



# Recenti sviluppi sulle previsioni di vulnerabilità sismica di Campi Alto di Norcia alla luce degli interventi di riparazione e/o consolidamento e del sisma Centro Italia 2016

Luca Sbrogio<sup>a</sup>, Maria Rosa Valluzzi<sup>a</sup>, Giuliana Cardani<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Beni Culturali, Università di Padova, Piazza Capitaniato 7, 35139, Padova, Italy

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy

*Keywords: edifici in muratura; interventi di consolidamento; classi di vulnerabilità; scheda GNDT II livello.*

## ABSTRACT

L'articolo presenta un'analisi della vulnerabilità e della risposta al sisma Centro Italia 2016 degli edifici in muratura del borgo di Campi Alto di Norcia (PG), sottoposti ad interventi di riparazione e/o consolidamento dopo due eventi sismici (nel 1979 e 1997), secondo i criteri dell'adeguamento sismico ante Norme Tecniche 2008.

Il rilievo del danno post 2016, eseguito in scala EMS98, evidenzia la dualità del comportamento, tra il danno non strutturale e il crollo, restituendo, in rapporto alle valutazioni di vulnerabilità già disponibili, una peculiare distribuzione bimodale del danno, che non trova corrispondenza con le indicazioni della scala.

L'aggiornamento della vulnerabilità degli edifici si è svolto nelle seguenti fasi: a) classificazione tipologica preliminare degli edifici in muratura con interventi sulla base della risposta sismica; b) rilievo della consistenza attuale degli edifici e degli interventi da essi subiti; c) rivalutazione della vulnerabilità mediante la scheda GNDT di II livello (aggiornamento 2004) considerando il reale contributo (peggiorativo o migliorativo) degli interventi; d) estrazione dell'indice di vulnerabilità e conversione nella classe tipologica EMS98.

In rapporto a quest'ultima valutazione vengono infine compilate, rispetto alle nuove classi di vulnerabilità, le matrici di danno (DPM) individuando una categoria ad elevata vulnerabilità responsabile dell'irregolarità della distribuzione. Tutte informazioni raccolte hanno trovato ordine e sistematicità all'interno di un sistema GIS appositamente studiato per queste valutazioni.

Grazie alle procedure di valutazione aggiornate, spicca la presenza di una classe di edifici ad altissima vulnerabilità che può essere ritenuta la responsabile dell'irregolarità nelle DPM. L'ampliamento del campione e un ancor più puntuale approfondimento della consistenza degli interventi, ad esempio accedendo alla documentazione edilizia di archivio, permetterà una più precisa categorizzazione degli edifici con interventi all'interno delle classi di vulnerabilità proposte dalla EMS98.

## 1 INTRODUZIONE

Il terremoto Centro Italia 2016 ha confermato quanto già il sisma Umbria Marche 1997 aveva mostrato: gli interventi strutturali sugli edifici storici in muratura non possono dirsi *sempre* migliorativi. In rapporto ad una categoria ormai ampia, poiché le prime norme sulla riparazione e il consolidamento risalgono al 1979, la vera novità consiste nella capacità degli interventi di influenzare anche il rilievo macrosismico. Grazie alla scelta di un caso studio, il borgo di Campi Alto di Norcia (PG), ristretto e diffusamente interessato da interventi, risultano evidenti gli effetti di questi ultimi sulla distribuzione del danno e la

classificazione di vulnerabilità. La migliore conoscenza degli edifici e della qualità muraria, in particolare in rapporto a natura e combinazione degli interventi, resa possibile da un metodo di secondo livello, quale la scheda GNDT, risulta un requisito minimo per l'individuazione del "vero", ancorché in modo qualitativo, comportamento sismico.

### 1.1 Cenni sulla valutazione macrosismica di danno e di vulnerabilità

I rilievi macrosismici a livello territoriale fanno riferimento di solito alla scala MCS (Sieberg 1930, Galli et al. 2009, Galli et al. 2017) ma per la scala

urbana è recente l'impiego della EMS 98 (Grünthal 1998) per il rilievo del danno e della vulnerabilità del centro storico di L'Aquila colpito dal sisma del 2009 (Tertulliani et al. 2011).

In quest'ultima scala, l'intensità raggiunta in una certa località viene determinata assegnando gli edifici ad una opportuna classe di vulnerabilità (da A ad F) e, successivamente, confrontando le percentuali di danno raggiunte per singola classe con le definizioni quantitative fornite da "matrici di probabilità di danno" (DPM) solo parzialmente definite. Vari metodi presenti in letteratura consentono il completamento della distribuzione (Giovinazzi 2005, Bernardini et al. 2007)

A partire dalle caratteristiche della muratura è possibile, seguendo le indicazioni di letteratura (Bernardini 2000; Valluzzi et al. 2019b), proporre le regole di corrispondenza tra i tipi strutturali elencati nella scala EMS 98 e i tipi di muratura descritti dalla normativa tecnica (DM 14/01/2008 e DM 17/01/2018; cfr. Tabella 1) o nelle schede di rilievo di I livello.

L'individuazione più precisa della classe è da farsi tuttavia in funzione della combinazione tra la struttura resistente verticale (tipo e qualità della muratura) e strutture orizzontali (solai da totalmente deformabili a totalmente rigidi) secondo quelle che possono essere le indicazioni AeDES (Dolce et al. 2014) o di altre analoghe (Dolce e Goretti 2015; cfr. Figura 1 e Tabella 2).

Strutture verticali \ Strutture orizzontali		Strutture in muratura										
		Non identificate		A tessitura irregolare e di cattiva qualità (Pietrame non squadrato, ciottoli,...)		A tessitura regolare e di buona qualità (Blocchi, mattoni, pietra squadrata,...)		Pilastri isolati	Mista	Rinforzata		
		Senza catene o cordoli	Con catene o cordoli	Senza catene o cordoli	Con catene o cordoli	A	B	C	D	E	F	G
1 Non identificate	○	■	■	■	■	■	■	■	■	SI	■	■
2 Volte senza catene	■	■	■	■	■	■	■	■	■	○	G1	H1
3 Volte con catene	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4 Travi con soletta deformabile (travi in legno con semplice tavolato, travi e voltine,...)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	NO	G2	H2
5 Travi con soletta semirigida (travi in legno con doppio tavolato, travi e tavelloni,...)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	○	■	■
6 Travi con soletta rigida (solai di c.a., travi ben colligate a solette di c.a.,...)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	G3	H3

Figura 1. Tabella ad incroci per l'identificazione tipologica delle componenti strutturali dell'edificio estratta dalla Scheda AeDES. Il tono di grigio è correlato alla vulnerabilità (più scuro=più vulnerabile).

Tabella 1. Proposta di corrispondenza tra le classi di vulnerabilità originali della scala EMS 98 e i tipi murari previsti dalle Norme Tecniche (2008/2018).

