



# Analisi statistiche dei dati tipologici e di danno delle scuole in muratura danneggiate dal terremoto del Centro Italia 2016/2017

Daria Ottonelli<sup>a</sup>, Sara Alfano<sup>a</sup>, Serena Cattari<sup>a</sup>, Marco Di Ludovico<sup>b</sup>, Andrea Prota<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università degli Studi di Genova, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italia.

<sup>b</sup>Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II, Via Claudio 21, 80125 Napoli, Italy

*Keywords: scuole; muratura; vulnerabilità sismica; danno sismico; terremoto Centro Italia 2016/2017*

## ABSTRACT

Il terremoto che ha colpito il Centro Italia nel 2016/2017 ha confermato ancora una volta come edifici strategici o a rischio rilevante, quali le scuole, possano presentare livelli di vulnerabilità elevati e prestazioni inadeguate, al pari di quelle ordinarie nonostante il ruolo che ricoprono. Al riguardo tale evento ha consentito di acquisire numerosi dati, tra i quali quelli sui plessi scolastici dichiarati inagibili (ossia con esito E secondo la scheda di rilievo del danno AeDES) attraverso l'attività di supporto affidata dal Commissario per la Ricostruzione al Consorzio ReLUIS tramite il Dipartimento di Protezione Civile (Di Ludovico et al. 2017).

Nell'articolo i dati allora acquisiti sui plessi scolastici in muratura sono rielaborati in chiave statistica perché possano costituire un riferimento non solo per la loro classificazione tipologica, ma anche in termini di dati geometrici e tecnologici/costruttivi. I dati di vulnerabilità sono poi correlati alla risposta sismica reale in termini di modalità danno prevalenti occorse. Dal campione sono infine individuati alcuni casi studio – ottimali in relazione alla *completezza dei dati* a disposizione nonché per la *significatività della risposta* subita- che potranno costituire un utile elemento per future ricerche finalizzate alla validazione di modelli analitici previsionali impiegabili in politiche di mitigazione.

## 1 INTRODUZIONE

A partire dal terremoto del Molise del 2002, reso emblematico purtroppo dal crollo della scuola elementare a San Giuliano di Puglia, gli eventi sismici che si sono susseguiti sul territorio italiano, quali il terremoto de L'Aquila (2009), quello di Reggio Emilia (2012) e ancora più quello del Centro Italia (2016/2017), hanno evidenziato come gli edifici strategici o a rischio rilevante, quali le scuole, possano presentare anche livelli di vulnerabilità elevati e prestazioni inadeguate, al pari di quelle ordinarie nonostante il ruolo che ricoprono (Di Ludovico et al. 2018, Di Ludovico et al. 2019).

Successivamente al tragico evento del 2002, con la pubblicazione in particolare dell'Ordinanza P.C.M 3274/2003 sono stati avviati sul territorio nazionale programmi finalizzati alla valutazione degli indici di sicurezza sismica degli edifici di rilevanza strategica e alla loro trasmissione al Dipartimento della Protezione Civile (DPC) utili per l'accesso a contributi di finanziamento e per la pianificazione di politiche di prevenzione. In

particolare, questo censimento è attuato attraverso l'uso della "Scheda di sintesi della verifica sismica di edifici strategici ai fini della Protezione Civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico", chiamata nel seguito "*Scheda di sintesi DPC*". Complici le numerose proroghe e nonostante gli ulteriori impulsi avviati dal DPC a scala nazionale (Dolce et al. 2019a) questo censimento è ancora in corso ma gli eventi sopra menzionati hanno già consentito di effettuare prime considerazioni sull'affidabilità che tali valutazioni hanno o meno al fine di avere un quadro realistico della vulnerabilità e del rischio sismico del patrimonio scolastico a scala nazionale.

In effetti i sopralluoghi effettuati a valle del terremoto del Centro Italia nel 2016/2017 hanno messo in evidenza come in svariati casi l'indice di sicurezza agli atti delle amministrazioni risultasse discrepante rispetto alle effettive prestazioni esibite (Calderini et al. 2017): in alcuni casi, ad indici di sicurezza molto modesti (<0.2) hanno corrisposto risposte strutturali

soddisfacenti; in altri, con ricadute ben più preoccupanti, ad indici di sicurezza elevati (anche prossimi all'unità) hanno corrisposto gravi danni non giustificati dalla severità dell'azione subita. Oltre alla criticità relativa all'affidabilità di tali indici, un secondo aspetto riguarda anche la confrontabilità di tali indici di sicurezza. La problematica è rilevante perché usualmente, dato il significativo numero di manufatti pubblici/strategici presenti sul territorio, tali verifiche sono affidate a molteplici professionisti legittimamente liberi di adottare tecniche di modellazione e metodi di analisi molto diversi tra loro. Questa varietà di strumenti adottabili, ciascuno intrinsecamente caratterizzato da differenti livelli di affidabilità e accuratezza, porta a confrontare esiti basati su assunzioni difficilmente paragonabili. Per questo motivo, in diversi casi a livello regionale, ad esempio in Friuli Venezia Giulia e in Basilicata, sono stati attuati progetti di ricognizione dei dati raccolti sugli edifici strategici con le suddette verifiche (Gattesco e Boem 2019, Masi et al. 2014) oppure finalizzati ad individuare strategie per delineare più efficacemente liste di priorità (ad esempio in Gattesco et al. 2011, Saler et al. 2019).

Tutto ciò motiva la necessità di disporre di ulteriori strumenti che si affianchino a queste ricognizioni per fornire un quadro più affidabile e soprattutto ottenuto con approcci omogenei a scala nazionale. Al riguardo nel 2018 il DPC ha avviato un programma di ricerca inerente l'analisi di rischio sismico, che ha portato alla redazione di curve di fragilità e mappe di rischio sismico per il costruito residenziale diffuso (Dolce et al. 2019b). Nel 2019 questa attività ha trovato prosecuzione nel progetto ReLUIS (accordo quadro DPC per il triennio 2019-2021) nell'ambito del WP4-*MAppe di Rischio e Scenari di danno sismico* (Progetto MARS coordinato dai Proff. S.Lagomarsino e A.Masi). Tra gli obiettivi di tale progetto vi è quello di produrre curve di fragilità e mappe di rischio anche per edifici strategici ed in particolare le scuole, oggetto del presente articolo. Costituiscono elementi di supporto fondamentali per il conseguimento di tali obiettivi la disponibilità di dati utili a:

- definire, ove possibile, classi ricorrenti a comportamento sismico omogeneo nell'ambito delle scuole (i);
- definire parametri di riferimento (di crescente livello di dettaglio a seconda dei dati a disposizione) per ciascuna delle classi ricorrenti individuate, finalizzati all'applicazione dei potenziali modelli di vulnerabilità applicabili (empirico, macrosismico, a base meccanica, basati su

analisi di dettaglio su edifici prototipo), per la costruzione delle curve di fragilità (ii);

- definire casi studio di scuole impiegabili come benchmark per la validazione dei modelli di vulnerabilità. Questo obiettivo presuppone la possibilità del riscontro con la risposta sismica reale e informazioni sufficientemente accurate (sia in relazione alla domanda che alla capacità strutturale) perché la risposta sia riproducibile con ragionevoli incertezze (iii).

