



Aggiornamento ed ottimizzazione di strumenti schedografici multi-livello per il rilievo del danno e della vulnerabilità di edifici esistenti in muratura oggetto di interventi pregressi in zona sismica

Maria Rosa Valluzzi^a, Luca Sbrogiò^a, Ylenia Saretta^b, Francesco Molinari^a

^a Dipartimento di Beni Culturali, piazza Capitaniato 7, 35139, Padova, Italy

^b Dipartimento di Geoscienze, via G. Gradenigo, 6, 35131 Padova, Italy

Keywords: edifici in muratura; valutazioni post-sisma; vulnerabilità sismica; interventi di consolidamento.

ABSTRACT

Gli edifici in muratura dei centri storici ricadono spesso nelle categorie a più elevata vulnerabilità sismica, a causa di tipici aspetti costruttivi (es. l'irregolarità) e di debolezze intrinseche (degrado dei materiali, mancanza o inefficacia delle connessioni, assenza di presidi antisismici). Tali condizioni possono indurre danni gravi ed estesi crolli anche per terremoti di magnitudo medio-alta (intorno a 6), come confermato dalla storia sismica Italiana negli ultimi 40 anni. Lo scenario, purtroppo, non è migliorato con l'avvento delle normative sismiche (anni '80), la cui applicazione, sia in termini di tecniche d'intervento che di metodi di verifica, ha comportato ibridizzazioni degli edifici tuttora difficili da interpretare.

Ne consegue che, allo stato attuale, la presenza di interventi e dei loro effetti (sia positivi che negativi) non è più trascurabile. Le osservazioni post-sisma degli ultimi 20 anni (dal sisma Umbria-Marche 1997) hanno registrato l'elevata frequenza di danni gravi e crolli causati da interventi strutturali, soprattutto applicati a solai e coperture (rinforzo e/o sostituzione con sistemi moderni in c.a. o con elementi in acciaio) senza un adeguato consolidamento delle murature. In tal caso, il comportamento 'scatolare' è solo presunto, e l'applicazione di modelli di calcolo globali può portare a valutazioni inaffidabili.

A valle di un'estesa revisione degli attuali strumenti schedografici disponibili per il rilievo in sito degli edifici in muratura in zona sismica, l'articolo propone una nuova scheda integrata multi-livello in grado di valutare l'effetto dei più comuni interventi adottati in zona sismica, in termini danno e vulnerabilità. La nuova procedura, calibrata su un esteso campione di edifici (circa 600) appartenenti a 7 centri colpiti dal sisma Italia Centrale 2016, ha permesso di aggiornare le matrici di probabilità di danno (DPM) e le relative distribuzioni in funzione delle intensità della Scala Macrosismica Europea (EMS 98). In particolare, è stato possibile ri-collocare gli edifici con interventi nelle classi di vulnerabilità previste dalla scala (in alcuni casi sono state identificate nuove sotto-classi), in relazione ad intensità macrosismiche variabili tra VI e X.

1 INTRODUZIONE

La disponibilità di normative in materia di riparazione e consolidamento sismici, a partire dalla fine degli anni '70 in Italia, ha portato gli edifici in muratura con interventi strutturali a costituire una percentuale significativa del costruito, soprattutto nelle aree sismicamente più attive del Paese. Altrettanto diffuso è l'uso di schede di rilievo post-sisma relative al danno ed alla vulnerabilità, i cui risultati hanno tuttavia spesso evidenziato difficoltà d'interpretazione,

proprio in relazione al costruito esistente, con particolare riguardo alla creazione delle matrici probabilità di danno (DPM) empiriche (Rosti et al. 2018).

Gli eventi sismici succedutisi in Italia negli ultimi 20 anni (tra gli altri, Umbria Marche 1997, L'Aquila 2009, Centro Italia 2016-17) hanno inoltre dimostrato come l'applicazione di interventi strutturali su edifici in muratura esistenti non sempre produce un effettivo miglioramento del loro comportamento meccanico, in particolare sotto azioni orizzontali dinamiche. La presenza di orizzontamenti irrigiditi ai piani o in copertura, poggianti su murature di bassa qualità o non consolidate, insieme alla carenza di adeguati

dettagli costruttivi (peraltro spesso difficili da realizzare in modo efficace tra le nuove strutture e le murature esistenti), può non essere in grado di attivare il desiderato (e teorico) comportamento a scatola pluriconnessa ed inibire i meccanismi di primo modo (ribaltamento e flessioni fuori piano).

Inoltre, l'esperienza recente (sisma Centro Italia 2016), ha mostrato come anche soluzioni di rinforzo o sostituzione degli orizzontamenti in legno non considerate di per sé invasive (solai a putrelle o travetti Varese e tavelloni) rispetto alle pesanti sostituzioni con solai in latero-cemento, tipiche degli anni '80-'90, creano condizioni ibride nelle costruzioni murarie esistenti i cui effetti sotto azioni simiche, a tutt'oggi, risultano ancora difficili da simulare o prevedere (Valluzzi e Sbrogiò 2019; Valluzzi et al. 2019). Gli interventi hanno quindi un impatto non trascurabile sulla vulnerabilità, spesso accrescendola, e quindi, di riflesso, sia sul danno che sulla valutazione macrosismica, la quale dipende da entrambi.

È necessario, pertanto, operare un deciso aggiornamento degli strumenti di qualificazione del comportamento sismico degli edifici esistenti, cominciando dalla schedatura per il rilievo in sito, la quale dovrà comprendere, in modo chiaro, anche la presenza degli interventi e la misura della probabile vulnerabilità indotta dagli stessi nel concorso al danno osservato oppure previsto.

Tra gli strumenti disponibili, la scala EMS 98 (Grunthal 1998), di riferimento anche per le valutazioni di seguito presentate, richiede la preliminare assegnazione dell'edificio ad una tipologia di comportamento sismico ("classe di vulnerabilità") per poter ad esso associare il livello di danno e quindi successivamente costruire la DPM empirica da confrontare con quella teorica. Nello scenario migliore, la distribuzione empirica del livello di danno di una certa classe si comporta come un "campionamento" di una ipotetica distribuzione normale, con effetti di accumulo ai bordi, come illustrato in Figura 1, permettendo quindi di assegnare in modo diretto un determinato grado di intensità. Recenti campagne di rilievo sul costruito esistente hanno evidenziato la difficoltà di attribuire un livello di intensità macrosismica precisa, ossia i livelli di danno riscontrati risultano di fatto incompatibili, perché troppo alti, con una ragionevole classificazione di vulnerabilità degli stessi edifici (Sorrentino et al. 2018).

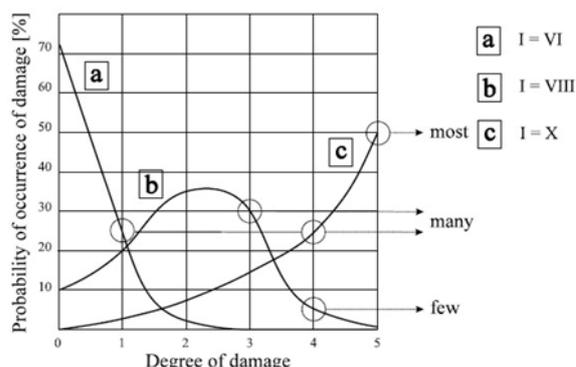


Figura 1. Relazione tra distribuzioni di danno tipiche per classe di vulnerabilità e livello di intensità macrosismica (da Grünthal 1998).