Classe tipologica EMS 98	Traduzione proposta	Classe di vulnerabilità EMS 98	Tipologia di muratura secondo NTC 2008/2018
Rubble stone, fieldstone	Muratura in ciottoli e pietre irregolari per edifici ordinari	A	Muratura in pietrame disordinata ciottoli, pietre erratiche e irregolari; Muratura a conci sbozzati con paramento di limitato spessore e nucleo interno
Simple stone	Muratura in pietra sbozzata o lavorata per edifici ordinari	A-B	Pietra a spacco con buona tessitura; Muratura a conci sbozzati con paramento di limitato spessore e nucleo interno
Massive stone	Muratura in Pietra da taglio per edifici di pregio*	B-C	Muratura a blocchi lapidei squadrati
Unreinforced brick/concrete blocks	Muratura in Mattoni pieni/ blocchi in cls/ pietra lavorata e solai in legno	B	Muratura in mattoni pieni e malta di calce
Unreinforced brick with RC floors	Muratura in Mattoni/blocchi con solai rigidi	B-C	Blocchi laterizi o in cls semipieni e malta cementizia
Reinforced or confined	Muratura Rinforzata o confinata	D-E	-

\*La distinzione tra edifici ordinari e di pregio è prevista già dalla Scala EMS 98.

Tabella 2. Regola di conversione tra i tipi di componenti strutturali e le classi di vulnerabilità EMS 98 (tratta da Dolce e Goretti 2015).

Str. verticali \ Str. orizzontali	Cattiva qualità		Buona qualità	
	Senza catene/cordoli	Con catene/cordoli	Senza catene/cordoli	Con catene/cordoli
Volte senza catene	A	A	A	B
Volte con catene	A	B	A	B
Solai deformabili	A	B	A	B
Solai semirigidi	A	B	B	C
Solai rigidi	B	B	C	C

È possibile notare che, in tutte le matrici di corrispondenza proposte, la combinazione “solaio rigido/cordolo-muratura di scarsa qualità” non corrisponde alla classe peggiore tra tutte (A) ma a quella immediatamente superiore (B); inoltre non esiste una reale distinzione di classe tra l’edificio in muratura privo di qualsiasi intervento (muratura di scarsa qualità, assenza di collegamenti, solai deformabili), e quello con gli interventi, specie se eseguiti solo sugli orizzontamenti e non sulle murature oppure non raggiungendo l’efficacia di questi ultimi. Nel ricordato lavoro su L’Aquila (Tertulliani et al. 2011) la classe di vulnerabilità veniva assegnata “a vista”, senza tenere conto degli interventi moderni e gli edifici storici del centro ricadevano per lo più in classe B.

La scala EMS 98 presuppone che, per ciascuna classe di vulnerabilità, la distribuzione dei livelli di danno debba seguire uno degli andamenti esposti in Figura 2 da cui sono estratte le DPM per i soli estremi superiori di ogni classe.

Esistono poi delle tecniche per estrarre le distribuzioni complete a partire dalle indicazioni sintetiche della EMS, sempre ipotizzandone delle distribuzioni unimodali (Giovinazzi 2005; Bernardini et al. 2007), che forniscono ad esempio i grafici riportati in Figura 3.

Supponendo che in un determinato centro storico, gli edifici presentino classi di vulnerabilità vicine (esempio entro i limiti A-C per gli edifici in muratura), la distribuzione complessiva, ottenuta come somma delle distribuzioni delle singole classi, dovrebbe essere analoga all’andamento delle classi prese singolarmente (cfr. le classi A-C di Figura 3). Se, al contrario, nella stessa località, coesistono edifici con classi di vulnerabilità molto distanti (es. dalla A fino alla D-E) la distribuzione globale, somma delle singole distribuzioni, presenterà un andamento derivato ad esempio dalla somma delle curve “a” e “c” di Figura 2, il quale non è immediato ricondurre ad uno specifico grado di intensità (cfr. classi A e D di Figura 3).

### 1.2 La metodologia GNDT di II livello e la vulnerabilità degli edifici con interventi

La scheda GNDT di II livello muratura (Benedetti e Petrini 1984) è uno strumento spesso impiegato per studi di vulnerabilità a scala urbana (cfr. tra gli altri, Vicente et al. 2011, Cara et al. 2018) non richiedendo l’implementazione di modelli ma la sola acquisizione del rilievo geometrico delle unità allo studio, con contestuale ispezione visiva accurata.

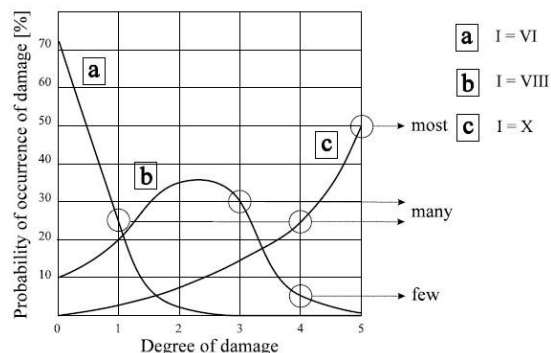


Figura 2. Relazione tra distribuzioni di danno tipiche per classe di vulnerabilità e livello di intensità macrosismica (da Grünthal 1998).

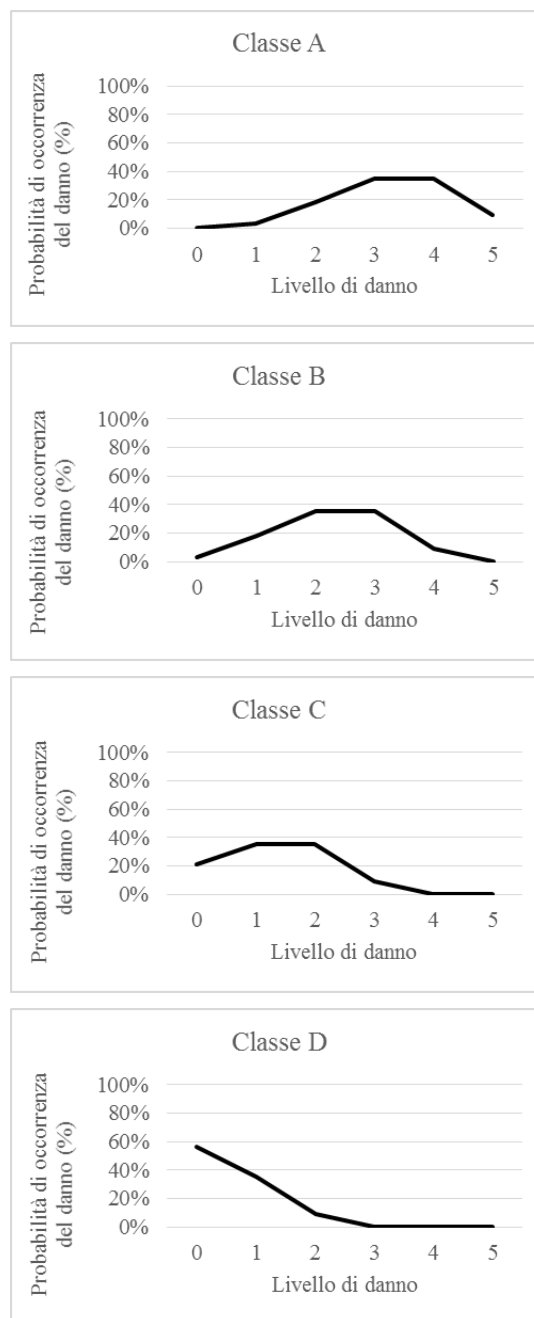


Figura 3. Andamento dei livelli di danno secondo la EMS-98 per intensità macrosismica pari al grado VIII in funzione della classe di vulnerabilità. Grafici ottenuti dalle DPM proposte da Bernardini et al. (2007).