E' questo il contesto in cui si inserisce la rielaborazione illustrata nel seguito dei dati acquisiti sui plessi scolastici in muratura dichiarati inagibili (ossia con esito E secondo la scheda di rilievo del danno AeDES) attraverso l'attività di supporto affidata dal Commissario per la Ricostruzione al Consorzio ReLUIS tramite il Dipartimento di Protezione Civile (Di Ludovico et al. 2017). La numerosità limitata del campione esaminato, costituito da 43 plessi scolastici (cui corrisponde un totale di 60 unità strutturali), può fornire solo indicazioni parziali per le finalità (i) e (ii) mentre costituisce una preziosa e indispensabile risorsa per la finalità (iii).

Nel seguito è fornito un quadro dei dati a disposizione (§2) impiegati per le rielaborazioni statistiche finalizzate all'individuazione di indirizzi sulle caratteristiche tipologiche geometriche e costruttive ricorrenti (§3, §4). Dal campione sono infine individuati alcuni casi studio utili in futuro per le finalità della validazione di modelli analitici previsionali impiegabili in politiche di mitigazione (§6) sulla base dell'analisi congiunta della completezza dei dati a disposizione e della significatività della risposta subita (§5).

## 2 DATABASE DEI PLESSI SCOLASTICI COLPITI DAL TERREMOTO DEL CENTRO ITALIA 2016

Il terremoto del Centro Italia del 2016 ha consentito di acquisire numerosi dati sulle caratteristiche tipologiche e la risposta sismica degli edifici scolastici (Di Ludovico et al. 2017b, Di Ludovico et al. 2019). Tra questi in particolare il campione ivi esaminato si riferisce all'attività di supporto affidata dal Commissario per la Ricostruzione tramite il Dipartimento di Protezione Civile (DPC) al Consorzio ReLUIS (Di Ludovico et al. 2017a) per valutare la riparabilità dei plessi scolastici dichiarati inagibili (ossia con esito E secondo la scheda di rilievo del danno AeDES) a seguito dei diversi eventi

occorsi, come si evince in Figura 1, dove in rosso sono identificate le scuole chiuse a seguito della scossa del 24 Agosto e in giallo a seguito dell'evento del 30 Ottobre. Questa attività, già descritta in Di Ludovico et al 2017b, è stata svolta su 90 corpi di fabbrica, di cui il 37% caratterizzato da struttura portante principale in calcestruzzo armato (c.a.), il 54% in muratura ed il restante 9% con la presenza di corpi di fabbrica di altra tipologia strutturale (strutture miste c.a. e muratura, strutture prefabbricate, strutture in acciaio, ecc.). Il presente articolo fa riferimento ai soli edifici in muratura e struttura mista muratura e c.a., comprensivo di 43 fabbricati. Nel seguito sono illustrati i dati a disposizione impiegati per le rielaborazioni discusse dal §3 al §5.

Di ogni complesso scolastico nell'ambito dell'attività svolta nel Dicembre 2016 è stata effettuata da parte di molteplici gruppi di ricerca afferenti a varie Università italiane la valutazione della riparabilità secondo i criteri dell'Ordinanza n. 14 del 14 febbraio 2013 (O.P.C.M. n. 14 del 14/02/2013) emessa in precedenza dalla Regione Emilia Romagna a seguito degli eventi sismici del maggio 2012. L'Ordinanza è finalizzata a stabilire, secondo una procedura standardizzata, il livello operativo di edifici che hanno subito danni gravi sismici in funzione di parametri relativi allo stato di danno e ai fattori di vulnerabilità. Mentre il livello operativo costituisce lo strumento decisionale adottato allora dal Commissario per la ricostruzione, nel seguito si fa riferimento esclusivamente ai dati su danno e vulnerabilità. In particolare, lo "stato di danno" è espresso su una scala costituita da 4 livelli (da 1 a 4), attribuiti sulla base dell'estensione e gravità del danno. Viceversa la "vulnerabilità" è espressa su una scala costituita da 3 livelli (bassa; media; alta) ed è desunta dal "grado delle carenze" e dal "fattore di accelerazione" (ossia indice di sicurezza). Oltre alla relazione descrittiva sulla valutazione della riparabilità redatta dai gruppi di ricerca incaricati, per ogni scuola era a disposizione altro materiale quale: il rilievo geometrico in pianta (85% del campione) e in elevato (37% del campione); la scheda AeDES (Baggio et al. 2007) che aveva sancito la chiusura della scuola e in alcuni casi anche quelle progressive compilate con il susseguirsi delle varie scosse; il rilievo del danno corredato anche di una puntuale localizzazione delle lesioni (22% del campione); la "Scheda di sintesi DPC" (3% del campione); eventuali ulteriori studi a disposizione dell'amministrazione (quali relazioni geologiche o sugli interventi di miglioramento/adequamento svolti). Questi dati sono stati poi integrati dagli autori verificando la distanza dagli epicentri più

significativi dei fabbricati e la disponibilità degli studi di microzonazione (72% del campione) che, come noto, sono stati avviati in maniera estesa nel Centro Italia a seguito della sequenza 2016/2017 (Pagliaroli et al. 2019); quest'ultimi potranno essere molto utili per approfondimenti relativi alla potenziale influenza sulla risposta dei fabbricati in relazione a fenomeni di amplificazione locale di sito. E' inoltre in corso di finalizzazione l'integrazione di tali dati con alcune misure dell'intensità degli eventi (integrandoli con i dati già raccolti in Di Ludovico et al. 2019).