Alla luce delle condizioni attuali del costruito, il presente lavoro propone una revisione degli strumenti schedografici per il rilievo degli aspetti caratterizzanti la vulnerabilità e danno degli edifici in muratura esistenti; di riflesso, lo studio evidenzia un'estensione delle categorie di vulnerabilità attribuibili agli edifici esistenti, rispetto alle classi tipologiche note, che varia in funzione della presenza di interventi strutturali eseguiti nelle componenti orizzontali e/o verticali.

La ricerca è stata condotta su un campione di circa 600 edifici di 7 centri storici colpiti dal sisma Centro Italia 2016 (nella provincia di Macerata: Castelsantangelo sul Nera, Monte Cavallo, Muccia, Pieve Torina, Pievebovigliana di Valfornace; nella provincia di Perugia, comune di Norcia: Campi Alto, Castelluccio) ed ha permesso di mettere a punto e calibrare la procedura multilivello SeisMAP-DV (Multilevel Assessment Procedure for seismic Damage and Vulnerability of masonry buildings), in grado di definire indici sintetici di vulnerabilità e danno in funzione del grado di approfondimento delle osservazioni possibili e/o disponibili sugli edifici, in presenza di interventi strutturali, nelle condizioni pre o post-sisma. Lo strumento si avvale di supporti digitali sia nella fase di compilazione (applicazione su dispositivi mobili) che di archiviazione ed analisi dei dati (web database), nonché di consultazione (sistema GIS) e comparazione dei risultati (calcolo degli indici).

1.1 Le schede di rilievo attuali

Le schede di rilievo raccolgono dati a diversi livelli, a seconda del tempo a disposizione per la compilazione, di tipo e quantità di dati richiesti (localizzazione e descrizione sintetica, dati dimensionali, caratterizzazione dei materiali), del tipo di analisi compiuta (danno e/o vulnerabilità).

Al primo livello, finalizzato alla valutazione del danno, appartengono la scheda GNDT I livello (GNDT 1999) e la scheda AeDES (Bernardini 2000, Baggio et al. 2007), da essa derivata, di uso corrente nelle emergenze sismiche. Questi strumenti sono finalizzati principalmente a raccogliere e sistematizzare i dati relativi all'uso e le informazioni tipologiche degli edifici colpiti, al fine di quantificare il danno e la possibile agibilità. La scheda GNDT contiene un riferimento alla presenza di interventi mediante una tabella ad incroci in cui si combina il tipo "architettonico" (ampliamento, sopraelevazione, ristrutturazione, etc.) con la normativa di calcolo utilizzata (fino al D.M. 24/1/1986, Figura 2), ma non prevede voci relative al danno da essi provocato od a specifici effetti ad essi riconducibili. La tabella degli interventi non viene ripresa dalla scheda AeDES, ove l'unico riferimento (indiretto) alla presenza di interventi rimane nella tabella di rilievo tipologico delle strutture, selezionando la casella intersezione tra la muratura di cattiva qualità con/senza cordoli ed i solai rigidi; significativamente, tuttavia, il tono di grigio di sfondo della cella (Figura 3) è più chiaro nella colonna "con cordoli" che "senza cordoli" (le catene sono da ritenersi comunque benefiche), suggerendo quindi una minore vulnerabilità. Sulla base di questa maschera ad incroci, Bernardini (2000) e Dolce e Goretti (2015) hanno proposto regole di conversione utili a ricavare la classe di vulnerabilità.

Nessuna voce sugli interventi è prevista nella scheda FAST (OCDPC n. 405 del 10/11/2016), estratta dalla scheda AeDES per far fronte all'emergenza sismica del 2016; essa si limita alle informazioni minime sull'edificio ed al giudizio di agibilità, rientrando quindi nei metodi di livello 0 (ispezione rapida per la valutazione a macro scala della vulnerabilità e degli effetti del terremoto).

Le evidenze del sisma del '97 (Lagomarsino et al. 1997, Lagomarsino 1999), in particolare sul comportamento per macroelementi e meccanismi locali degli edifici, hanno consentito lo sviluppo di strumenti specifici per i beni culturali, sempre di primo livello, quali la scheda Chiese (Gruppo di lavoro 2001, Papa e Di Pasquale 2011) e la scheda Palazzi (Gruppo di lavoro 2006). È presente un richiamo alla presenza di interventi nella sola scheda Palazzi, dove se ne richiede una breve descrizione (Figura 4).

Nel secondo livello rientrano la scheda GNDT II livello (Benedetti e Petrini 1984, Ferrini et al. 2004) e la scheda CarTiS (Zuccaro et al. 2014,

2015), impiegate per la valutazione di vulnerabilità di edifici civili non specialistici in muratura e cemento armato. Si segnala, inoltre, una scheda Chiese di II livello (Civerra et al. 2007) che raccoglie anche le informazioni sul danno seguendo l'approccio per macroelementi.

Le schede GNDT e Chiese di II livello prevedono voci specifiche e precise condizioni per il peggioramento del giudizio di vulnerabilità causato da interventi di cui si è accertata l'incapacità di collaborare con la struttura muraria, soprattutto se di scarsa qualità e non consolidata (cordoli in breccia, solai rigidi, etc.). La scheda CarTiS non prevede, invece, l'espressione di un giudizio, e presenta semplicemente al compilatore, nei suoi elenchi, i fattori di incremento di vulnerabilità connessi agli interventi.

L'identificazione del materiale e la qualità della struttura portante verticale (livello 3) sono oggetto della scheda di Valutazione della Qualità Muraria (Borri e De Maria 2009). Nei metodi di I livello le murature sono individuate in modo schematico ("buona" o "cattiva" qualità, scheda AeDES; "pietra squadrata" o "sbozzata" o "a spacco" o "mista", "mattoni", scheda Palazzi), mentre in quelli di II livello si procede in modo tipologico, per voci di elenco (GNDT I livello, CarTiS), anche in rapporto alla specifica combinazione tra blocchi e malta (cfr. Ferrini et al. 2004).

Sezione 5 – ETÀ DELLA COSTRUZIONE – INTERVENTI

| Classi di età | | INTERVENTI | | | Classe di età di costr. | 270 | |
|---------------|---------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|-----|
| A | prima del '19 | Norme sismiche precedenti | Adeq. Antisism. D.M. 24/1/1986 | Migli. Antisism. D.M. 24/1/1986 | Interv. Non antisismico | Classe di età ultimo | 271 |
| B | '19 '45 | | | | | Classe di età ultimo intervento significat. | 272 |
| C | '46 '60 | | | | | Classe di età di costr. | 270 |
| D | '61 '71 | | | | | Classe di età ultimo | 271 |
| E | '72 '81 | | | | | Classe di età ultimo | 271 |
| F | dopo l' '81 | | | | | Classe di età ultimo | 271 |
| G | | | | | | Classe di età ultimo | 271 |
| H | | | | | | Classe di età ultimo | 271 |

| INTERVENTI | | Classe di età di costr. | |
|------------|-----------|-------------------------|--|
| A | B / C | Ampliamento | |
| D | E / F | Sopraelevazione | |
| G | H / I / J | Ristrutturazione | |
| K | L / M / N | Restauro | |
| O | / P / Q | Manutenzione | |

R = in deroga (Art.30 L. 64/74)

Figura 2. Tabella per la combinazione del tipo di intervento architettonico con la normative di calcolo in vigore, in funzione dell'anno di realizzazione (estratto da scheda GNDT I livello).