La consultazione delle pratiche edilizie, per avere traccia degli interventi strutturali eseguiti, non sempre facilmente osservabili in sito al di sotto delle finiture, si rende necessaria alla luce dei più recenti aggiornamenti della metodologia.

La scheda GNDT produce un punteggio assoluto, facilmente trasformabile in un indice normalizzato, esprimibile in percentuale (indice di vulnerabilità, Iv), del quale sono state proposte varie regole di conversione in un giudizio verbale (Cifani et al. 2006) o nella classe di vulnerabilità EMS 98 (Giovinazzi 2005), come mostrano i primi due gruppi di Tabella 3. Alcune modifiche alla procedura originale (Ferrini et al. 2004) sono finalizzate, da un lato, a migliorare la compilazione della scheda, ampliando gli esempi e specificando meglio alcuni aspetti; dall'altro a computare gli effetti degli interventi di rinforzo poiché si «scarta a priori l'ipotesi che l'intervento sia stato eseguito a regola d'arte o abbia ottenuto il massimo grado di efficacia come invece si supponeva nella precedente versione del manuale».

L'aggiornamento interessa in particolare i pesi attribuiti ai parametri 1 ("Sistema resistente"), 5 ("Orizzontamenti"), 9 ("Coperture") dando la possibilità di attribuire il giudizio peggiore, corrispondente, secondo la procedura di Petrini, alla classe D, quando l'edificio presenti solai, cordoli e/o coperture in breccia su murature scadenti o a doppio paramento. Il parametro 7 ("Regolarità in elevazione") può essere peggiorato se sono presenti interventi sulla muratura solo su alcuni livelli dell'edificio. Dal confronto tra la procedura originale e l'aggiornamento, si può osservare, in rapporto all'aumento dei pesi e del punteggio totale (da 393,75 a 438,75), un abbassamento dell'indice globale con uno scarto attestato attorno al 10%. Si è ritenuto opportuno

aggiornare la regola di conversione così come viene riportata nell'ultimo gruppo di Tabella 3.

## 2 CAMPI ALTO DI NORCIA: EFFETTI DEL SISMA CENTRO ITALIA 2016 E CLASSIFICAZIONI DI VULNERABILITÀ

### 2.1 Il borgo di Campi Alto

Campi Alto è una frazione del comune di Norcia (PG) situata a circa 900 m s.l.m. sullo scosceso versante nord della valle Castoriana che dalla Forca di Ancarano scende verso Preci. L'abitato è caratterizzato da una notevolissima omogeneità edilizia poiché le unità, sviluppate nel senso della profondità, presentano due-tre livelli fuori terra, il primo dei quali seminterrato, voltato a botte e a diretto contatto con la roccia della montagna, i successivi originariamente coperti con strutture in legno. L'aggregazione è del tipo seriale a schiera, in lunghe file parallele alle curve di livello. La muratura è di scarsa qualità, a due paramenti non collegati, con pietre di piccola dimensione e malta di calce e terra (Cardani 2004).

La storia sismica della località è piuttosto tormentata: oltre agli eventi distruttivi del 1703 e del 1730, in epoca più recente, Campi Alto si è trovato nella zona epicentrale dei terremoti Umbria-Marche 1979 e Centro Italia 2016 oltre ad aver risentito del sisma Umbria-Marche 1997 (Munari 2010, Cardani 2017). Numerosi gli studi già compiuti sul borgo: sono disponibili i dati grafici, i materiali, le tecniche costruttive, gli interventi e la risposta sismica degli edifici ai diversi eventi ante 2016 (Cardani 2004); il rilievo del danno recente (Darù 2018); la valutazione sintetica di vulnerabilità, espressa come giudizio verbale e classe EMS 98 (Munari 2010) ottenuta dalla procedura Vulnus (Bernardini et al. 1990).

Tabella 3. Regole di conversione dei valori di Iv GNDT in giudizi verbali di vulnerabilità e classe EMS 98 secondo diverse proposte reperite in letteratura e individuate dal presente studio.

Cifani et al. 2006						Giovinazzi 2005	Ferrini et al. 2004 + proposta 2019			
Punti	Iv	Intervalli Iv	Giudizio vuln. (base)	Giudizio vuln. Modificato	Classe EMS98	Classe EMS98	Punti	Iv	Intervalli Iv	Classe EMS98
0	0	0-0,10	Adeguata	Adeguata	D	D	0		0-0,15	D
52,5	0,13	0,11-0,20	Bassa	Bassa	C		60	0,14	0,16-0,35	C
		0,21-0,40		Medio bassa	B	C				
203,75	0,51	0,41-0,60	Media	Media	B	B	220	0,51	0,36-0,55	B
		0,61-0,80		Medio alta	A	A			>0,55	A
393,75	1	0,81-1	Alta	Alta	A	A	438,75	1		

Vista la complessità delle informazioni raccolte e prodotte negli ultimi 20 anni, molto variegata per tipo, consistenza e qualità, si è deciso di ricorrere ad un sistema GIS, per semplificarne la gestione e la mutua confrontabilità, combinando un livello di dettaglio alla scala del singolo edificio con le potenzialità dell'analisi a scala urbana (cfr. Darù 2018, Sbrogiò et al. 2018).

Dal 1979 ad oggi tutti gli edifici, se si esclude una piccola costruzione ancora in condizioni originali, sono stati oggetto di interventi di consolidamento sismico e/o riparazione secondo i criteri dell'adeguamento sismico, così come definito dalla normativa previgente all'adozione delle Norme Tecniche del 2008 (DM 14/01/2008). Dai rilievi dei primi anni Duemila, alcuni piccoli cambiamenti sono occorsi nell'edificato di Campi Alto, consistenti nella costruzione di alcune nuove unità, la riparazione di alcune esistenti o al contrario l'abbandono di altre danneggiate dal sisma precedente. Per motivi di confrontabilità il presente studio fa riferimento agli stessi 50 edifici già studiati in precedenti occasioni (Cardani 2004; Munari 2010).