A partire dal materiale a disposizione, per ciascun edificio sono stati raccolti i dati ed inseriti all'interno di due database: uno più generale ed uno di dettaglio.

Il database generale è formato dalle seguenti sezioni: i) localizzazione e dati sul sito in cui è edificata la scuola (morfologia di sito, categoria di sottosuolo, dati sulla pericolosità di progetto); ii) caratteristiche geometriche, costruttive, morfologiche ed eventuali interventi di consolidamento; iii) fattori di vulnerabilità; iv) risposta al terremoto durante la sequenza sismica del Centro Italia 2016 (modalità di danno attivate, livello di danno).

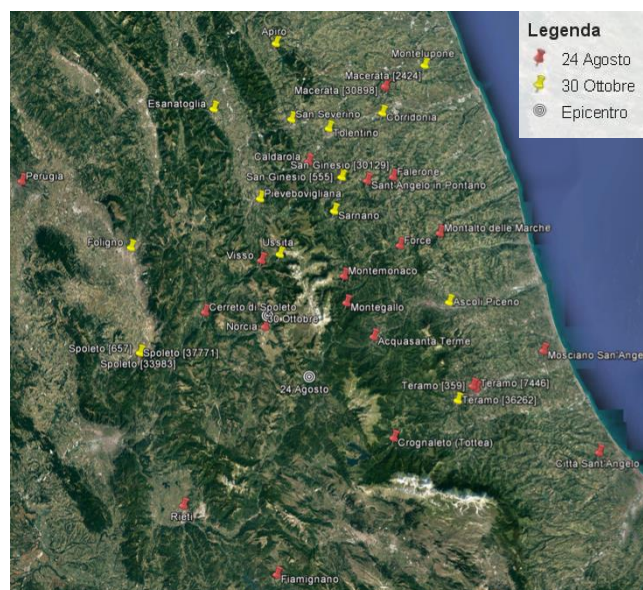


Figura 1. Localizzazione delle scuole presenti nel database di riferimento.

Il database di dettaglio è finalizzato a raccogliere e rielaborare dati necessari all'applicazione di modelli di vulnerabilità, anche di tipo analitico-meccanico quali: l'area resistente (calcolata a partire dalle piante a disposizione) definita per le diverse tipologie di muratura, l'altezza di interpiano, la snellezza delle pareti, la/le tipologia/e di materiali presenti (cui sono associati parametri di riferimento ove disponibili dalle indicazioni delle schede oppure secondo gli

intervalli di riferimento proposti nella Circolare no. 7 del 21 Gennaio 2019), la/le tipologia/e dei solai (indicando anche la percentuale di estensione nel caso di più tipologie e la principale direzione di scarico), indicazioni sulle fasce murarie e la dimensione media delle aperture in entrambe le direzioni.

### 3 EPOCA E CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE-GEOMETRICHE

Con riferimento al campione di edifici scolastici in esame, si è in primo luogo valutata la posizione del plesso scolastico nel contesto urbano, quindi se isolata o in aggregato. Al riguardo è necessario distinguere tra plesso scolastico e unità strutturali (US) di cui è composto (Figura 2). In svariati casi infatti il plesso scolastico è isolato nel suo complesso (70%), ma formato da svariate unità strutturali (in cui sono spesso allocate le diverse funzioni, quali materna, primaria, etc.) che interagiscono tra loro (il 67% infatti risulta in aggregato, Figura 3) Nel seguito il riferimento è posto esclusivamente alle unità strutturali; si precisa che 2 delle 60 risultano in c.a., realizzate a seguito di interventi di ampliamento. Di quest'ultime si ometterà la descrizione delle caratteristiche tipologiche-costruttive focalizzata esclusivamente sulle US in muratura.

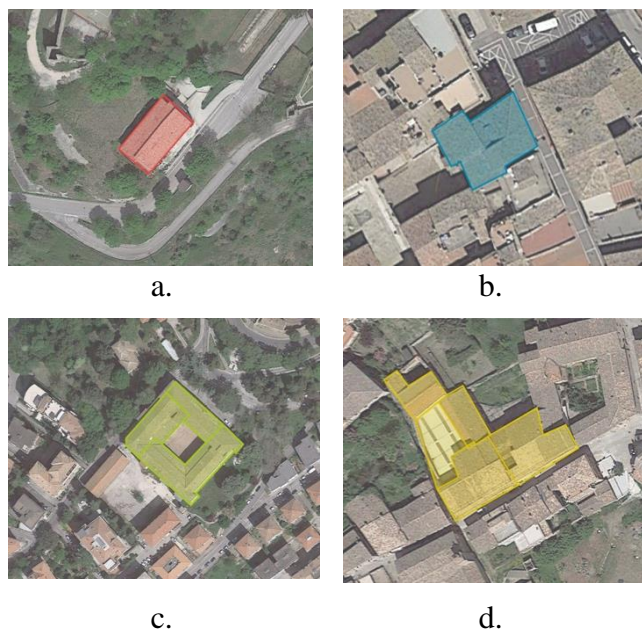


Figura 2. Esempio di pianta di plesso scolastico a) isolato – u.s. isolata, b) aggregato – u.s. isolata; c) isolato – u.s. aggregate; d) aggregato – u.s. aggregate

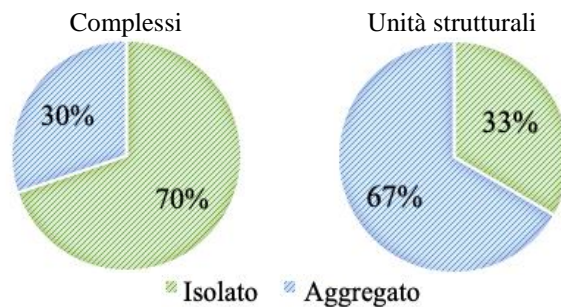


Figura 3. Distribuzione del campione: edifici isolati e in aggregato.