SEZIONE 3 Tipologia (multiscelta; per gli edifici in muratura indicare al massimo 2 tipi di combinazioni st

| Strutture orizzontali \ Strutture verticali | Non identificate | Strutture in muratura | | | | | | |
|--|------------------|---|----------------------|---|----------------------|-------------------|-------|------------|
| | | A tessitura irregolare e di cattiva qualità (Pietrame non squadrato, ciottoli...) | | A tessitura regolare e di buona qualità (Blocchi; mattoni; pietra squadrata...) | | Piastrini 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 | H | |
| 1 Non identificate | ○ | ■ | ■ | ■ | ■ | SI | ■ | ■ |
| 2 Volte senza catene | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ○ | G1 | H1 |
| 3 Volte con catene | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ○ | G1 | H1 |
| 4 Travi con soletta deformabile (travi in legno con semplice tavolato, travi e volture...) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | NO | G2 | H2 |
| 5 Travi con soletta semirigida (travi in legno con doppio tavolato, travi e tavoloni...) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ○ | ■ | ■ |
| 6 Travi con soletta rigida (solai di c.a., travi ben collegate a solette di c.a...) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ○ | G3 | H3 |

Figura 3. Tabella 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).

3 DANNO E VULNERABILITÀ INDOTTI DA INTERVENTI STRUTTURALI

Gli interventi strutturali di riparazione e consolidamento a fini antisismici degli edifici in muratura iniziano ad essere codificati già nelle *Prescrizioni* normative emanate dopo il sisma del Friuli 1976. Le disposizioni coeve (DM 3/3/75 e 20/11/87) prescrivono, allo stesso modo, precisi interventi rispetto ad un certo danno o carenza strutturale, tanto da aver stimolato lo sviluppo di una manualistica specialistica sugli interventi (Cigni 1984, Gigante 1998, Galloni 1982, Pasta 1999, Scillone e Di Segni 2000).

Per le strutture verticali si prescrive l'iniezione delle murature e l'intonaco armato; per le strutture orizzontali, la realizzazione di nuovi solai in laterocemento e l'eliminazione della funzione strutturale delle volte. Le orditure in putrelle, travi Varese o SAP è d'uso, invece, per la sostituzione dei materiali degradati eseguita in economia o senza particolari esigenze strutturali.

Le principali combinazioni di strutture verticali ed orizzontali rinvenute nel corso di sopralluoghi recentemente eseguiti nel Centro Italia, risultate di maggiore dettaglio rispetto a quanto previsto dalla EMS 98, la quale ignora la presenza di interventi

nelle proprie classi, sono esemplificate in Figura 5 e descritte in Tabella 1.

Già all'epoca del terremoto Umbria-Marche del '97 non era passata inosservata la risposta degli edifici riparati o consolidati dopo il sisma della Valnerina del '79, che aveva colpito quasi le stesse zone (Capaldini e Vasapollo 1998, Penazzi et al. 2000, Binda et al. 2004). Queste osservazioni sono state confermate con il sisma Centro Italia 2016 (Fragomeli et al. 2017b, Doglioni et al. 2018, Longhi 2017, Sorrentino et al. 2018, Valluzzi e Sbrogiò 2019) ed hanno permesso di individuare una nuova ricorsività nel comportamento. La Tabella 1 propone una riclassificazione tipologica in accordo con la presenza e gli effetti degli interventi sugli edifici. Si evidenziano la comparsa di due classi più vulnerabili della A, come definita nella EMS 98, nonché l'ottimo comportamento di alcune classi di edifici con interventi.

Si riscontra (e conferma) che la qualità muraria rappresenta il parametro chiave per un buon comportamento d'insieme dell'edificio sotto azioni sismiche; in particolare in concomitanza di interventi sui solai, per evitare scompensi di rigidità indotti da quest'ultimi all'intera struttura (Valluzzi et al. 2014; Valluzzi et al. 2019).



Figura 5. Esempificazioni delle otto categorie derivate dalla combinazione tra strutture verticali e orizzontali, comprendendo il tipo di interventi applicati sulle fabbriche: (a) Muratura non rinforzata o consolidata in modo non efficace con orizzontamenti rigidi e pesanti (Campi Alto di Norcia, PG); (b) Muratura non rinforzata o consolidata in modo non efficace con orizzontamenti semirigidi pesanti (Campi Alto di Norcia, PG); (c) Muratura non rinforzata o consolidata in modo non efficace con orizzontamenti flessibili (Castelluccio di Norcia, PG); (d) Muratura ristilata con orizzontamenti pesanti (Campi Alto di Norcia, PG); (e) Muratura ristilata con orizzontamenti semirigidi pesanti o leggeri (Castelsantangelo sul Nera, MC); (f) Muratura consolidata in modo efficace con orizzontamenti rigidi (Campi Alto di Norcia, PG); (g) Muratura consolidata in modo efficace con orizzontamenti semirigidi (Castelluccio di Norcia, PG); (h) Muratura in blocchi con orizzontamenti rigidi o semirigidi (Castelsantangelo sul Nera, MC).

Tabella 1. Combinazione tra strutture verticali e orizzontali, considerando gli interventi su queste applicati, comparate con le classi di vulnerabilità proposte dalla EMS 98 e dalla scheda AeDES, e modalità di collasso locali e globali ricorrenti osservate in sito. Le categorie sono a vulnerabilità decrescente.

| Tipo | Riclassificazione (comportamento riscontrato) | Classe EMS 98 | Vulnerabilità AeDES | Struttura verticale (muratura) | Struttura orizzontale | Modalità di collasso / danni tipici |
|------|---|---------------|---------------------|--|---|---|
| a | AAA | | B | - Non rinforzata - Consolidata in modo non efficace | Rigida pesante (laterocemento con cordoli perimetrali) | Locali: ribaltamento di singoli pannelli, flessione orizzontale. Globali: collasso per “piano soffice” per la muratura. |
| b | AA | | A-B | - Non rinforzata - Consolidata in modo non efficace | Semirigida pesante (SAP, putrelle o travi Varese e tavelloni o voltine) | Locali: rottura al taglio, deformazioni eccessive delle travi. Globali: collasso per perdita dei diaframmi orizzontali (implosione). |
| c | A | A | A-B | - Non rinforzata - Consolidata in modo non efficace | Leggera flessibile (legno “originale”) | Locali: ribaltamenti. Globali: collasso per meccanismi multipli. |
| d | C | | B-C | - Ristilata - Intonacata (malta di cemento spessa e non armata) | Rigida pesante (laterocemento con cordoli perimetrali) | Locali: disgregazione della muratura. Globali: meccanismi di taglio; ribaltamenti locali. |
| e | C | | B | - Ristilata - Intonacata (malta di cemento spessa e non armata) | Semirigida (putrelle, travi Varese, legno rinforzato) | Locali: movimenti nei solai. Globali: scorrimento rigido, taglio. |
| f | D | | C | Consolidata in modo efficace | Rigida pesante (laterocemento con cordoli perimetrali) | Locali: non strutturale, lesioni su isolate porzioni murarie ancora incoerenti. Globali: non osservato. |
| g | D | | B-C | Consolidata correttamente | Semirigida (putrelle, travi Varese, legno rinforzato) | Locali: lesioni negli elementi non strutturali o agli appoggi dei solai. Globali: scorrimento rigido, taglio. |
| h | D-E | B-C | C | Blocchi artificiali | Rigida o semirigida | Locali: non strutturale. Globali: scorrimento rigido, taglio. |

Nota: dove non specificato altrimenti, la muratura è in pietrame (regolarità variabile ma in genere scadente).