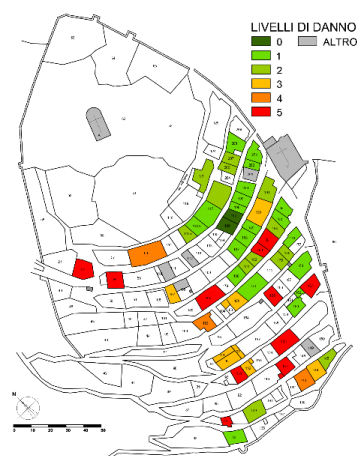
## 2.2 Rilievo del danno

Nel sistema GIS sono stati riportati i livelli di danno degli edifici relativi agli ultimi tre eventi sismici rilevanti che hanno colpito Campi Alto, deducendoli dalla documentazione disponibile (Cardani 2004) per il 1979 e il 1997 e dal rilievo in sito per il 2016 (Darù 2018).

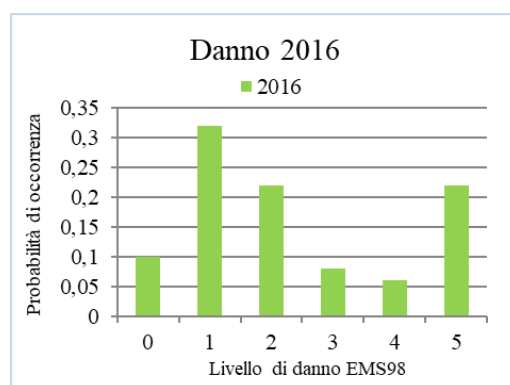
Il quadro macrosismico complessivo è riportato in Figura 4.

A differenza di quanto previsto dalle stesse scale macrosismiche (distribuzione normale) e dai primi studi a carattere statistico (Braga et al. 1982, Lagomarsino 2006, Giovinazzi 2005) che utilizzavano distribuzioni binomiali o beta, ma in linea con osservazioni recenti relative al sisma di L'Aquila (Rosti et al. 2018), il rilievo del danno evidenzia una distribuzione segnata da due picchi relativi di frequenza agli estremi della scala del livello di danno, invece dell'atteso addensamento attorno al valore medio.

Indipendentemente dalla classe di vulnerabilità, una simile distribuzione comporta notevoli difficoltà al momento della determinazione dell'intensità macrosismica poiché corrisponde alla somma delle curve, ad andamento opposto, "a" e "c" di Figura 2, corrispondenti a due intensità affatto diverse.



a.



b.

Figura 4. Rilievo del danno del terremoto Centro Italia 2016. Mappatura a livello urbano (a) e distribuzione dei livelli di danno su scala EMS 98 raggiunti a Campi Alto nel terremoto del 2016 (b).

La risposta sismica degli edifici con interventi è già stata fatto oggetto di studi a partire dal sisma Umbria Marche 1997 in rapporto agli interventi eseguiti dal precedente sisma del '79 (cfr. tra gli altri, Capaldini e Vasapollo 1998, Penazzi et al. 2000, Binda et al. 2004), tuttavia la sequenza del 2016-17 ha riportato prepotentemente in evidenza il tema (Fragomeli et al. 2017, Doglioni et al. 2018, Sorrentino et al. 2018, Valluzzi e Sbrogiò 2019).

La casistica fenomenologica del danno evidenziata da questi studi e riconosciuta anche a Campi di Norcia testimonia l'ambivalenza degli interventi, capaci di portare il sistema resistente murario effettivamente alle prestazioni della scatola pluriconnessa, così come di consentire, se non aggravare, la formazione e l'evoluzione al collasso dei meccanismi locali (Saretta 2019). Il comportamento degli edifici con interventi si riconduce a quattro tipi (Figura 5), individuati in rapporto alla combinazione tra struttura verticale portante e orizzontale di soffittatura e copertura. Molto più determinante ai fini del comportamento risulta proprio la qualità muraria (Saretta 2019; Valluzzi et al. 2019a).



a.



b.



c.



d.

Figura 5. Campi Alto, risposta sismica di edifici con interventi: (a) TIPO 1: edifici con solai in travi Varese e tavelloni di sostituzione su murature non consolidate; (b) TIPO 2: edifici con solai rigidi di sostituzione su muratura non consolidata; (c) TIPO 3: edifici con muratura consolidata solo su alcuni livelli, ricostruita in quello superiore e orizzontamenti qualsiasi (nella foto i solai sono deformabili in legno e mezzane di cotto); (d) TIPO 4: edifici con solai rigidi di sostituzione e murature consolidate.

### 2.3 Valutazioni di vulnerabilità

All'interno della procedura *Vulnus* è previsto anche l'uso della scheda *GNDT* di II livello per fornire informazioni sui caratteri "qualitativi" o empirici non altrimenti deducibili dal calcolo di meccanismi locali; i valori ricavati nel 2010, ipotizzando che gli interventi potessero costituire sempre parte integrante della fabbrica, sono esposti in Figura 6. *Vulnus* propone una propria classificazione di vulnerabilità secondo i criteri *EMS 98*, dalla quale risulta che, per il gruppo di 50 edifici di Campi Alto, la quasi totalità (49/50) è in classe C e per un caso isolato (1/50) in classe B ("Munari 2010" in Figura 7). Tutti gli edifici classificati come C presentano interventi.

Convertendo i valori di *Iv* (Giovinazzi 2005), si nota la comparsa anche della classe D e la sparizione della B, in rapporto a indici effettivamente molto bassi ("Giovinazzi 2005" in Figura 7).

I due metodi sostanzialmente concordano nell'attribuire una bassa vulnerabilità: tipicamente la C con oscillazioni nelle classi immediatamente adiacenti. Si tenga presente che la descrizione *EMS 98* della classe C è edifici in "muratura in mattoni con solai in cemento armato", che ha come estremo inferiore probabile la B e superiore possibile la D (Grunthal 1998; Giovinazzi 2005).

Per quanto riguarda la situazione precedente agli interventi di adeguamento, quale poteva apparire al sisma del '79, il tipo murario di base è la pietra a spacco a due paramenti con tessitura irregolare, pietre di piccola dimensione e malta scadente, corrispondente alla classe A. Poiché si può ritenere, in prima istanza e in mancanza di documentazione specifica, che i pochi interventi di aggiornamento nelle parti strutturali antecedenti a quella data riguardassero principalmente gli elementi più soggetti al degrado, quali solai e coperture rispetto alle murature, in rapporto alla qualità muraria descritta poco sopra, la classe di partenza è riconoscibile come A o, al massimo, B. Dunque l'intervento, a questo livello di analisi, ha un significativo effetto sulla classificazione. La risultante mappa di vulnerabilità urbana dedotta da quella classificazione, da confrontarsi con la mappa della "risposta sismica tipologica" e con il danno rilevato (Figura 4a) è mostrata in Figura 8.