Dalla distribuzione del numero di piani (Figura 4.a) risulta che la maggior parte delle US (50%) sono composte da 3 piani mentre raramente le unità strutturali hanno più di 4 piani (quello di sei è una parte in c.a.). Per quanto riguarda l'epoca di costruzione (Figura 4.b) il 45% delle US è stata realizzata prima del 1919 (percentuale che riflette in generale anche il dato ISTAT a scala nazionale sugli edifici residenziali), mentre solo il 10% risulta di un'epoca più moderna (dopo il 1961)

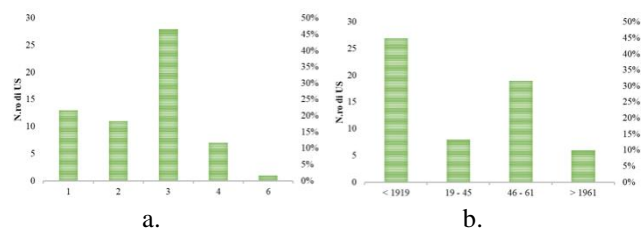


Figura 4. Distribuzione del campione: a) Numero di piani; b) Epoca.

E' utile precisare che, nel caso delle US edificate pre 1919, il 31% è stato trasformato in una scuola a seguito di una variazione della destinazione d'uso. Questo giustifica anche alcune forme piuttosto articolate, spesso più proprie della configurazione ad esempio di monasteri/conventi o palazzi monumentali come nel seguito ripreso.

Riguardo le forme planimetriche (Figura 5), il 58% del campione è di forma rettangolare, mentre percentuali minime caratterizzano le forme più complesse. La forma "rettangolare allungata" si riferisce ai casi in cui il rapporto tra i lati del rettangolo in cui la costruzione è inscritta risulta superiore a 4 (NTC 2018).

Incrociando il dato sulla forma planimetrica con l'epoca, ed in particolare per le US realizzate prima del 1919 riconvertite, è emerso che le forme più complesse (ad esempio gli edifici a corte), per la maggior parte sono diventate scuole a seguito di un cambio di destinazione d'uso. Riguardo l'estensione in pianta, prevalgono nel campione esaminato US di dimensioni ridotte:

oltre il 60% degli edifici ha un'area di piano inferiore ai 500 mq (Figura 6.a). Inoltre risulta che le forme in pianta "regolari" (rettangolare, rettangolare con corte - Figura 7.a, quadrata e quadrata con corte) sono associate alle aree di piano inferiori, mentre quelle irregolari (rettangolare allungata, C - Figura 7.b, L e T) a quelle più estese (Figura 6.b).

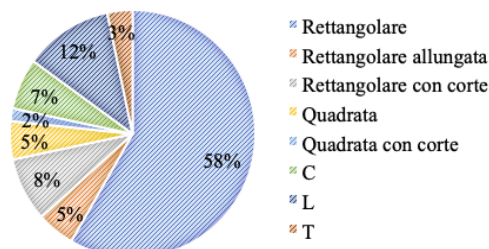


Figura 5. Distribuzione del campione: Forma in pianta.

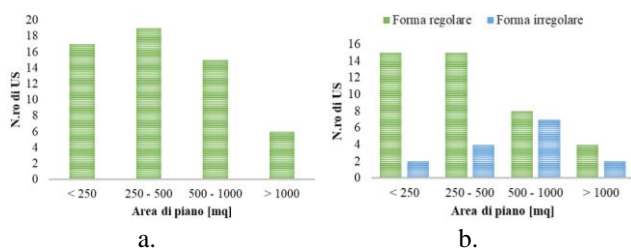


Figura 6. Distribuzione del campione: a) Area di piano; b) Area di piano e forma in pianta.

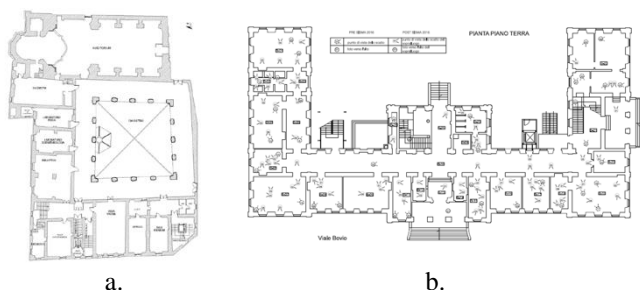


Figura 7. Forma in pianta: a) Rettangolare a corte; b) C.

#### 4 CARATTERISTICHE TIPOLOGICO-COSTRUTTIVE

La Figura 8 caratterizza il campione in relazione alla tipologia muraria avendo classificato come:

- Regolare: le murature afferenti alle classi muratura in mattoni pieni e malta di calce, muratura in mattoni semipieni con malta cementizia e muratura a blocchi lapidei squadriati definite nella Circolare n.7 del 2019;
- Mediamente regolare: le murature afferenti alle classi muratura in pietre a spacco con buona tessitura definite nella Circolare n.7 del 2019;

- Irregolare: le murature afferenti alle classi muratura in pietrame disordinata, muratura a conci sbalzati con paramenti di spessore disomogeneo e muratura irregolare di pietra tenera definite nella Circolare n.7 del 2019;
- Composta: le murature costituite da due paramenti di differente composizione.

Per alcuni edifici (4 US) non è stato possibile attribuire la tipologia muraria in quanto in alcuni le murature erano intonacate e non erano indicate informazioni al riguardo nei dati a disposizione, mentre in altri non vi era una descrizione dettagliata dell'US in quanto parte di aggregato non coinvolto nell'inagibilità del complesso edilizio. Incrociando la tipologia muraria con l'epoca di costruzione è evidente come negli edifici più moderni sia presente una tipologia muraria regolare mentre per quelli più antichi la distribuzione risulta maggiormente dispersa (Figura 9). Le percentuali sono calcolate sul totale degli edifici divisi per epoca.

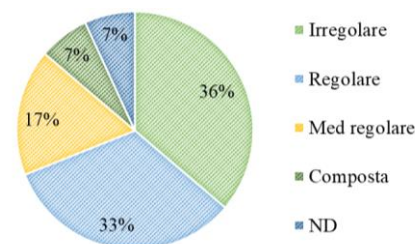


Figura 8. Distribuzione del campione: Tipologia di muratura.

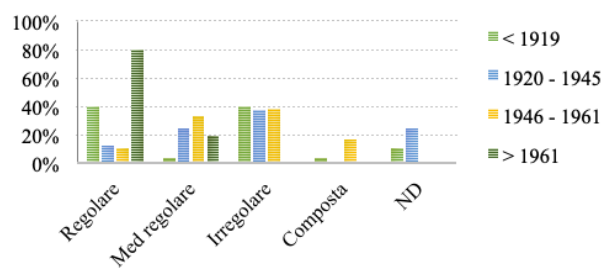


Figura 9. Distribuzione del campione: Tipologia di muratura ed epoca di costruzione.

