



## Curve di vulnerabilità calibrate sul terremoto del 2013 in Lunigiana e Garfagnana (Italia)

Viola Nistri<sup>a</sup>, Sonia Boschi<sup>a,b</sup>, Emanuele Del Monte<sup>a,b</sup>, Maurizio Orlando<sup>b</sup>, Andrea Vignoli<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> S2R - Spin off dell'Università degli Studi di Firenze, Via Vittorio Emanuele II 161, 50134 Firenze

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Via di Santa Marta 3, 50139 Firenze.

*Keywords: vulnerabilità sismica, tipologie edilizie, schede AeDES, database*

### ABSTRACT

Ai fini della mitigazione del rischio sismico, della salvaguardia delle vite umane e dei beni immobili, gli strumenti di analisi territoriale della vulnerabilità costituiscono un supporto efficace, speditivo e non eccessivamente oneroso per le amministrazioni pubbliche.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di validare delle curve di vulnerabilità e di fragilità del costruito che, a partire da dati di pericolosità e di caratterizzazione tipologico-strutturale (CarTIS) dei fabbricati di un territorio, consenta di tracciare scenari di danno/inagibilità a scala di comparti edilizi, ovvero di aree omogenee sub-comunali.

A questo scopo si sfruttano le informazioni contenute in più di 3000 schede AeDES, compilate in Lunigiana e in Garfagnana (area nord-ovest della Regione Toscana) dopo il sisma del 21/06/2013 ( $M_L=5.2$  e  $M_W=5.3$ ), e un database CarTIS appositamente sviluppato in ambiente GIS.

Lo studio si conclude con la proposta di modifica di curve parametriche di vulnerabilità per bassi valori di intensità macrosismica EMS98 (IV-VI) o di PGA (0.04g-0.30g), decisamente ricorrenti nella storia della sismicità del nostro Paese, e nell'esplicitazione di nuove correlazioni empiriche che legano la percentuale di fabbricati inagibili ai gradi di danno EMS98 ed ai parametri di scuotimento.

## 1 INTRODUZIONE

Il territorio italiano è caratterizzato da una significativa pericolosità sismica, da una grande densità abitativa e da un patrimonio edilizio molto vulnerabile, ricco di edifici storici, spesso sprovvisti di presidi antisismici.

Tra il 1981 e il 2012 si sono succeduti più di 150 000 eventi sismici, dei quali più di 50 con magnitudo Richter superiore a 5, le vittime sono state numerose ed i costi complessivi dei danni provocati dai terremoti hanno superato 181 miliardi di euro (Rapporto ANCE/CRESME 2012). I recenti eventi sismici hanno ancora una volta confermato la fragilità del costruito, specialmente storico in muratura (Fiorentino et al. 2018, Sorrentino et al. 2018).

Nell'ottica della mitigazione del rischio sismico, negli anni sono stati condotti numerosi studi scientifici a scala territoriale, mirati alla conoscenza del patrimonio edilizio ed allo sviluppo di modelli previsionali volti al tracciamento di scenari plausibili di danno o di rischio sismico. La finalità è quella di fornire

strumenti utili alle amministrazioni pubbliche per identificare con una certa immediatezza le aree più a rischio e poter impostare un'attenta politica di rinforzo strutturale del costruito.

Lagomarsino e Giovinazzi (2006) e Bernardini et al. (2007a,b) elaborano un modello di vulnerabilità in grado di suggerire, per ogni valore di intensità macrosismica in scala EMS-98 e per ciascuna classe di vulnerabilità o classe tipologica di edifici, una probabile distribuzione di danno sul costruito. Esso trae origine da matrici di probabilità di danno numeriche direttamente dedotte dalla suddetta scala mediante una procedura che prevede l'impiego della teoria Fuzzy. I medesimi autori contribuiscono anche al progetto europeo RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski 2003, Mourouxet al. 2004) che ambisce all'analisi dell'impatto globale dei terremoti, in determinate zone del continente europeo. In tale contesto un'importante attenzione viene riservata sia alla predisposizione di una metodologia modulare universale sia allo studio delle diverse peculiarità, dell'organizzazione funzionale e sociale e dei punti deboli dei sistemi urbani europei, durante e dopo un evento sismico.

Nel 2004 vengono pubblicati più documenti inerenti al progetto S.A.V.E. (Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità del Patrimonio Edilizio e dei Sistemi Urbani, Zuccaro 2004) che contempla una metodologia più speditiva di classificazione degli edifici in funzione della loro vulnerabilità sismica, per valori di intensità macrosismica prefissati. Essa è fondata su un'analisi critica di schede di rilevamento del danno, raccolte in seguito ad alcuni eventi sismici italiani (quali i terremoti dell'Irpinia 1980, dell'Abruzzo 1984, della Sicilia 1990, etc), e passa attraverso la definizione di un indicatore sintetico del danno medio (SPD), al quale viene convenzionalmente correlata la classe di vulnerabilità dei manufatti.