### 2.4 Compilazione delle DPM

In rapporto ai livelli di danno raggiunti e alle classi di vulnerabilità entro cui erano già stati ascritti gli edifici, è possibile compilare la DPM

empirica (Tabella 4) per confrontarla con le distribuzioni continue “teoriche” illustrate in Figura 2. Risulta chiaro che il sisma del 2016 ha avuto effetti di difficile interpretazione. Secondo la classificazione di vulnerabilità attuale (Munari 2010) 49 edifici su 50 sono in classe C, dunque il grafico di Figura 4 coincide quasi esattamente con la distribuzione della singola classe da confrontare con le DPM teoriche (Figura 3). Il confronto tra la matrice teorica e le percentuali rilevate permette di individuare due possibili corrispondenze: al grado VIII (in classe C, *multi* LD2 quindi probabilmente anche *multi* LD1) e al grado XI (in classe C, *multi* LD5; in classe B, *la maggior parte* LD5). Le “istruzioni” della scala consentono di assegnare una valutazione che si estende al massimo tra tre gradi intensità, e la pratica è ragionevole quando si hanno a disposizione solo dati cronachistici; in altre parole è impossibile assegnare un’intensità VIII-XI EMS 98, anche in rapporto alla compattezza del centro abitato che non permette la perimetrazione di comparti omogeni più piccoli.

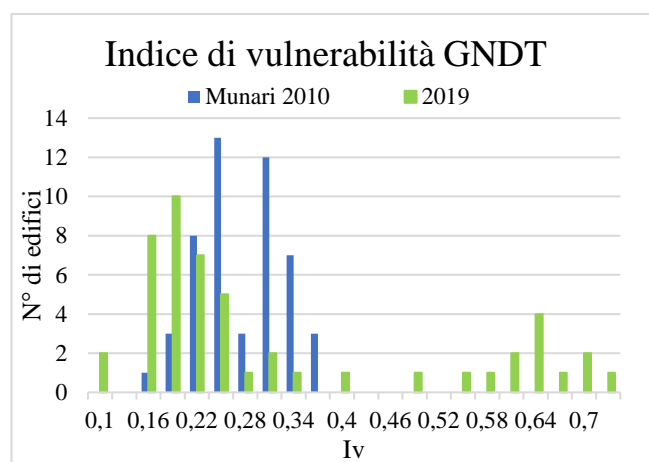


Figura 6. Vecchi e nuovi indici di vulnerabilità.

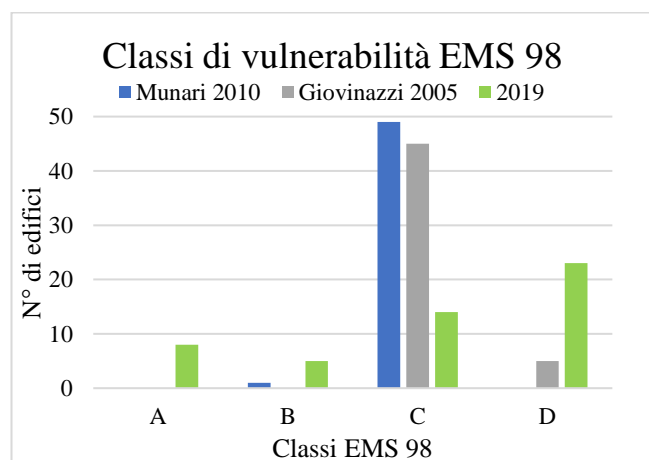
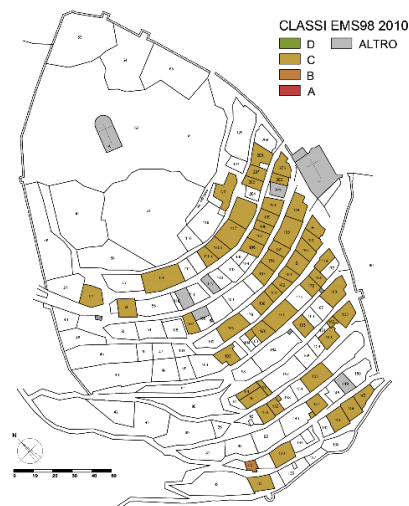


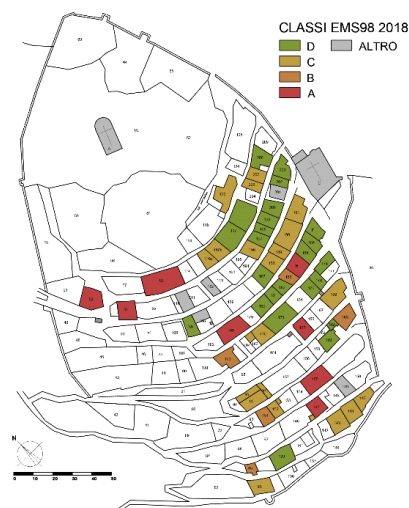
Figura 7. Classi di vulnerabilità macrosismica in base a diversi criteri di classificazioni applicati ai valori di Iv della scheda GNDT di II livello.



a.



b.



c.

Figura 8. Rilievo di vulnerabilità a Campi Alto: (a) le classificazioni di vulnerabilità secondo EMS 98 in Munari (2010); (b) i tipi di risposta sismica e (c) le nuove classi di vulnerabilità ottenute dall’aggiornamento della scheda GNDT.

Tabella 4. Matrice di probabilità di danno empirica relativa alla classificazione macrosismica individuata da Munari (2010).

Danno EMS 98	2016			
	Classe B		Classe C	
	%	Quantità EMS 98	%	Quantità EMS 98
0	0	-	10	Pochi
1	0	-	32	Molti
2	0	-	22	Molti
3	0	-	8	Pochi
4	0	-	6	Pochi
5	100	Maggior parte	22	Molti
$I_{EMS}$	XI		VIII-X	

La traduzione delle percentuali in espressione verbale utilizza le indicazioni di Bernardini et al. (2007). La numerosità relativa dei gruppi di edifici, non è d'aiuto e anche altri elementi di valutazione ai fini dell'intensità fanno propendere ora per uno ora per l'altro grado.

Il danno infrastrutturale a Campi Alto è molto elevato, con numerosi crolli dei muri di contenimento delle strade lungo i terrazzamenti, e anche le chiese hanno subito danni ingenti: delle quattro rimaste due sono totalmente crollate e due presentano estesi collassi parziali (Cardani 2017). Di converso il danno raggiunto dall'edificio, eccetto alcuni casi, non può essere paragonato ai livelli raggiunti da Arquata del Tronto (X MCS) e dalle relative frazioni già colpite dal sisma del 24 agosto (Figura 9) (Tertulliani 2019).

Si può ipotizzare che una più precisa classificazione di vulnerabilità consenta di individuare in modo più preciso anche l'intensità macrosismica.