Per quanto riguarda le tipologie di solai che caratterizzano il campione è prevalente la presenza di solai in latero-cemento mentre in misura minore di solai lignei, volte e impalcati realizzati con putrelle e voltine (Figura 10.a). E' interessante poi correlare questo dato con le US che hanno subito interventi di consolidamento (pari al 65%), così come risultato dal reperimento della documentazione specifica mirata alla conoscenza delle US in esame da parte delle UR incaricate. Dall'analisi delle tipologie di interventi più ricorrenti (Figura 10.b), si può osservare come il rifacimento dei solai sia

risultata la tipologia di intervento più presente e caratterizza principalmente proprio i corpi strutturali realizzati prima del 1919.

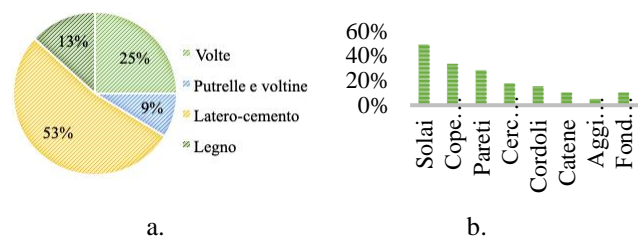


Figura 10.: a) Tipologia di solaio; b) Tipologia di interventi.

Nel seguito sono esaminati i dati in relazione alle cosiddette “carenze” introdotte nell’O.P.C.M. n. 14 del 14/02/2013 (cui si rimanda per l’elenco dettagliato) e necessarie per assegnare il livello di vulnerabilità. Tali carenze sono state raggruppate nel seguito in tre macro-categorie in relazione all’aspetto della risposta strutturale che si reputa influenzino maggiormente:

- 1) qualità muraria (dalla 3 alla 8);
- 2) qualità dei collegamenti (9,13,14 e 16);
- 3) impianto strutturale (1,2,10,11,12,15,18, 19).

In particolare, per carenze che definiscono la “qualità muraria” si intendono quei fattori che influenzano le caratteristiche meccaniche della muratura, quali ad esempio la tessitura muraria, la qualità della malta o la presenza di più paramenti senza efficaci collegamenti o diatoni. Per “qualità dei collegamenti” si intendono i dettagli costruttivi atti a promuovere una risposta scatolare della struttura, quali ad esempio la connessione della muratura nelle angolate, il collegamento tra le strutture orizzontali e quelle verticali o della struttura di copertura a quelle verticali. Per quanto riguarda invece le carenze di impianto strutturale si intendono i fattori associati alla configurazione della maglia strutturale (percentuale di area resistente o distanza tra pareti ortogonali), eventuali solai sfalsati o murature in falso.

La Figura 11 chiarisce la tipologia/le tipologie di carenze presenti nel campione da cui risulta come la maggior parte delle stesse riguardi l’impianto strutturale (quasi il 60% degli edifici); la figura illustra quali US presentano una sola tipologia di carenza oppure viceversa una combinazione di esse o tutte.

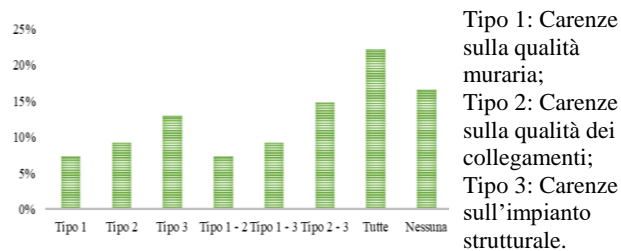


Figura 11. Distribuzione del campione: secondo le macro-categorie di carenze individuate.

## 5 LA RISPOSTA AL TERREMOTO: DANNO E VULNERABILITA’

Il campione analizzato in questa fase è composto da 54 US poiché sono state escluse dal campione i corpi in c.a. (2) e le US in aggregato che non hanno avuto esito di agibilità E (4). La limitata numerosità del campione non consente di costruire delle robuste matrici di correlazione danno – intensità – vulnerabilità inoltre è ancora in corso l’attribuzione della stima della intensità dell’evento subita da ciascuna US. Pertanto si è deciso nel seguito di focalizzare l’attenzione sulle ricorrenze delle modalità di danno occorse e la loro eventuale correlazione con le tipologie di carenze discusse al §4.

La Figura 12 sintetizza i livelli di danno globali (1-4) definiti in accordo all’ O.P.C.M. n. 14 del 14/02/2013 ed attribuiti alle US ripartiti secondo le classi di vulnerabilità (Bassa, Media, Alta, o ND). Le percentuali sono calcolate con riferimento a ciascun livello di danno. Si osserva come in generale, a fronte dell’attribuzione di esito E, il livello di danno sia per la maggior parte 1 e 2, quindi lieve- medio. I casi cui è associato un livello di danno molto grave (3 o 4) corrispondono per lo più a scuole in area epicentrale, e in un caso ad una struttura molto vulnerabile (in relazione alla qualità muraria).

La Figura 13 chiarisce le tipologie di danno occorse con maggiore ricorrenza distinguendo se esse hanno interessato: in prevalenza la risposta nel piano (con lesioni quindi concentrate nei maschi e nelle fasce murarie); quella fuori piano, modalità miste delle due precedenti; la risposta locale di elementi non strutturali; oppure porzioni molto localizzate di pareti (tipicamente in corrispondenza di discontinuità). Si osserva come la maggior parte sia riconducibile alla modalità nel piano o mista. In un numero non così trascurabile di US lo stato di danno non è stato ricondotto ad alcuna modalità specifica; si può osservare come si tratti in tutti i casi di livelli 1 o

2, quindi lievi nei quali in effetti non sempre è facile inquadrare lesioni sporadiche e ricondurle ad una precisa risposta dell'organismo strutturale.

Infine la Figura 14 illustra come sono distribuite le carenze differenziandone la ricorrenza rispetto alle modalità di danno occorse. Vi sono alcuni corpi (9 US) per i quali non sono state individuate carenze presenti nell'elenco proposto nell'O.P.C.M. n. 14 del 14/02/2013 (come già emerso anche da Figura 11); di questi casi per diversi corpi strutturali il danno è stato attribuito a problematiche relative a cedimenti fondali (1 US), a danni gravi ad elementi non strutturali (2 US), a danni provocati dall'interazione con edifici adiacenti (2 US) o a carenze di tipo manutentivo (1 US). Le restanti US delle quali non sono state identificate particolari carenze (3 US) risultano avere uno stato di danno di livello 1, ovvero meno grave.