La tabella propone, inoltre, un confronto tra la “classe di comportamento” (vulnerabilità) effettivamente riscontrata nei sopralluoghi, la classificazione secondo la scala EMS 98, che trova corrispondenza in due soli casi, e secondo la conversione proposta da Dolce e Goretti (2015) per il rilievo tipologico della scheda AeDES (Figura 3), a conferma dell’inaccuratezza della valutazione secondo gli strumenti non aggiornati rispetto al comportamento osservato.

4 PROPOSTA DI UNA SCHEDA DI RILIEVO MULTILIVELLO: LA NUOVA PROCEDURA SEISMAP-DV

La procedura proposta raccoglie le parti essenziali degli strumenti di rilievo descritti in precedenza, combinandole ed ottimizzandole. Di alcuni viene riformulato l’ordine, per adattarlo al nuovo percorso di rilievo così che guidi progressivamente il rilevatore alla conoscenza dell’edificio: dai dati generali dipendenti dal contesto urbano ed edilizio in cui si situa, al dettaglio dei materiali, degli interventi strutturali progettati e della loro qualità esecutiva, passando

per la valutazione delle singole componenti strutturali. La nuova scheda contiene tutti i livelli di rilievo previsti (eccetto la caratterizzazione delle proprietà meccaniche) in modo da poter eseguire valutazioni generali o specifiche a seconda delle finalità (rilievo di danno o di vulnerabilità, raccolta dati, calibrazione di nuove procedure, ricerca o pratica professionale), del tempo e delle risorse a disposizione.

I contenuti della scheda sono sinteticamente esposti in Tabella 2 (cfr. Saretta 2019 e Molinari 2019, per una più precisa esposizione).

Tabella 2. Schema dei contenuti della scheda seisMAP-DV.

| | | |
|-------------|--|---|
| "Livello 0" | Identificazione | <ul style="list-style-type: none"> - Informazioni sul rilevatore e sul rilievo (squadra, data, località) - Identificazione catastale (Fg., Mapp.) - Identificazione nel tessuto urbano (isolato, schiera, edificio singolo) - Identificazione strutturale (US, UMI) - Identificazione sismica da altri studi (zona sismica, PGA locale, I_{EMS}) |
| | Analisi tipologica | <ul style="list-style-type: none"> - Tipo edilizio - Modalità di aggregazione e posizione nell'aggregato - Stato manutentivo - Dati geometrici di massima |
| | Rilievo vulnerabilità tipologica | Classi EMS 98 |
| "Livello 1" | Osservazione del danno | <ul style="list-style-type: none"> - Meccanismi attivati (principali/secondari) - Giudizio globale EMS 98 |
| | Rilievo del sistema costruttivo | Rilievo per componenti strutturali (secondo tab. AeDES) |
| | Rilievo del danno | Rilievo per componenti strutturali (secondo tab. AeDES) |
| "Livello 2" | Rilievo di vulnerabilità | Rilievo sintetico per componenti strutturali |
| | Analisi del danno e di vulnerabilità per meccanismi locali | <ul style="list-style-type: none"> - Valutazione dei meccanismi locali di collasso - Rilievo dei fattori di vulnerabilità - Giudizio di agibilità |
| "Livello 3" | Caratterizzazione del sistema resistente | <ul style="list-style-type: none"> - Riconoscimento delle caratteristiche della muratura - Riconoscimento di tipologie costruttive orizzontamenti - Identificazione delle modifiche all'impianto architettonico - Identificazione degli interventi |
| | | Note finali e qualità del sopralluogo |

La scheda presenta una struttura multi-scala, a seconda delle esigenze. Dopo la valutazione tipologica nel "Livello 0" (Figura 6), le principali novità del "Livello 1" riguardano la proposta di una tabella di rilievo della vulnerabilità per componenti strutturali in analogia al rilievo del danno AeDES e la possibilità di segnalare i meccanismi di collasso più significativi per l'edificio.

Il "Livello 2" comporta la valutazione del danno dell'edificio ordinario come attivazione, rispetto al collasso, di 20 meccanismi comprendenti anche gli effetti relativi alla scarsa qualità delle murature (es. Figura 7) e connessi alla presenza di interventi inefficaci. Il rilievo del danno è accompagnato da un rilievo di vulnerabilità per fattori, simile a quello proposto dalla scheda Chiese di II livello.

Infine, al "Livello 3", è possibile caratterizzare nel dettaglio la struttura, segnalando i tipi verticali e orizzontali presenti, gli interventi eseguiti e le modifiche all'impianto architettonico.

Ogni livello, a parte il primo, che si limita ad un giudizio su scala EMS 98 (danno globale e classe di vulnerabilità), si conclude con l'estrazione di un indice di danno o di vulnerabilità (Saretta 2019), fase tuttora in sviluppo.

| CLASSE DI VULNERABILITA' EMS 98 | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | A (V6) | B (V5) | C (V4) | D (V3) | | | | | |
| Ciottoli e pietre irregolari per edifici ordinari | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | |
| Pietra sbazzata o lavorata per edifici ordinari | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | |
| Pietra da taglio per edifici di pregio | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | |
| Mattoni/blocchi/pietre squadrate solai flessibili | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | |
| Mattoni/blocchi/pietre squadrate e solai rigidi | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | |
| Struttura verticale non identificabile | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | |
| MECCANISMI ATTIVATI | | | | | | | | | | |
| PRIMARI | DISGREGAZIONE MURATURA | <input type="checkbox"/> 1A | TAGLIO | | <input type="checkbox"/> 1F | | | | | |
| | RIBALTAMENTO DI PARETE | <input type="checkbox"/> 1B | SCORRIMENTO RIGIDO | | <input type="checkbox"/> 1G | <input type="checkbox"/> |
| | RIBALTAMENTO ANGOLO | <input type="checkbox"/> 1C | MARTELLAMENTO | | <input type="checkbox"/> 1H | <input type="checkbox"/> |
| | FLESSIONE ORIZZONTALE | <input type="checkbox"/> 1D | COLLASSO | | <input type="checkbox"/> 1I | <input type="checkbox"/> |
| | FLESSIONE VERTICALE | <input type="checkbox"/> 1E | NULL | | <input type="checkbox"/> 1Z | <input type="checkbox"/> |
| | | | | | <input type="checkbox"/> A | | | | | |
| SECONDARI | DISGREGAZIONE MURATURA | <input type="checkbox"/> 2A | TAGLIO | | <input type="checkbox"/> 2F | | | | | |
| | RIBALTAMENTO DI PARETE | <input type="checkbox"/> 2B | SCORRIMENTO RIGIDO | | <input type="checkbox"/> 2G | <input type="checkbox"/> |
| | RIBALTAMENTO ANGOLO | <input type="checkbox"/> 2C | MARTELLAMENTO | | <input type="checkbox"/> 2H | <input type="checkbox"/> |
| | FLESSIONE ORIZZONTALE | <input type="checkbox"/> 2D | COLLASSO | | <input type="checkbox"/> 2I | <input type="checkbox"/> |
| | FLESSIONE VERTICALE | <input type="checkbox"/> 2E | NULL | | <input type="checkbox"/> 2Z | <input type="checkbox"/> |
| | | | | | <input type="checkbox"/> A | | | | | |
| GIUDIZIO GLOBALE EMS 98 | | | | | | <input type="checkbox"/> |
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Figura 6. Maschera estratta dal "Livello 0" della scheda seisMAP-DV per la definizione della vulnerabilità e del danno tipologici, congiunta all'individuazione dei meccanismi di danno attivatisi.

