, severi e tali da mettere in discussione la salvaguardia della vita degli occupanti.

I tamponamenti presenti nelle zone colpite dal sisma sono principalmente realizzati in aderenza con gli elementi della struttura e composti sia da un singolo paramento che da una muratura a “doppio strato”. La muratura a singolo paramento è in alcuni casi realizzata in tipologia “leggera”, cioè composta da elementi fragili con caratteristiche meccaniche scadenti, come per esempio il caso di blocchi leggeri a fori orizzontali, in altri con una tipologia “robusta”, in cui gli elementi sono caratterizzati da spessori maggiori, anche con fori verticali, e forniscono una resistenza e stabilità più elevata. Le pareti composte da due paramenti presentano uno strato interno ed uno esterno, che in certi casi è risultato essere incluso all’interno della cornice del telaio, in altri casi disallineato o esterno rispetto alla cornice trave/pilastro, come, per esempio, nelle murature “faccia a vista”. I tipici meccanismi di danneggiamento dei tamponamenti sono rappresentati da rotture nel piano e fuori piano. Mentre i modi fuori piano sono spesso rappresentati dal collasso e/o dall’espulsione della tamponatura (o di un paramento), ed a volte causati da una riduzione della resistenza fuori piano per via di un danneggiamento pregresso nel piano, la risposta sismica nel piano delle pareti può portare a un ventaglio più ampio di criteri di rottura, come per esempio rotture per taglio-scorrimento della muratura, rotture per fessurazioni diagonali della muratura, rotture locali agli angoli dei pannelli, danneggiamenti locali negli elementi della struttura in c.a. a causa dell’interazione con i tamponamenti.

Inoltre, un aspetto che appare evidente è che la risposta ed il danneggiamento nel piano delle pareti sono governati dalla domanda di spostamento interpiano imposta sulla struttura dall’azione sismica. I danni osservati hanno infatti principalmente interessato i piani inferiori/intermedi dell’edificio, dove generalmente i drift interpiano sono maggiori, soprattutto per strutture a telaio. La risposta sismica fuori piano è invece principalmente governata dalla resistenza e stabilità fuori piano della tamponatura, con l’accelerazione sismica che risulta massima ai piani alti degli edifici.

Nella Figura 42 sono riportati esempi di collassi per espulsione fuori piano del paramento esterno “faccia a vista”, dovuti a insufficienti dettagli costruttivi e non adeguati collegamenti con la struttura e/o il paramento interno.

Figura 42
Esempi di espulsione fuori piano del paramento esterno ad Amandola (a), Amatrice (b e c) e Norcia (d).



In altri casi, come quelli riportati in Figura 43, sono stati osservati sia crolli fuori piano del paramento esterno, che danni severi ai piani inferiori classificabili come rotture nel piano del paramento interno ed espulsioni fuori piano del paramento esterno, probabilmente dovute alla riduzione di resistenza per danneggiamenti nel piano severi.

Figura 43
Esempi di danni riscontrati a tamponature a doppio paramento con danni e crolli in entrambi i paramenti ad Amatrice (a), Visso (b) e Norcia (c) e (d).





In Figura 44 sono riportate le foto di tre edifici con tamponatura a singolo paramento, in cui sono stati osservati danni nel piano ed espulsioni fuori piano, probabilmente causati da azioni sismiche combinate nel piano/fuori piano.



Figura 44
Esempi di danni riscontrati a tamponamenti a singolo paramento con danni nel piano e collassi fuori dal piano ad Arquata del Tronto (a) e Norcia (b) e (c).



Figura 45
Esempi di danni riscontrati agli elementi in cemento armato di edifici di Norcia, dovuti all'interazione tra la tamponatura e la struttura.

In alcuni casi, l'interazione con il telaio in cemento armato ha causato il meccanismo di "colonna tozza", con danni locali ai pilastri della struttura per via dell'aumento del taglio locale agente, dovuto alla presenza di tamponamenti di altezza inferiore all'interpiano (Figura 45).

3.4.2 Danni ad altri elementi non strutturali

Così come le tamponature, anche le partizioni interne o tramezze sono elementi molto vulnerabili alle azioni sismiche, soprattutto in assenza di adeguate connessioni e dettagli costruttivi (Figura 46). Il comportamento delle tramezze è assimilabile a quello delle tamponature "leggere" a singolo paramento. Sono stati osservati danni e collassi, sia in strutture gravemente danneggiate sia, in alcuni casi, in edifici che hanno presentato danni strutturali lievi.