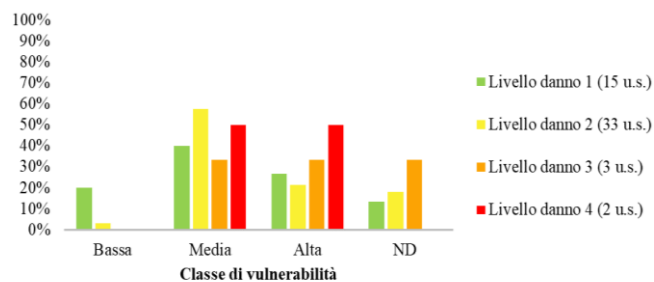


Figura 12. Stato di danno e vulnerabilità.

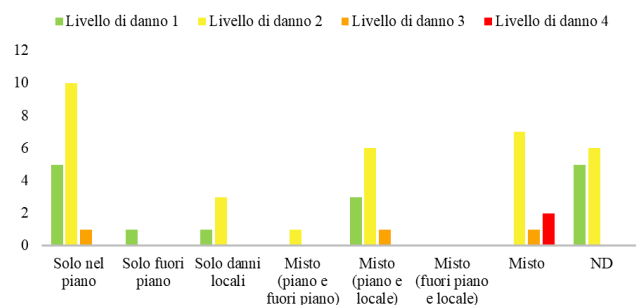


Figura 13. Stato di danno e tipologia di meccanismo

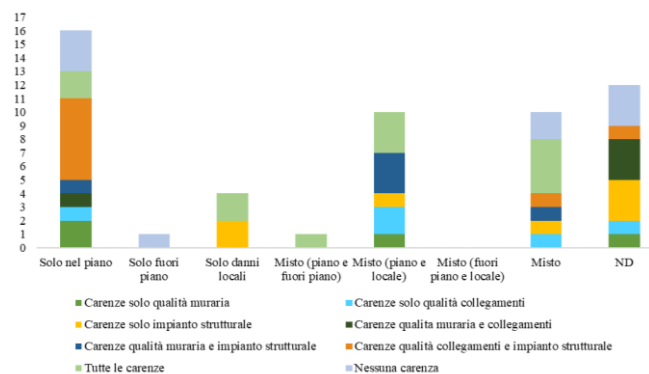


Figura 14. Ricorrenza delle carenze in funzione della tipologia di danno.

## 6 INDIVIDUAZIONE DI CASI STUDIO AI FINI DELLA VALIDAZIONE DI MODELLI DI VULNERABILITÀ

Come introdotto il campione di dati ivi esaminato, seppure limitato per effettuare rielaborazioni statistiche robuste, fornisce, tuttavia, indicazioni rilevanti in quanto rappresentativo di evidenze sulla risposta reale di tali fabbricati.

Nel campione sono stati quindi individuati alcuni casi, sintetizzati in Figura 15, idonei perché si possano prestare in futuro ai fini di validazione di modelli di vulnerabilità.

ID	2	3	13	46	8	23	29
Comune	Visso	Caldarola	Montegallo	Ussita	Teramo	Macerata	Teramo
Danno	4	4	3	3	2	2	2
Microzonazione III livello	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Rel. Rel. U.S.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sc. Aedes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Piante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tipo pianta	T	Rettangolare	Rettangolare	Quadrata	C	Rettangolare allungata	Rettangolare con corte
Sezioni	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rilievo danno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Altro	Relazioni di calcolo	Relazioni geotecniche			Calcolo strutture		

Figura 15. Dati a disposizione e livello di danno per i casi benchmark selezionati

In particolare, sono stati individuati 7 casi studio sulla base dell'analisi congiunta della completezza dei dati a disposizione (i), delle caratteristiche tipologiche geometriche e costruttive (ii) (perché fossero rappresentativi delle tipologie più ricorrenti emerse dall'analisi illustrata al §3 e §4) e della significatività della risposta subita in relazione al livello di danno e al giudizio di vulnerabilità (iii). In Figura 15, oltre all'ID di riferimento del database ed al comune in cui tali scuole sono situate, sono sintetizzati il livello di danno e i dati a disposizione per ciascuno di essi, quali la presenza della scheda AeDES, dei rilievi geometrici in pianta e in elevato, il rilievo del danno integrato dalla localizzazione delle lesioni (e non solo una sommaria descrizione degli stessi) ed eventuali altri dati aggiuntivi (quali relazioni di calcolo eseguite da studi professionisti o indagini strutturali e geologiche eseguite in sito). Inoltre è stata inserita la disponibilità degli studi di microzonazione sismica (MS) avviati in maniera estesa nel Centro Italia a seguito della sequenza 2016/2017; il simbolo arancione indica quei casi per i quali il comune di riferimento risulta facente parte dei comuni finanziati per l'esecuzione di tali studi, ma dei quali ancora non sono pubblici o disponibili i risultati. La disponibilità dei dati sulla MS è importante per effettuare approfondimenti sulla stima dell'intensità subita

dall'edificio e sul potenziale ruolo giocato dai fenomeni di amplificazione locale. Il gruppo di scuole ben rappresenta la varietà delle tipologie planimetriche ricorrenti discussa al §3.

Tra le scuole si annoverano le scuole P.Capuzi di Visso (ID2) e l'istituto comprensivo "S.De Magistris" a Caldarola (ID 3), entrambe ad oggi demolite e caratterizzate da un danno gravissimo. La prima era oggetto di monitoraggio permanente da parte dell'Osservatorio Sismico delle Strutture e per la quale sono a disposizione informazioni molto accurate già rielaborate anche in altre linee del progetto ReLUIS 2017/2018 (Cattari et al. 2019). Il caso è interessante per il gravissimo danno subito prevalentemente associato alla risposta nel piano delle pareti (solo a seguito di fenomeni di accumulo del danno si è attivato il ribaltamento parziale di un prospetto) e per la configurazione geometrica-strutturale tipica delle piante con forma irregolare a T (Figura 16). Anche nel caso della seconda la risposta occorsa è prevalente nel piano con lesioni concentrate nei maschi murari al secondo livello e l'attivazione di un meccanismo locale in parte del prospetto principale (Figura 17.a). Sebbene tuttavia nel caso della scuola di Visso la gravità del danno è giustificata dall'intensità dell'azione (trovandosi la scuola in area fortemente epicentrale a partire dalle scosse del 26 e 30 ottobre 2016) a fronte di efficaci dettagli costruttivi (sebbene parzialmente inficiati dall'irregolarità planimetrica), nel caso dell'istituto comprensivo "S.De Magistris" a Caldarola la risposta appare fortemente inficiata dalla forte vulnerabilità indotta dalla qualità muraria, caratterizzata da una muratura a doppio paramento con scarso ammorsamento trasversale e bassa aderenza della malta alla pietra.