### 3 AGGIORNAMENTO DELLA CLASSIFICAZIONE DELLA VULNERABILITÀ MACROSISMICA: GLI INTERVENTI

Il nuovo giudizio dei parametri è espresso in particolare in rapporto alla qualità e all'entità degli interventi sulla muratura, in termini di estensione e incisività. Apportando le correzioni illustrate in precedenza alle schede GNDT, cioè, oltre al punteggio totale, lo spostamento dei giudizi espressi per i parametri 1, 5, 9 nella classe peggiore e peggiorando in alcuni casi anche il parametro 7 (vd. §1.2), in funzione delle analisi conoscitive rese possibili grazie al sistema GIS, è possibile aggiornare  $I_v$  ("2019", Figura 6).

Nella distribuzione di Figura 6 si osserva la comparsa di un gruppo di edifici caratterizzati da una vulnerabilità alta, superiore a 0,55, prima assente, e l'ulteriore abbassamento dei punteggi del gruppo a bassa vulnerabilità.

Inoltre, al confronto con l'indice di danno  $I_d$  (ottenuto rapportando a 5 il livello di danno osservato) i nuovi valori di  $I_v$  permettono di ottenere un riallineamento tra vulnerabilità e danno (Figura 10).

Tale più precisa corrispondenza già si osservava tra le classi tipologiche di comportamento e il danno osservato (Figura 5a). È interessante la presenza di un gruppo consistente di edifici in classe D propria di edifici in muratura di ottima fattura o rinforzati (come già previsto dalla scala EMS98, cfr. Tabella 1) o in cemento armato con bassi livelli di protezione sismica.

Utilizzando la DPM empirica di Tabella 5 tradotta graficamente in

Figura 11 è evidente ora la scomparsa dell'effetto bimodale, con la formazione di distribuzioni caratterizzate da un pronunciato picco in corrispondenza del valore centrale. Il confronto con le distribuzioni teoriche restituisce una buona corrispondenza con l'intensità VIII per le classi a minore vulnerabilità (B-D) ma peggiore per la classe più vulnerabile (A).



a.



b.

Figura 9. Vista panoramica degli effetti del sisma dei borghi di (a) Arquata del Tronto, fraz. Pescara (AP) e di (b) Campi Alto di Norcia.



Tabella 5. Matrice di probabilità di danno empirica relativa alle nuove classi di vulnerabilità.

Danno EMS 98	Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
	Quantità		Quantità		Quantità		Quantità	
	%	EMS 98	%	EMS 98	%	EMS 98	%	EMS 98
0	0	-	0	-	19	Pochi-molti	40	Molti
1	0	-	22	Pochi-molti	56	Molti	60	Maggior parte
2	9	Pochi	39	Molti	19	Pochi-molti	0	-
3	0	-	17	Pochi-molti	6	Pochi	0	-
4	18	Pochi	6	Pochi	0	-	0	-
5	73	Molti	17	Pochi-molti	0	-	0	-
I <sub>EMS</sub>	X		VII-VIII		VIII		VIII-IX	

Quest'ultima risulta avere più danno di quello atteso, arrivando a livelli dell'intensità X a meno di non ipotizzare che in realtà corrisponda ad un classe di vulnerabilità più alta, AA. Il risultato è dunque in linea con i rilievi macrosismici condotti dall'INGV (Tertulliani & Azzaro 2016).

#### 4 CONCLUSIONI

La risposta sismica degli edifici di Campi Alto evidenzia come l'intervento disomogeneo produca un edificio "fragile", in cui i meccanismi di primo modo sono resi più gravosi dall'aumento delle masse e dalle differenze di rigidzze; l'edificio con interventi radicali invece dispone al contrario di riserve di resistenza insospettabili per la tipologia, esprimendo livelli di danno anche molto bassi in presenza di sollecitazioni elevate.

In questo senso a Campi di Norcia gli edifici in muratura con interventi male eseguiti risulta trovarsi in una sorta di classe A+, ancora più vulnerabile degli edifici di cattiva fattura e/o concezione e con materiali e stato di conservazione scadenti, collocabili tipicamente in classe A EMS 98. Al contrario, gli edifici in cui l'intervento interessa in modo globale le strutture, il comportamento che si ottiene è sensibilmente migliore, al limite di quello proprio di una tipologia strutturale diversa.

La scheda GNDT di II livello ha dimostrato anche in questa occasione la propria utilità e anche la capacità di cogliere in maniera soddisfacente un fenomeno, quello dell'effetto degli interventi, che non aveva ancora trovato un'adeguata valutazione in letteratura dall'epoca del suo ultimo aggiornamento. Non è stato necessario fare ricorso alle integrazioni alla procedura recentemente proposte (Formisano et al. 2017), relative all'interazione tra edifici all'interno di aggregati strutturali; ciò anche in ragione del fatto che la

EMS 98 impone di trascurare, al fine della valutazione del danno, quanto derivi dall'interazione tra edifici (Grunthal 1998).

D'altra parte, la messa a sistema di informazioni derivanti da più considerazioni (costruttive, sui materiali, sugli interventi), puntuale per edificio ma estesa ad un intero centro, resa possibile da un sistema GIS, si è rivelata un valido aiuto ai fini della determinazione del grado di collaborazione tra struttura di base e interventi. Un ulteriore affinamento dei risultati, per quanto riguarda la definizione del comportamento di strutture con interventi, sarà possibile ampliando il campione di edifici analizzati e anche integrando puntualmente la conoscenza mediante la documentazione edilizia e l'implementazione di modelli che simulino interventi in modo incrementale.

#### RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano D. Darù e M. Rota per l'aiuto nei sopralluoghi. La ricerca rientra nell'ambito del progetto DPC/ReLUIS 2014-2018.