| MURATURE D'AMBITO | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|--------------------------|--------------------------|
| MECCANISMI CONNESSI ALLA SCARSA QUALITA' MURARIA | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | NA | NV | |
| Danno | SEPARAZIONE DEI PARAMENTI E DISGREGAZIONE DELLA MURATURA | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Vulnerabilità | <input type="checkbox"/> Elementi resistenti inadeguati <input type="checkbox"/> Assenza di diafani, muratura a due paramenti poco/po nulla collegati o a sacco incoerente <input type="checkbox"/> Malta scadente | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Danno | EFFETTI LOCALI IN CORRISPONDENZA DI DISCONTINUITA', VUOTI O ELEMENTI MALCOLLEGATI ALLA MURATURA | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Vulnerabilità | <input type="checkbox"/> Discontinuità localizzate (aperture tamponate, scuci cui mal realizzati, telai di rinforzo in c.a.) <input type="checkbox"/> Cornici di porte e finestre di fattura tradizionale (pietra, legno) non immerse o degradate <input type="checkbox"/> Riduzioni localizzate della sezione muraria (canne fumarie, nicchie, cavetti) | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Danno | EFFETTI DELL'INTERAZIONE TRA MURATURE E ORIZZONTAMENTI (SCORRIMENTO E/O MARTELLAMENTO DI SOLAI/COBERTURE RIGIDE SULLE PARETI) | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Vulnerabilità | <input type="checkbox"/> Muratura scadente <input type="checkbox"/> Sostituzione con solai pesanti/rigidi <input type="checkbox"/> Sostituzione con coperture pesanti/rigide <input type="checkbox"/> Presenza di cordoli in breccia su murature a doppio paramento o scadenti | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Figura 7. Maschera estratta dal "Livello 2" della scheda seisMAP-DV per la valutazione dei meccanismi locali di collasso.

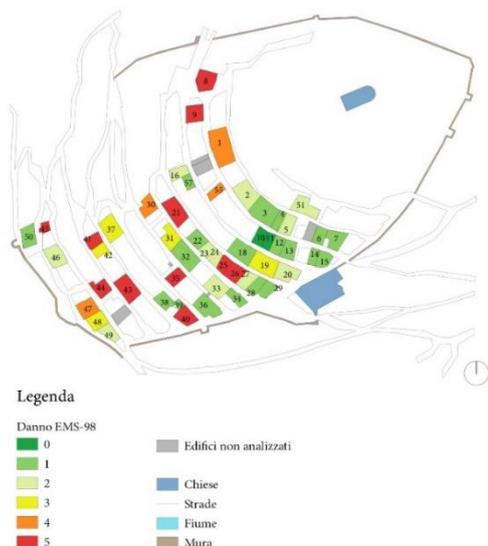
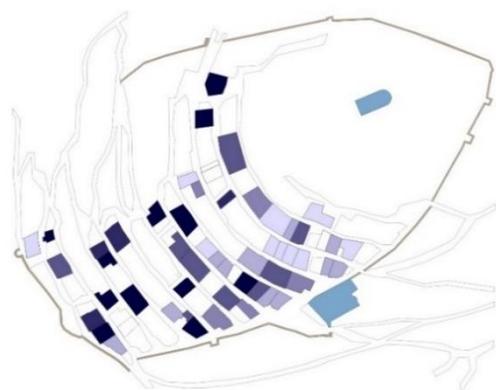


Figura 8. Campi Alto di Norcia (PG). Esempio di mappatura in ambiente GIS dei livelli di danno secondo la scala EMS 98, estratti dal “Livello 0” della scheda seisMAP-DV.



Legenda
Id AeDES
"Id" >= 0 AND "Id" <= 10
"Id" > 10 AND "Id" <= 30
"Id" > 30 AND "Id" <= 50
"Id" > 50 AND "Id" <= 70
"Id" > 70 AND "Id" <= 90
"Id" > 90 AND "Id" <= 100

a.



Legenda
Iv_AeDES
"Iv" >= 0 AND "Iv" <= 20
"Iv" > 20 AND "Iv" <= 40
"Iv" > 40 AND "Iv" <= 60
"Iv" > 60 AND "Iv" <= 80
"Iv" > 80 AND "Iv" <= 100

b.

Figura 9. Campi Alto di Norcia (PG). Esempio di calcolo automatico in ambiente GIS e mappatura di indicatori sintetici di (a) danno e (b) vulnerabilità a partire dai dati raccolti nel “Livello 1” della scheda seisMAP-DV.

Dal punto di vista procedurale si è predisposta la struttura della scheda in modo da poter essere implementata facilmente in ambiente informatico, sia esso una applicazione per smartphone o un database (Molinari 2019) oppure un sistema GIS (Saretta 2019).

Quest’ultimo è risultato fondamentale per evidenziare la presenza di effetti di sito in alcuni dei centri rilevati, nonché per avere un riscontro più preciso per l’analisi predittiva, ossia che vi sia effettiva corrispondenza, edificio per edificio, tra valutazione di vulnerabilità e previsione del danno (Figura 8).

Grazie agli ultimi aggiornamenti software è infatti possibile eseguire il calcolo automatico degli indici nel GIS, di cui si riporta un esempio in Figura 9, a partire dai dati di rilievo associati ai poligoni di base degli edifici (Saretta 2019).

4.1 Applicazione della scheda a casi studio interessati dal sisma Centro Italia 2016

I borghi scelti (cfr. Tabella 3 e Figura 10) appartengono per lo più alla zona meridionale della provincia di Macerata (Figura 11), una zona montuosa posta ai primi contrafforti del gruppo dei monti Sibillini, caratterizzata dalla presenza delle vallate dei fiumi Nera e Chienti. Due sono invece frazioni del comune di Norcia, ai limiti del territorio del comune, in quanto fondati come castelli per il controllo e la difesa di zone fertili assoggettate alla podesteria. I sopralluoghi sono stati condotti da 4 operatori nell’arco di tre settimane di attività per un totale di 580 schede compilate. La prima fase di sperimentazione, per l’elaborazione materiale e l’affinamento della procedura, ha richiesto circa un mese di attività, anche sul campo. Nel corso dei rilievi ci si è resi conto della necessità di un doppio passaggio: il primo finalizzato alla ricognizione generale del tessuto urbano e all’individuazione delle unità strutturali, funzionali alla compilazione delle schede, il secondo effettivamente dedicato al rilievo in sito.

In questa fase “pilota” di applicazione della scheda sono stati compilati tutti i livelli previsti, per il rilievo sia del danno sia della vulnerabilità, in modo da disporre di tutti i dati necessari alla calibrazione degli indici ed alla correlazione tra i dati raccolti ai vari livelli. Gli edifici si collocano nei nuclei storici e nelle espansioni di antica data dei centri analizzati, così da coprire tutte le tipologie tradizionali.

Dal punto di vista della tecnica costruttiva si è osservata una sostanziale omogeneità, con prevalenza di muratura relativamente povera, in pietra arenaria o calcarea, e malta di calce aerea spesso mista a terra (Fragomeli et al. 2017). I solai tipici sono in legno, a doppia orditura con calpestio in mezzane di cotto. Elevato è il numero di edifici che hanno subito interventi dal 1979 in poi. I dati sintetici dell'attività svolta sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3. Casi studio scelti con definizione dell'intensità macrosismica registrata dall'INGV, numero di unità strutturali presenti in ogni borgo, numero di schede compilate e danno medio rilevato.

| Località | I _{EMS} | n° edifici (US) | n° schede | Danno medio |
|--------------------------------|------------------|-----------------|-----------|-------------|
| Campi Alto di Norcia (PG) | VIII | 58 | 52 | 2,44 |
| Castelluccio di Norcia (PG) | IX-X | 195 | 43 | 3,63 |
| Castelsantangelo Sul Nera (MC) | IX | 145 | 109 | 3,13 |
| Monte Cavallo (MC) | VII | 90 | 42 | 0,40 |
| Muccia (MC) | VIII | 146 | 114 | 1,47 |
| Pieve Torina (MC) | VIII | 187 | 129 | 2,21 |
| Pievebovigliana (MC) | VII-VIII | 176 | 91 | 1,09 |
| TOTALE | | 997 | 580 | |



a.



b.



c.



d.



e.