Uno degli esempi più comuni di danno non strutturale osservato, sia negli edifici storici che in quelli in tecnologia moderna, consiste nel collasso dei comignoli, prefabbricati (Figura 47 (a)) o in muratura (Figura 47 (b) e (c)). 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, che può essere causa di danni al circondario o a strutture adiacenti (Figura 47 (d) ed (e)) e può costituire un pericolo per l'incolumità pubblica.

Figura 46
Esempi di danni alle tramezze di edifici localizzati ad Amatrice (a) e Castelsantangelo sul Nera (b).



Figura 47
Esempi di danni e collassi di comignoli ad Amatrice (a), Caldarola (b), Cossignano (c e d), Norcia (e).



L'evento sismico ha mostrato anche casi di collasso di controsoffittature (siano esse di recente realizzazione, quindi per esempio in cartongesso, o meno recenti, come per esempio in incannucciato o "camorcanna"). La Figura 48 riporta un esempio di controsoffittatura moderna, non adeguatamente collegata alla struttura portante.

I coppi del manto di copertura possono essere un ulteriore elemento di pericolo per l'incolumità delle persone, soprattutto in caso di manutenzione inadeguata e in mancanza di fissaggi degli stessi (Figura 49). È stato inoltre riscontrato l'utilizzo diffuso di "fermacoppi", ovvero pietre semplicemente appoggiate lungo il manto di copertura per impedire lo spostamento dei coppi. Tali pietre possono rappresentare un elemento aggiuntivo di pericolo (Figura 49 (b)).

Come già riportato in precedenza, sono stati inoltre rilevati danni ad elementi decorativi e cornicioni, dovuti ad un ancoraggio insufficiente con la struttura e danni agli elementi strutturali adiacenti (Figura 50).



Figura 48
Esempio di collasso di una controsoffittatura in cartongesso a Sarnano.



Figura 49
Esempi di danni rilevati in un manto di copertura di un edificio a Castesantangelo sul Nera (a) e presenza di "fermacoppi" in un edificio a Pieve Torina (b).



Figura 50
Esempio di danni ad elementi decorativi osservati ad Accumoli.

4. Conclusioni

L'articolo presenta una descrizione del danno subito dagli edifici residenziali in muratura ordinaria, durante la sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016-2017. La sequenza ha interessato una zona molto ampia del territorio, che si estende su ben quattro regioni (Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo), la cui diversa storia ha determinato un diverso sviluppo del costruito. Si osserva infatti come, ad esempio a Norcia, il susseguirsi di eventi sismici significativi negli anni (1859, 1979, 1997) abbia determinato la predominanza di caratteristiche costruttive migliori rispetto ad altri comuni adiacenti, anche attraverso la realizzazione di interventi di consolidamento successivi.

Negli edifici esistenti in muratura di pietra, si è riscontrata, come già in eventi passati, una sistematica vulnerabilità nei riguardi di meccanismi di collasso fuori dal piano, a seguito dell'utilizzo di dettagli costruttivi inadeguati. Tuttavia, in questa sequenza sismica è stata molto frequente in alcune aree l'attivazione di meccanismi di tessitura, dovuti alla bassissima qualità muraria. Anche in questo evento, si sono potuti osservare casi di edifici caratterizzati da murature assai scadenti, su cui sono stati eseguiti interventi di consolidamento che hanno mostrato una limitata efficacia.

I risultati dei rilievi post-sismici effettuati hanno evidenziato una prestazione sismica soddisfacente degli edifici in muratura "moderna" in blocchi che, seppure presenti in numero limitato, se caratterizzati da una densità muraria sufficiente, materiali di buona qualità e dettagli costruttivi corretti, non hanno mostrato danni significativi neppure nelle zone di massimo scuotimento. Concezioni strutturali non completamente rispondenti a questi criteri hanno evidenziato invece una debolezza intrinseca.