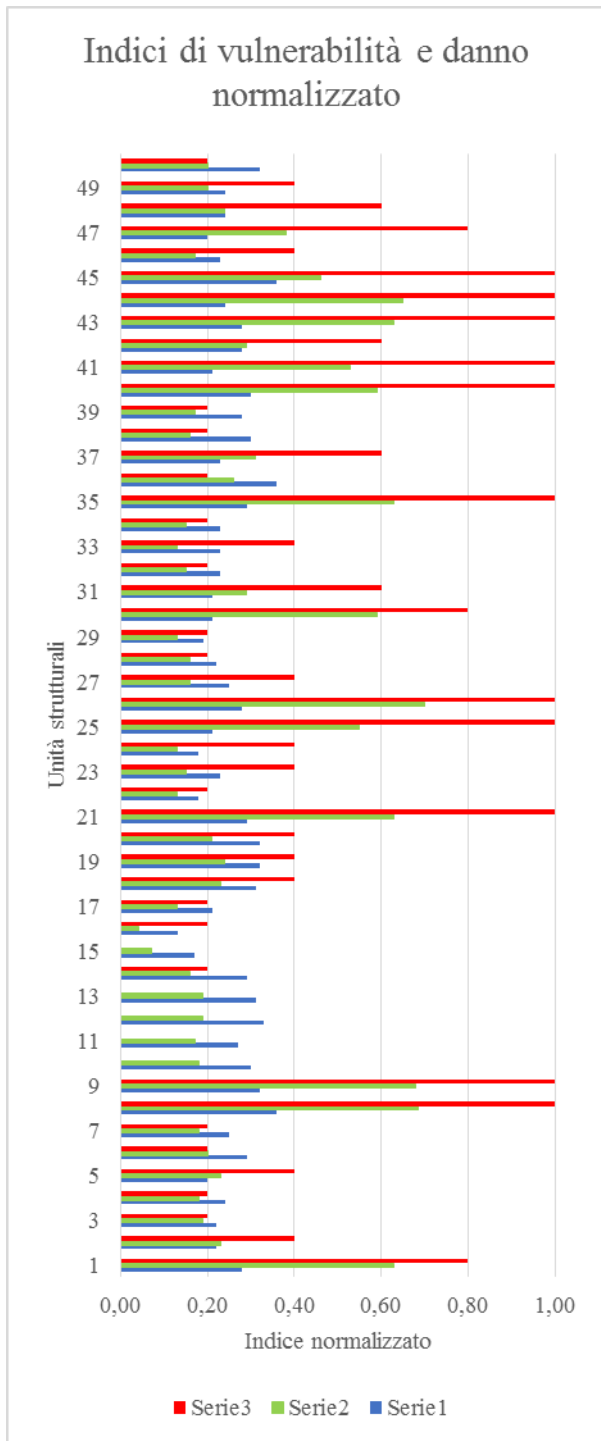


Figura 10. Confronto tra valori di indice di vulnerabilità  $I_v$  come calcolati da Munari (2010) e indice normalizzato di danno.

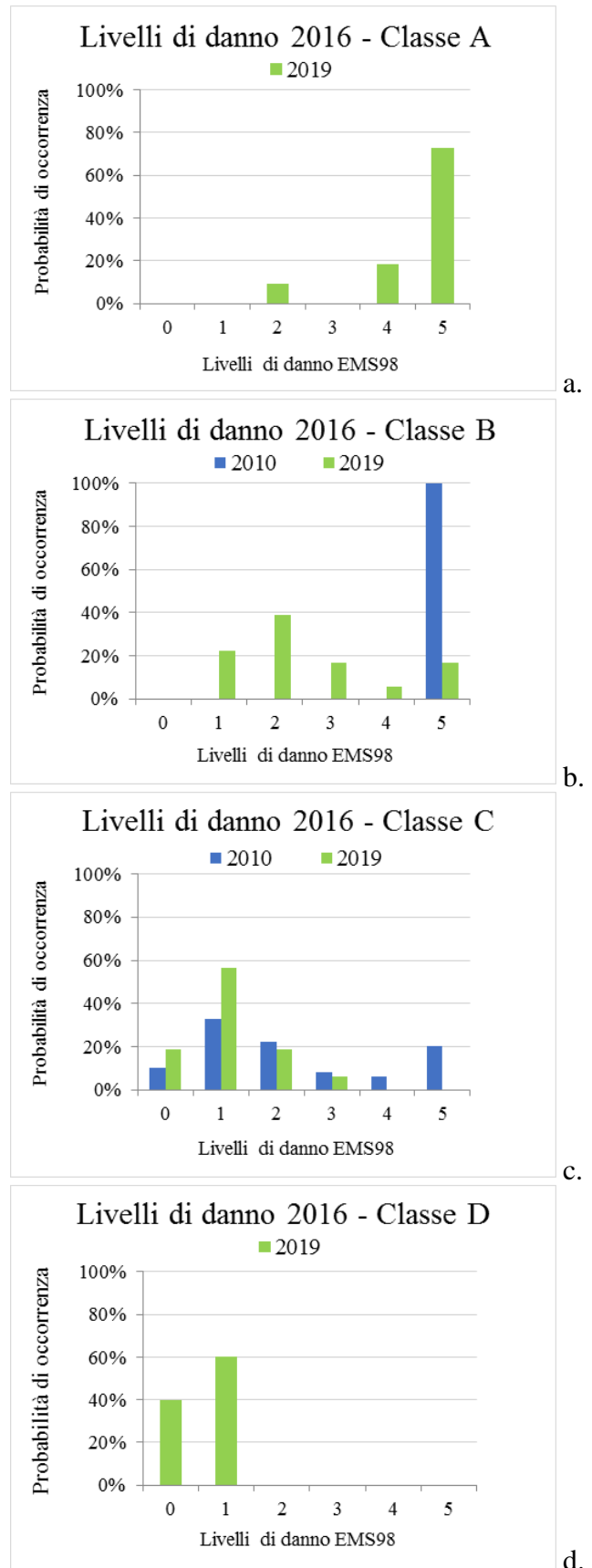


Figura 11. Distribuzione dei livelli di danno (LD) per le nuove classi di vulnerabilità riconosciute a Campi Alto.