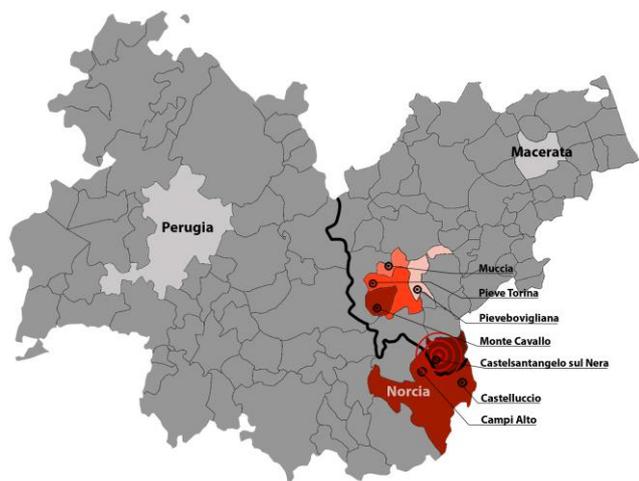


Figura 10. Individuazione nelle province di Perugia e Macerata dei sette casi studio scelti per l'applicazione del nuovo strumento schedografico seisMAP-DV.



f.



g.

Figura 11. Casi studio del basso maceratese: (a) Castelsantangelo sul Nera [1]; (b) Monte Cavallo [2]; (c) Muccia [3]; (d) Pieve Torina [4]; (e) Pievebovigliana di Valfornace [5]. Casi studio del comune di Norcia (PG): (f) Campi Alto [6]; (g) Castelluccio [7].

Al momento dei sopralluoghi la procedura è stata implementata nell'applicazione Moduli di Google, così da renderla disponibile su smartphone, eliminando la parte di reinserimento dati dal cartaceo in un database, ossia esportando i dati salvati direttamente in un foglio di calcolo.

Oltre al vantaggio di poter lavorare direttamente in digitale, l'applicazione consente la vista sintetica dei risultati in tempo reale nella forma di istogrammi ed areogrammi (Figura 12). Non stupisce che quasi il 70% degli edifici analizzati si collochi in un aggregato strutturale, e che solo il 10% sia rappresentato da edifici isolati dagli altri. Più interessante è osservare la netta prevalenza, per quanto riguarda il meccanismo più significativo, del danno per taglio (poco più del 50%), cui si potrebbe sommare un 8% di scorrimenti, seguito a distanza dai ribaltamenti (15%) e da ben un 10% di collassi.

Entrando nel dettaglio dei danni per taglio dei maschi murari, è possibile osservare che il danno massimo si spinge al danno 4 (Figura 12.c) e solo per un numero assai limitato di casi (7%).

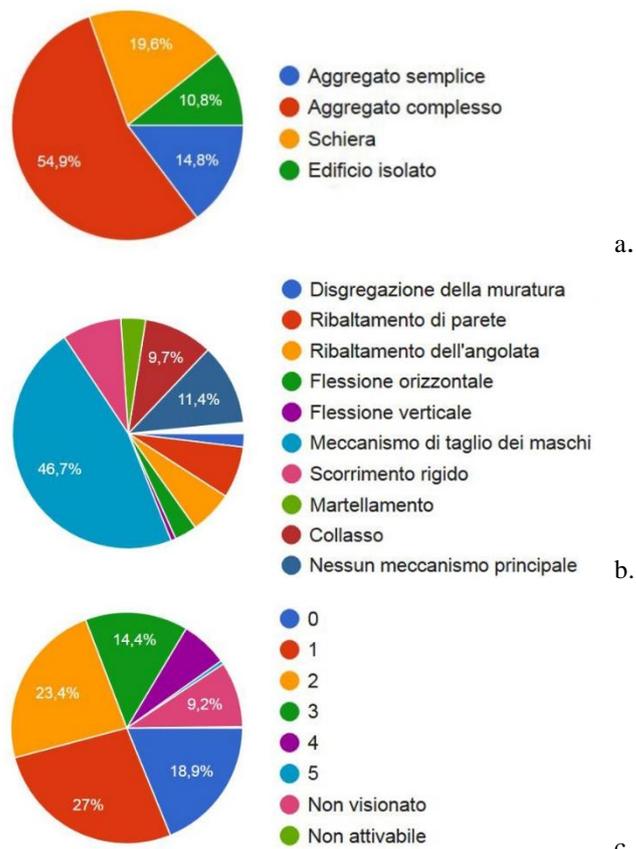


Figura 12. Esempi di aerogrammi esportati da Moduli di Google: (a) Identificazione nel tessuto urbano – Forma di aggregazione (“Livello 0”); (b) Meccanismi di danno attivati (“Livello 0”); (c) Livello di danno per il meccanismo locale di taglio nei maschi murari (“Livello 2”).

5 DEFINIZIONE DI NUOVE CLASSI DI VULNERABILITÀ COERENTI CON LA SCALA EMS 98

Avendo a disposizione una classificazione tipologica degli edifici dei centri storici rilevati più precisa di quella ottenibile con gli strumenti tradizionali è ora possibile tentare una corrispondenza con quella già proposta dalla scala EMS 98. Le DPM si fondano sulla relazione esistente tra vulnerabilità, danno ed intensità macrosismica; è pertanto possibile dedurre uno dei tre elementi conoscendo gli altri due. Nel caso specifico, i dati relativi al danno sono stati determinati grazie ai sopralluoghi, mentre le intensità macrosismiche raggiunte nelle località indagate sono fornite dall'INGV (Tertulliani e Azzaro, 2016). È noto un problema di conversione tra i dati macrosismici, espressi in scala MCS, e le DPM qui adottate come riferimento, basate invece sulla scala EMS 98 (Bernardini et al. 2007; Saretta 2019). Una volta costruite le DPM per ciascuna delle 8 classi riportate in Tabella 1 è stato possibile evidenziare alcuni gruppi leggermente più estesi

dal comportamento analogo, le cui distribuzioni percentuali sono riportate in Figura 13.

Dal confronto con le DPM proposte da (Giovinazzi 2005) e poi da (Bernardini et al. 2007), è possibile collocare queste nuove 4 classi di edifici inclusivi di interventi rispetto a quelle già esistenti nella EMS 98. Osservando la Tabella 4, si conferma la presenza di una classe più vulnerabile della A ('AA') che raggiunge livelli di danno più elevati a parità di intensità macrosismica, mentre murature consolidate in modo efficace si possono collocare in classe D, in analogia con il comportamento proprio di una muratura in blocchi "rinforzata o confinata" (Tertulliani et al. 2019) o di un edificio in c.a. (la similitudine indicherebbe l'alterazione della concezione strutturale originaria, tuttavia dimostra le migliori prestazioni raggiunte in opera dell'intervento). Inoltre, si osserva che edifici con murature in blocchi artificiali, particolarmente ben eseguite, possono sconfinare anche nella superiore classe E.