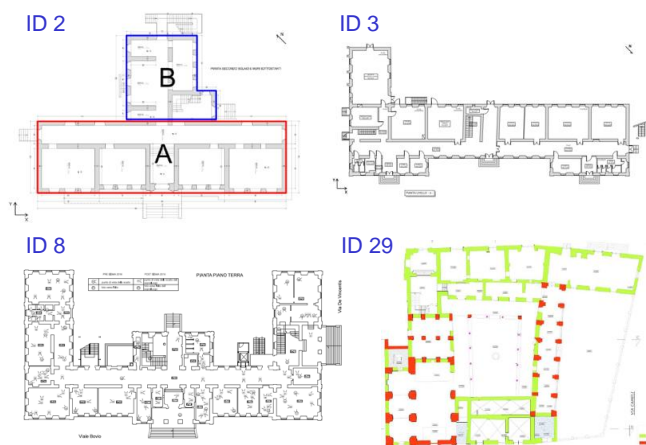


Figura 16. Piante di alcune scuole selezionate dal campione come potenziali edifici benchmark ai fini della validazione di modelli di vulnerabilità



a.



b.

Figura 17. Grave danno attivatosi nelle scuole di Visso (ID2,a) e Caldarola (ID3,b)

La Scuola elementare e materna "Giuseppe Rizzi" di Montegallo (ID 13) è interessante per la configurazione delle aperture tipica di svariati complessi scolastici che configurano maschi piuttosto tozzi nei quali le lesioni a taglio si sono concentrate (Figura 18.a). Inoltre un saggio demolitivo ha evidenziato la mancanza di ammorsamento tra le pareti trasversali, realizzate in occasione degli interventi di consolidamento subiti dalla struttura nel 2004, e la muratura originale (Figura 18.b).



a.



b.

Figura 18. Danno manifestato dalla Scuola elementare e materna "Giuseppe Rizzi" di Montegallo

Nella Scuola dell'infanzia "Pietro Gasparri" di Ussita (ID 46) sono stati riscontrati gravi danni agli elementi strutturali (Figura 19), quali lesioni diagonali nelle pareti portanti e lesioni in corrispondenza dei solai, e danni significativi anche agli elementi non strutturali in particolare nel rivestimento in mattoni pieni di facciata. La



scuola presenta svariate carenze, quali l'irregolarità in pianta e il forte pendio sul quale è stata costruita.



Figura 19. Danno manifestato dalla Scuola dell'infanzia "Pietro Gasparri" di Ussita

Il Complesso scolastico "Comi" di Teramo (ID 8) è interessante per le caratteristiche tipologiche geometriche, rappresentativo della forma planimetrica in pianta a "C" (Figura 16.ID8).

L'Istituto Comprensivo "Enrico Mestica" di Macerata (ID 23) è un complesso in aggregato composto da tre unità strutturali differenti. Risulta interessante un'unità strutturale del complesso, nel quale il danno si è concentrato, caratterizzata dalla forma planimetrica rettangolare allungata, dalla mancanza di pareti portanti trasversali alla direzione principale dell'edificio e dalla presenza di orizzontamenti in legno deformabili. Il principale danno si è verificato negli elementi non strutturali in corrispondenza di tramezze e controsoffitti (Figura 20.a), mentre per gli elementi strutturali si sono evidenziate lesioni in corrispondenza del collegamento con il corpo adiacente (Figura 20.b), acuite anche dalla presenza di quote sfalsate dei solai.

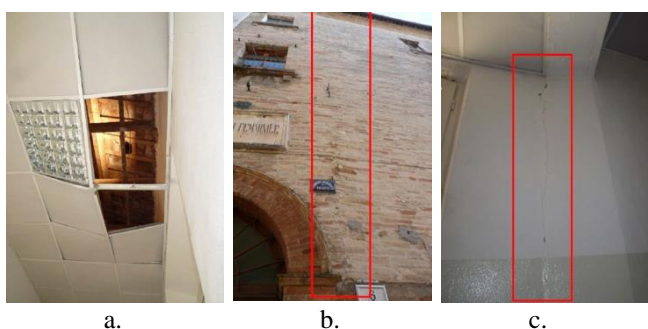


Figura 20. Danno manifestato dal Complesso scolastico "Comi" di Teramo

Infine l'Istituto Statale Superiore "Gaetano Braga" di Teramo (ID 29) è interessante per alcune carenze relative sia all'impianto strutturale, quali presenza di murature portanti snelle e in falso, che alla qualità muraria e dei collegamenti. Il principale danno che si è verificato negli elementi strutturali corrisponde a

lesioni diffuse di ampiezza inferiore a 3 mm e distacchi fra le strutture verticali ed orizzontamenti (Figura 21).



Figura 21. Danno manifestato dall'Istituto Statale Superiore "Gaetano Braga" di Teramo negli orizzontamenti

## 7 CONCLUSIONI

L'articolo presenta alcune rielaborazioni dei dati acquisiti su un campione di 43 plessi scolastici in muratura dichiarati inagibili (ossia con esito E secondo la scheda di rilievo del danno AeDES) a seguito del terremoto che ha colpito il Centro Italia nel 2016/2017 e dei quali le informazioni erano state acquisite attraverso l'attività di supporto affidata dal Commissario per la Ricostruzione al Consorzio ReLUIS tramite il Dipartimento di Protezione Civile (Di Ludovico et al. 2017). Nonostante la limitata numerosità del campione i dati confermano alcune caratteristiche ricorrenti del costruito esistente in muratura, ed in particolare scolastico. Dal campione sono identificati alcuni casi studio che potranno essere in futuro utili ai fini di validazione di modelli di vulnerabilità e per i quali è in corso la finalizzazione della raccolta di tutti i parametri meccanici e costruttivi a disposizione.

## RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca è stata svolta grazie ai finanziamenti del progetto ReLUIS 2019 WP4-*Mappe di rischio e scenari di danno sismico (MARS)* (Coord. Proff. S.Lagomarsino e A.Masi).

## REFERENCES

- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Bella, M., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., Papa, F., and Zuccaro, G., 2007. *Field Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES)*. JRC Scientific and Technical Reports. ISPRA, Italy.
- Calderini, C., Cattari, S., Lagomarsino, S., Podestà, S., Scandolo, L., Sivori, D., 2017. Vulnerabilità e risposta sismica di edifici scolastici: esperienze dall'evento sismico del Centro Italia del 2016. *XVII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 18-21, Pistoia, Italia.

- Cattari, S., Degli Abbatì, S., Ottonelli, D., Marano, C., Camata, G., Spacone, E., da Porto, F., Modena, C., Lorenzoni, F., Magenes, G., Penna, A., Graziotti, F., Ceravolo, R., Miraglia, G., Lenticchia, E., Fiorini, N., Spina, D., 2019. Discussion on data recorded by the Italian structural seismic monitoring network on three masonry structures hit by the 2016-2017 Central Italy earthquake. *7<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN*, June 24-26, Crete, Greece.
- Circolare Esplicativa 7, 2019. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circ. C.S.LI.Pp. No. 7 21/1/2019. *Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018*. G.U. S.O. n.5 del 11/2/2019, No. 35.
- Di Ludovico, M., Digrisolo, A., Graziotti, F., Moroni, C., Belleri, A., Caprili, S., Carocci, C., Dall'asta, A., De Martino, G., De Santis, S., Ferracuti, B., Ferretti, D., Fiorentino, G., Mannella, A., Marini, A., Mazzotti, C., Sandoli, A., Santoro, A., Silvestri, S., Sorrentino, L., Magenes, G., Masi, A., Prota, A., Dolce, M., Manfredi, G., 2017a. The contribution of ReLUIs to the usability assessment of school buildings following the 2016 central Italy earthquake. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **58**, DOI 10.4430/bgta0192.
- Di Ludovico, M., Moroni, C., Abruzzese, D., Borri, A., Calderoni, B., Caprili, S., Dall'Asta, A., da Porto, F., De Martino, G., de Matteis, G., Ferracuti, B., Lagomarsino, S., Magenes, G., Mannella, A., Marini, A., Masi, A., Mazzotti, C., Nuti, C., Santoro, A., Sorrentino, L., Spacone, E., Verderame, G.M., Prota, A., Dolce, M., Manfredi, G. 2017b. Il contributo di ReLUIs nelle attività di supporto all'emergenza sismica del Centro Italia 2016. *XVIII Convegno ANIDIS, L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 18-21, Pistoia, Italia.
- 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 after the Central Italy earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp. 1-22.
- Di Ludovico, M., Santoro, A., De Martino G., Moroni, C., Prota, A., Dolce, M., Manfredi, G., 2019. Cumulative damage to school buildings following the 2016 central Italy earthquake sequence. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **60**(2).
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Conte, C., De Martino, G., 2019a. Attuazione del Piano nazionale italiano per la prevenzione del rischio sismico: l'adeguamento degli edifici strategici e rilevanti. *XVIII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 15-19 Ascoli Piceno, Italia.
- Dolce, M., Borzi, B., Da Porto, F., Lagomarsino, S., Moroni, C., Penna, A., Prota, A., Speranza, E., Zuccaro, G., Verderame, G. M., 2019b. Mappe di rischio sismico per il territorio italiano. *XVIII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 15-19, Ascoli Piceno, Italia.
- Gattesco, N., Franceschinis, R., Zorzini, F., Grimaz, S., Barazza, F., Leita P., Malisan, P., 2011. Soglie di priorità per l'adeguamento sismico di edifici scolastici costruiti o ristrutturati prima dell'entrata in vigore delle NTC2008. *XIV Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 18-22, Bari, Italia.
- Gattesco, N., Boem, I., 2019. Classificazione degli edifici scolastici in muratura in Friuli-Venezia Giulia, finalizzata alla costruzione di modelli di rischio. *XVIII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 15-19 Settembre, Ascoli Piceno, Italia.
- Pagliaroli, A., Pergalani, F., Ciancimino, A., Chiaradonna, A., Compagnoni, M., De Silva, F., Foti, S., Giallini, S., Lanzo, G., Lombardi, F., Luzi, L., Macerola, L., Nocentini, M., Pizzi, A., Tallini, M., Teramo, C., 2019. Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case-histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (O.P.C.M.) n. 14 del 14 febbraio 2013. *Rettifiche ed integrazioni all'Ordinanza n. 86 del 6/12/2012 "Criteri e modalità di assegnazione di contributi per la riparazione, il ripristino con miglioramento sismico o la demolizione e ricostruzione di edifici e unità immobiliari ad uso abitativo che hanno subito danni significativi dagli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 e che sono stati dichiarati inagibili (Esito E1, E2, E3)"*.
- Masi, A., Santarsiero, G., Chiauzzi, L., 2014. Development of a seismic risk mitigation methodology for public buildings applied to the hospitals of Basilicata region (Southern Italy). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **65**, 30-42.
- NTC 2018. Norme Tecniche delle Costruzioni, Decreto Ministeriale 17/1/2018. *Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n.42 del 20/2/2018.
- Saler, E., Carpanese, P., Pernechele, V., Da Porto, F., 2019. A priority-ranking procedure to assess seismic vulnerability of school buildings at territorial scale. *XVIII Convegno ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*. Settembre 15-19 Settembre, Ascoli Piceno, Italia.
- Sextos, A. De Risi, R., Pagliaroli, A., Foti, S., Passeri, F., Ausilio, E., Cairo, R., Capatti, M.C., Chiabrandò, F., Chiaradonna, A., Dashti, S., de Silva, F., Dezi, F., Durante, M.G., Giallini, S., Lanzo, G., Sica, S., Simonelli, A.L. & Zimmaro, P. 2018. Local site effects and incremental damage of buildings during the 2016 Central Italy earthquake sequence. *Earthquake Spectra*, **34**(4), 1639-1669.