Il danno diffuso agli elementi non strutturali, sia negli edifici in muratura strutturale, sia in quelli in c.a., ha evidenziato ancora una volta la necessità di porre maggior attenzione alla progettazione e al consolidamento di questi elementi, che concorrono in modo significativo al danno economico e al rischio per l'incolumità delle persone.

Nella seconda parte di questo lavoro saranno presentate con maggiore dettaglio le condizioni di danneggiamento riscontrate nei comuni maggiormente colpiti, illustrando le differenze significative dovute alle diverse caratteristiche dell'azione sismica e del costruito.

Bibliografia

- Albini P., Arcoraci L., Berardi M., Bernardini F., Bignami C., Brizuela B., Camassi R., Castelli V., Castellano C., D'Amico S., D'Amico V., Del Mese S., Ercolani E., Fodarella A., Graziani L., Locati M., Leschiutta I., Maramai A., Pessina V., Piscini A., Rossi A., Rovida A., Sbarra M. (2016) - QUEST - Rilievo macrosismico in EMS98 per il terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016, Report finale 10/10/2016 (<http://quest.ingv.it/index.php/rilievi-macrosismici/13-rapporto-sul-rilievo-macrosismico-ems98-per-il-terremoto-di-amatrice-del-24-agosto-2016/file>).
- Arcoraci L., Berardi M., Bernardini F., Buffarini G., Camassi R., Castellano C., D'Amico V., Del Mese S., Ercolani E., Graziani L., Hailemikael S., Locati M., Leschiutta I., Maramai A., Martini G., Paciello A., Paolini S., Pessina V., Rossi A., Rovida A., Stucchi M., Verrubbi V. (2016) - QUEST - Rilievo macrosismico per i terremoti nell'Italia centrale, Aggiornamento dopo le scosse del 26 e 30 ottobre 2016, Aggiornamento al 21 dicembre 2016 (<http://quest.ingv.it/index.php/rilievi-macrosismici/31-norcia-30-10-2016-mw-6-5-rilievo-macrosismico-per-i-terremoti-nell-italia-centrale-aggiornamento-dopo-le-scosse-del-26-e-30-ottobre-2016/file>).
- Arcoraci L., Bernardini F., Camassi R., Castellano C., Del Mese S., Ercolani E., Fodarella A., Graziani L., Locati M., Maramai A., Paolini S., Pessina V., Rossi A., Stucchi M., Verrubbi V. (2017) - QUEST - Rilievo macrosismico in EMS98 per la sequenza sismica in Italia Centrale: aggiornamento dopo il 18 gennaio 2017 (http://quest.ingv.it/images/rilievimacrosismici/QUEST_report%2018%20gennaio_17ErrCorr.pdf).
- 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.
- D'Ayala D., Paganoni S. (2011) - Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9:81-104.
- Decanini L., De Sortis A., Goretti A., Langenbach R., Mollaioli F., Rasulo A. (2004) - Performance of Masonry Buildings During the 2002 Molise, Italy, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. S191-S220
- Faenza L., Michelini A. (2010) - Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap, *Geophys. J. Int.*, 180(3), 1138-1152.
- Faenza L., Michelini A. (2011) - Regression analysis of MCS intensity and ground motion spectral accelerations (SAs) in Italy, *Geophys. J. Int.*, 1-16.
- Grünthal G. (1998) - European macroseismic scale 1998. *Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 15, 1-99.
- ISTAT (2011) Istituto Nazionale di Statistica. 15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni. <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/>.
- 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.
- Reale C., Scheibel B., Vignoli F., et al. (2004) - Il Regolamento edilizio di Norcia del 1860: fra storia sismica e storia urbanistica. In: XI Convegno nazionale L'ingegneria sismica in Italia, Genova, 25-29 gennaio. SGE, Padova, p paper C1-08
- Rosti A. (2016) - A contribution to the seismic vulnerability assessment of URM buildings, Tesi di dottorato, UME Graduate School, IUSS Pavia.
- Rosti A., Rota M., Penna A., Magenes G. (2017) - Statistical treatment of empirical damage data collected after the main Italian seismic events (1980-2009), 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago del Cile.
- Spence R., D'Ayala D. (1999) - Damage assessment and analysis of the 1997 Umbria-Marche earthquakes, *Struct Eng Int J Int Assoc Bridg Struct Eng* 9:229-233.

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 Prorettore 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 a 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.