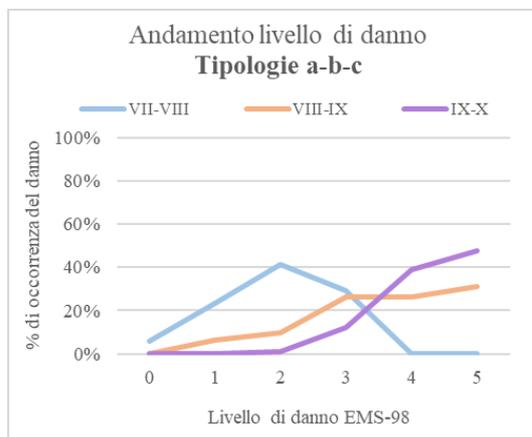
Tabella 4. Aggiornamento della classificazione di vulnerabilità integrando le definizioni proposte dalla EMS 98 con le nuove tipologie proposte.

| Tipo | Classe di vulnerabilità | Struttura verticale | Struttura orizzontale |
|------|-------------------------|--|--|
| a-b | AA | Muratura non rinforzata; rinforzata male | Rigida o semirigida pesante |
| c | A | Muratura non rinforzata | Leggera flessibile (legno) |
| - | B | Mattoni, pietra ben lavorata | Flessibile o semirigida |
| d-e | B-C | Ristilata, intonacata | Rigida e semirigida consolidata |
| - | C | Mattoni blocchi | Rigida |
| - | D | Rinforzata | Rigida |
| f-g | D | Consolidata (iniezioni, intonaco armato) | Rigida e semirigida |
| h | D-E | Muratura in mattoni e blocchi | Pesante e rigido: laterocem. + cordoli |

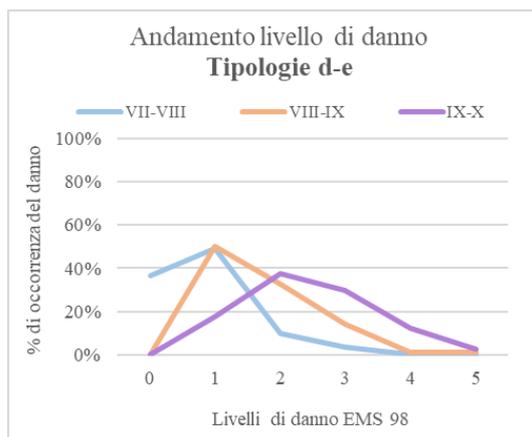
Qualifica degli orizzontamenti:

- rigidi: strutture in laterocemento con cordoli perimetrali;
- semirigidi: sistemi SAP, putrelle o Varesi e tavelloni o voltine, oppure in legno con interventi di rinforzo;
- flessibili: strutture in legno originarie.

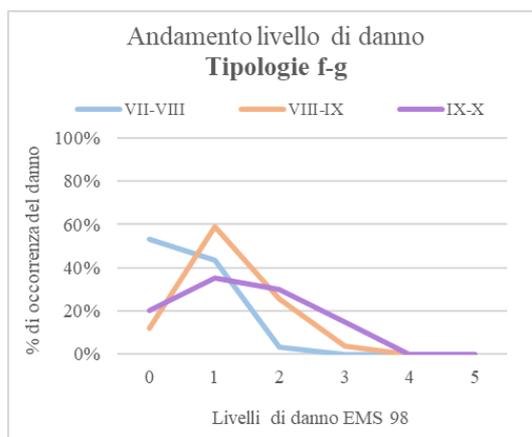
In grigio le categorie previste dalla scala EMS 98.



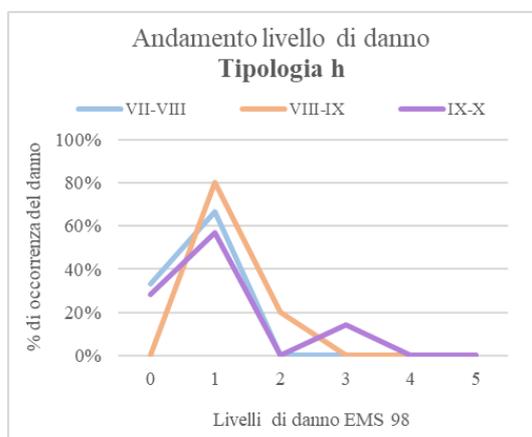
a.



b.



c.



d.

Figura 13. Andamento dei livelli di danno in funzione dell'intensità macrosismica per le tipologie (a) a-b-c, (b) d-e, (c) f-g, (d) h.

6 CONCLUSIONI

Gli edifici esistenti presentano alterazioni diffuse, dovute agli interventi strutturali di riparazione operati in seguito a terremoti pregressi, che possono incrementare la vulnerabilità e, di conseguenza, il danno atteso a determinate intensità sismiche.

Lo studio proposto ha permesso di mettere a punto una nuova procedura di rilievo multi-scala, interamente aggiornata su sistemi digitali, capace di selezionare ed integrare gli aspetti caratterizzanti ciascun livello osservazionale sulla base di una estesa casistica di edifici danneggiati in Italia Centrale. Dall'analisi degli edifici con interventi sono emerse nuove classi tipologiche, che si evidenziano con più elevata vulnerabilità rispetto alla classe peggiore riconosciuta dalla EMS 98, e conseguenti nuove relazioni con gli scenari macrosismici. Vengono, inoltre, ricollocati anche gli edifici oggetto di interventi efficaci in più coerenti categorie a minore vulnerabilità. Lo studio proseguirà con l'affinamento delle curve di previsione del danno secondo la classificazione tipologica aggiornata e la valutazione degli indici di vulnerabilità e di danno relativi a ciascun livello di approfondimento dei dati raccolti in sito.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto DPC-ReLUIIS 2019-2021.

BIBLIOGRAFIA

Riferimenti sitografici della Figura 11:

- [1] www.freevax.it
- [2] www.comitatosismacentroitalia.org
- [3] www.cronachemaceratesi.it
- [4] www.Turismo.provinciamc.it
- [5] www.valfornace.it
- [6] www.freevax.it
- [7] www.iluoghidelsilenzio.it

- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Della Bella, M., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., Papa, F., Zuccaro, G., 2007. *Field manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures*. Pinto A., Taucer F. eds; translation from Italian: Goretti A., Rota M., JRC Scientific and Technical Reports.
- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione. *L'industria delle costruzioni*, **419**.
- 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.

- Binda, L., Baronio, G., Palma, M., & Penazzi, D., 2000. Località di Roccanolfi di Preci e Montesanto di Sellano: redazione di schede per il rilievo tipologico e dei danni sismici agli edifici. In V. De Vecchis, *Patrimonio storico architettonico e terremoto: la diagnosi e gli interventi di recupero* (85-104). Teramo: Edigrafital.
- Binda, L., Cardani, G., Modena, C., Valluzzi, M., 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 ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia"*, 25-29 gennaio, Genova, IT.
- Binda, L., Gambarotta, L., Lagomarsino, S., & Modena, C., 1999. A multilevel approach to the damage assessment and the seismic improvement of masonry buildings in Italy. In Bernardini, A. (ed.), 1999. *Seismic damage to masonry buildings. Proceedings of the International Workshop of measures of seismic damage to masonry buildings, Monselice/Padova/Italy/25-26 June 1998*. Rotterdam: A.A.Balkema.
- Borri A., De Maria A., 2009. *Scheda di valutazione dell'IQM (indice di qualità muraria)*. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005-2008.
- Calvi, G., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J., Restrepo-Vélez, L., Crowley, H., 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, **43**(472), 75-104.
- Capaldini, P., Vasapollo, M., 1998. Edifici in muratura ripristinati dopo il terremoto del 19.09.1979 in Valnerina - Verifica sul campo dopo i nuovi eventi sismici del 26.09.1997 e successivi. *Ingegneria sismica*, Anno XV, **2**, maggio-agosto 1998, 5-13.
- Cardani, G., 2003. *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, Milano.
- Cifani, G., Petrucci, G., Lazzaro, D., D'Alessandro, S., Cialone, G., Martinelli, A., Petracca, A., Corazza, L., Petrini, V., Mannella, A., Milano, L., Beolchini, G. C., Antonacci, E., 2006. *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura*. L'Aquila: ITC-CNR.
- Cigni G., 1984. Dissesti e metodologie d'intervento: principi generali. In Carbonara G. (a cura di), *Restauro e cemento in architettura*, II, AITEC, Roma.
- Civerra C., Lemme A., Cifani G., (a cura di), 2007. *Strumenti per il rilievo del danno e della vulnerabilità sismica dei beni culturali*, Campobasso.
- Decreto ministeriale 20 novembre 1987. *Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*.
- Decreto ministeriale 3 marzo 1975. *Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*.
- Doglion, 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. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **13** (8), 2241-2264.