## BIBLIOGRAFIA

- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. Sulla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura: un metodo di valutazione, *L'industria delle costruzioni*, 149.
- Bernardini, A. (a cura di), 2000. *La vulnerabilità degli edifici: valutazione a scala nazionale della vulnerabilità sismica degli edifici ordinari*, CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., Parodi, S., 2007. Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98, *XII congresso nazionale L'ingegneria sismica in Italia*, 10-14 giugno, Pisa, IT.
- Bernardini, A., Gori, R., & Modena, C., 1990. An application of coupled analytical models and experiential knowledge for seismic vulnerability analyses of masonry buildings. In A. Kortize, *Engineering aspects of earthquake phenomena*. Oxford: Omega scientific.
- Binda L., Cardani G., Modena M., Valluzzi M.R., Marchetti L., 2004. Indagine sulla consistenza dell'edilizia storica, sul danno pregresso e sull'efficacia degli interventi svolta su quattro centri campione in Umbria, *XI congresso nazionale L'ingegneria sismica in Italia*, 25-29 gennaio, Genova, IT.
- Braga, F., Dolce, M., & Liberatore, F., 1982. Southern Italy Novembre 23, 1980 Earthquake: A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale. *Seventh European Conference on Earthquake Engineering*, September 20-25, Athens, Greece.
- Capaldini P., Vasapollo, M., 1998. Edifici in muratura ripristinati dopo il terremoto del 10.09.1979 in Valnerina. Verifica sul campo dopo i nuovi eventi sismici del 26.09.1997 e successivi, *Ingegneria sismica*, **15**(2), 5-25.
- Cara S., Aprile A., Pelà L., Roca P., 2018. Seismic risk assessment and mitigation at emergency limit condition of historical Buildings along Strategic Urban Roadways. Application to the "Antigua Esquerra de l'eixample" Neighbourhood of Barcelona, *International Journal of Architectural Heritage*, **12**(7-8).
- Cardani, G., 2004. *La vulnerabilità sismica dei centri storici: il Caso di Campi Alto di Norcia. Linee guida per la diagnosi finalizzata alla scelta delle tecniche di intervento per la prevenzione dei danni*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano.
- Cardani, G., 2017. Campi Alto di Norcia e le sue chiese: prima ricognizione dei danni dopo il sisma del 2016, *XVII congresso nazionale L'ingegneria sismica in Italia*, 17-21 settembre, Pistoia, IT.
- Cifani, G., Petrucci, G., Lazzaro, D., D'Alessandro, S., Cialone, G., et al., 2006. *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura*. L'Aquila: ITC-CNR.
- Darù, D., 2018. *Valutazione degli effetti di interventi pregressi sulla vulnerabilità sismica di centri storici su piattaforma GIS: applicazione ad alcuni centri umbri nella fase post sismica 2016-2018*. Tesi di laurea. Padova: rel. M. R. Valluzzi.
- Dogliani, F., Marchetti, L., Modena, C., 2018. Prima ricerca/rapporto sul comportamento ai sismi 2016 e sul danno ulteriore subito da edifici storici già consolidati nell'Umbria e nelle Marche dopo i terremoti del 1979 e 1997. Allegato 2 alla Circ. 53/2017 DG-ABAP *Linee di indirizzo metodologiche e tecniche per la ricostruzione del patrimonio culturale danneggiato dal sisma del 24 agosto 2016 e seguenti*.
- Dolce, M., Goretti, A., 2015. Building damage assessment after the 2009 Abruzzi earthquake, *Bullettin of Earthquake Engineering*, **13**(8), 2241-2264.
- Dolce, M., Papa, F., Pizza, A.G., 2014. *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)*, PCM-DPC.
- Ferrini, M., Melozzi, A., Pagliuzzi, S., & Scarparolo, S., 2004. Valutazione della vulnerabilità sismica per edifici in muratura: modifiche ed integrazioni introdotte dalla Regione Toscana al manuale per la compilazione della scheda di II livello, *XI congresso nazionale L'ingegneria sismica in Italia*, 25-29 gennaio, Genova, IT.
- Formisano, A., Florio, G., Landolfo, R., Mazzolani, F. M., 2011. Numerical calibration of a simplified procedure for the Seismic Behaviour Assessment of Masonry Building Aggregates, *13<sup>th</sup> International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, September 6-9, Crete, Greece.
- Fragomeli, A., Galasco, A., Graziotti, F., Guerrini, G., Kallioras, S. et al., 2017. Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 – Parte 2: Esempi di centri colpiti, *Progettazione sismica*, **8**(3), 49-77.
- Galli, P., Camassi, R., Azzaro, R., Bernardini, F., Castenetto, S., Molin, D., Peronace, E., Rossi, A., Vecchi, M., Tertulliani, A., 2009. Il terremoto aquilano del 6 aprile 2009: rilievo macrosismico, effetti di superficie ed implicazioni sismotettoniche, *Il Quaternario – Italian Journal of Quaternary Sciences*, **22**, 235-246.
- Galli, P., Castenetto, S., Peronace, E., 2017. *Rapporto sugli effetti macrosismici del terremoto del 30 Ottobre 2016 (Monti Sibillini) in scala MCS, con aggiornamenti successivi agli eventi del 18 Gennaio 2017*. Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria.
- Giovinazzi, S., 2005. *The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis*. Tesi di Dottorato, Braunschweig.
- Grünthal, G. (ed), 1998. European Macroseismic Scale 1998, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **15**.
- Lagomarsino, S., 2006. On the vulnerability assessment of monumental buildings, *Bullettin of Earthquake Engineering*, **4**(4), 445-463.
- Munari, M., 2010. *Sviluppo di procedure per valutazioni sistematiche di vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura*. Tesi di Dottorato, Padova.
- Penazzi, D., Valluzzi, M. R., Cardani, G., Binda, L., Baronio, L., Modena, C., 2000. Behavior of historic masonry buildings in seismic areas: lessons learned from the Umbria-Marche earthquake, *12<sup>th</sup> International Brick and Block Masonry Conference*, June 25-28, Madrid, Spain.
- Rosti, A., Rota, M., Penna, A., 2018. Damage classification and derivation of damage probability matrices from L'Aquila (2009) post-earthquake survey data. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(9), 3687-3720.
- Sieberg, A., 1930. Geologie der Erdbeben, *Handbuch der Geophysik*, **2**(4), 552-555.
- Sorrentino, L., Cattari, S., da Porto, F., Magenes, G., Penna, A. (2018). Seismic behaviour of ordinary masonry buildings during the 2016 central Italy earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (18).
- Saretta, Y., 2019. *Una nuova procedura multilivello per la valutazione del danno e della vulnerabilità sismica di edifici in muratura: applicazione su centri storici colpiti dal Sisma Centro Italia 2016 ed implementazione in ambiente GIS*. Tesi di laurea. Padova: rel. M.R. Valluzzi.

- Sbrogiò, L., Cardani, G., Valluzzi, M.R., 2018. Damage Survey of a Historic Town and Comparison with Past Events after the 2016 Central Italy Earthquake in *16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, June 18-21, Thessaloniki, Greece.
- Tertulliani, A., Leschiutta, I., Bordoni, P., Milana, G., 2011. Damage Distribution in L'Aquila City (Central Italy) During the 6 April 2009 Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102:1543-1553, doi: 10.1785/0120110205.
- Tertulliani, A., Azzaro, R. (a cura di), 2016. *QUEST - Rilievo macrosismico per i terremoti nell'Italia centrale. Aggiornamento dopo le scosse del 26 e 30 ottobre 2016.*
- Tertulliani, A., 2019. Ricordando il terremoto del 6 aprile 2009. Il rilievo del danno con qualche considerazione sul futuro, disponibile <https://ingvterremoti.wordpress.com>
- Valluzzi, M.R., Sbrogiò, L., 2019. Vulnerability of Architectural Heritage in Seismic Area: Constructive Aspects and Effect of Interventions. In Amoruso G., Salerno E. (eds.). *Cultural landscape in practice. Conservation vs. Emergencies.*
- Valluzzi, M.R., Sbrogiò, L., Saretta, Y., Molinari, F., 2019a. Updating and optimization of multi-level survey tools for detecting damage and vulnerability of existing masonry buildings subject to previous interventions in seismic areas, *XVIII congresso nazionale L'ingegneria sismica in Italia*, 15-19 settembre, Ascoli Piceno, IT.
- Valluzzi, M.R., Salvalaggio, M., Sbrogiò, L., 2019b. Repair and conservation of masonry structures. In Milani G., Ghiassi B. (eds). *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures: from theory to application.*
- Vicente, R., Parodi, S., Lagomarsino, S., Varum, H., Mendes Silva, J.A.R., 2011. Seismic vulnerability and risk assessment: case study of historic city centre of Coimbra, Portugal, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**, 1067-1096.