- 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 ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia"*, 25-29 gennaio, Genova, IT.
- Fragomeli, A., Galasco, A., Graziotti, F., Guerrini, G., Kallioras, S. et al., 2017a. Comportamento degli edifici in muratura nella sequenza sismica dell'Italia centrale del 2016 - Parte 1: Quadro generale, 2017. *Progettazione Sismica*, **8**(2), 45-74.
- Fragomeli, A., Galasco, A., Graziotti, F., Guerrini, G., Kallioras, S. et al., 2017b. 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.
- Galloni F., 1982 (a cura di). *Il restauro delle costruzioni in muratura. Problemi metodologici e tecniche di consolidamento*, Atti del 3° corso di formazione ASSIRCO, Palermo 22-25 ottobre 1980, Roma, Ed. Kappa.
- Gigante, R., 1998. *Interventi di ristrutturazione statica degli edifici in muratura*, Milano, ed. Il Sole 24 ore.
- Giovinazzi, S., 2005. *The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis*. Tesi di Dottorato, Braunschweig.
- GNDT, 1999. *Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici*, disponibile da <https://emidius.mi.ingv.it/GNDT2/Strumenti/Schede/Schede.htm>.
- Grünthal, G. (ed), 1998. European Macroseismic Scale 1998, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **15**.
- Gruppo di Lavoro per la prevenzione dei beni culturali dai rischi naturali, 2001. Scheda per il rilievo dei Beni Culturali - Danno alle Chiese - Modello A-DC. Disponibile da *Database Macrosismico Italiano-Emidius*: <https://emidius.mi.ingv.it/GNDT2/Strumenti/Schede/Schede.htm>.
- Gruppo di Lavoro per la prevenzione dei beni culturali dai rischi naturali, 2006. *Scheda per il rilievo del danno ai beni culturali - Palazzi, Modello B-DP*. Disponibile da www.puglia.beniculturali.it/getFile.php?id=2489.
- Lagomarsino, S., 1999. Damage survey of ancient churches: the Umbria-Marche experience. In Bernardini, A. (ed.), 1999. *Seismic damage to masonry buildings. Proceedings of the International Workshop of measures of seismic damage to masonry buildings, Monselice/Padova/Italy/25-26 June 1998*. Rotterdam: A.A.Balkema.
- Lagomarsino, S., Brencich, A., Bussolino, F., Moretti, A., Pagnini, L.C., Podestà, S., 1997. Una nuova metodologia per il rilievo del danno alle chiese: prime considerazioni sui meccanismi attivati dal sisma. *Ingegneria sismica*, Anno XIV, **3**, 70-83.
- Longhi, L., 2017. Danni riscontrati nel Maceratese dopo il Sisma del 2016. *Progettazione Sismica*, **8**(2), 21-30.
- Molinari, F., 2019. *Sviluppo in ambiente Android di una scheda multilivello per il rilievo del danno e della vulnerabilità sismica di edifici in muratura. Applicazione ad alcuni centri storici colpiti dal sisma Centro Italia 2016*. Tesi di laurea. Padova: rel. M.R. Valluzzi.
- OCDPC n. 405 10 novembre 2016. *Ulteriori interventi urgenti di protezione civile conseguenti agli eventi sismici che hanno colpito il territorio delle Regioni Lazio, Marche, Umbria e Abruzzo a partire dal giorno 24 agosto 2016*.
- Papa, S., Di Pasquale, G. (cur.), 2011. *Manuale per la compilazione della scheda per il rilievo del danno ai beni culturali, Chiese. Modello A-DC*. Presidenza del Consiglio dei Ministri - DPC.
- Pasta A., 1999. *Restauro conservativo e antisismico*, Flaccovio, Palermo.
- Penazzi, D., Valluzzi, M., Cardani, G., Binda, L., Baronio, G., Modena, C., 2000. Behavior of historic masonry buildings in seismic areas: lessons learned from the Umbria-Marche earthquake. *12th International Brick and Block Masonry Conference*, Madrid 25-28 giugno 2000.
- Regione autonoma Friuli Venezia Giulia. *Prescrizioni per l'edilizia nelle zone sismiche, legge 2 febbraio 1974 n.64 e norme tecniche (D.M. 3 marzo 1975), note interpretative e di commento con suggerimenti applicativi, esempi di intervento per la riparazione e il rafforzamento di edifici di abitazione*.
- 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.
- 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., Valluzzi, M.R., Cardani, G., 2019. Updating of seismic vulnerability prediction of masonry buildings in Campi Alto di Norcia (PG) in the hindsight of retrofitting interventions, *XVIII congresso nazionale ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia"*, 15-19 settembre, Ascoli Piceno, IT.
- Scillone M.L., Di Segni, M., 2000. *Tecniche antisismiche per il recupero strutturale di fabbricati in muratura tradizionale*, Roma, Edizioni Kappa.
- 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).
- Tertulliani, A., Azzaro, R. (a cura di), 2016. *Rilievo macrosismico per i terremoti nell'Italia centrale. Aggiornamento dopo le scosse del 26 e 30 ottobre 2016*. Rapporto interno INGV, Roma.
- Tertulliani, A., Azzaro, R., Buffarini, G., 2019. Ed. italiana della Scala Macrosismica Europea 1998, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et Séismologie*, **32**.
- Valluzzi, M.R., Garbin, E., Modena, C., 2014. La riabilitazione dei solai in legno in zona sismica: interventi di rinforzo nel piano e contributo nella ripartizione delle forze orizzontali negli edifici di muratura. *REHABEND 2014 Congresso Latinoamericano 'Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio'*, 1-4 April, 2014, Santander, Spain.
- Valluzzi, M.R., Salvalaggio, M., Sbrogiò, L., 2019. Repair and conservation of masonry structures. In Milani G., Ghiassi B. (eds). *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures: from theory to application*.
- Valluzzi, M.R., Sbrogiò, L., 2019. Vulnerability of Architectural Heritage in Seismic Area: Constructive Aspects and Effect of Interventions. In Amoroso G., Salerno E. (eds.). *Cultural landscape in practice. Conservation vs. Emergencies*.
- Zuccaro, G., De Gregorio, D., Dolce, M., Speranza, E., Moroni, C. (a cura di), 2014. *Manuale per la*

compilazione della scheda di I° livello per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari (CARTIS 2014).

Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., Moroni, C., 2015. La scheda CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico. *XXXIV convegno nazionale "Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida"*, Trieste.