Recentemente si sono sviluppate metodologie di analisi di vulnerabilità a scala di gruppi di edifici (Chinni et al. 2013, Boschi et al. 2017), basate su metodi empirici di stima della vulnerabilità sismica (Metodo dell'Indice di Vulnerabilità Benedetti e Petrini 1984, G.N.D.T. 1993).

Questo lavoro si colloca in tale settore di ricerca e si incentra sui seguenti macro-obiettivi:

- individuazione delle tipologie edilizie maggiormente diffuse nel territorio della Lunigiana e della Garfagnana (area nord-ovest della Toscana, zona sismica 2, Figura 1), resa possibile grazie alla raccolta di più di 3000 schede AeDES, compilate dopo il sisma del 21/06/2013, e all'organizzazione di un database contenente informazioni tipologico - strutturali riguardanti gli edifici di alcuni dei comuni colpiti dal sisma. Tali informazioni sono quelle presenti nella scheda CarTIS (Zuccaro et al 2014, 2015), elaborata nell'ambito del Progetto Reluis "Sviluppo di una metodologia sistematica per la valutazione dell'esposizione a scala territoriale sulla base delle caratteristiche tipologico-strutturali degli edifici" (2014-2016);

- effettuazione di un'analisi di vulnerabilità sismica a scala territoriale, mediante il metodo Macrosismico (Bernardini et al. 2007b);

- calibrazione di curve parametriche di vulnerabilità e di fragilità sulla base di dati sperimentali di danno, per bassi valori di intensità macrosismica EMS-98 (European Macroseismic Scale, Gruntal 1998) (IV-VI) o di PGA (0.04g-0.30g), molto frequenti nella storia della sismicità italiana;

- proposta di correlazioni empiriche di inagibilità/danno, calibrata sull'analisi dei danni riportati dai fabbricati dopo il terremoto del 2013 e dei parametri di scuotimento dedotti dalle ShakeMaps messe a disposizione dall'INGV.

## 2 EVENTO SISMICO DI RIFERIMENTO

La zona di Appennino settentrionale che comprende i territori della Lunigiana e della Garfagnana è caratterizzata da un'attività sismica "medio-alta", nel contesto della sismicità italiana; i terremoti che hanno interessato questi luoghi nel corso degli anni sono molteplici. La versione del catalogo sismico italiano CPTI11 (Rovida et al. 2011) riporta diversi eventi con magnitudo equivalente  $M_w$  (calcolata sulla base dell'intensità macrosismica) prossima a 5.0. L'unica eccezione è rappresentata dal sisma del 7 settembre 1920, con magnitudo strumentale pari a 6.5; quest'ultimo è ritenuto il terremoto più forte tra quelli avvenuti in tutto l'Appennino settentrionale.

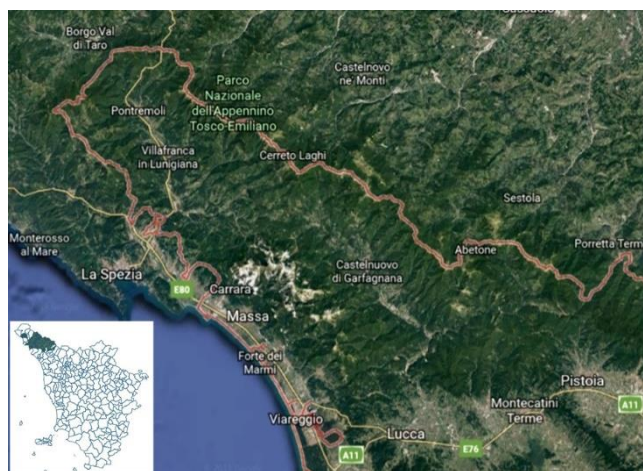


Figura 1. Lunigiana e in Garfagnana (Nord Ovest Toscana).

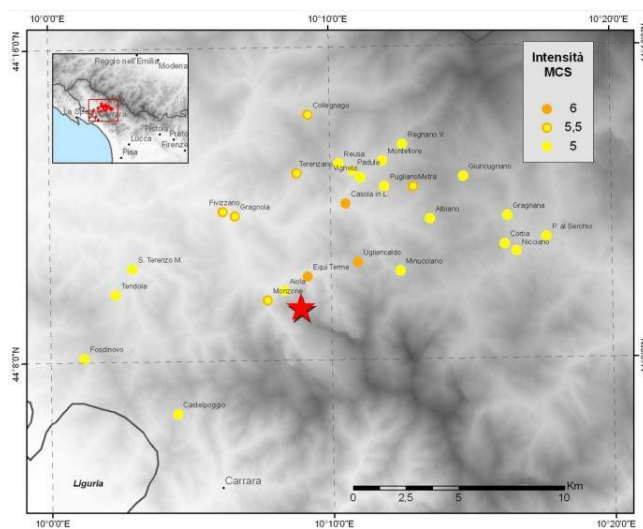


Figura 2. Mappa delle località oggetto del rilievo diretto, con relativa intensità MCS. La stella rossa indica l'epicentro strumentale della scossa principale.

La scossa maggiore del sisma del 21/06/2013 è rilevata alle ore 10:33 UTC ed investe sia la Lunigiana sia la Garfagnana, ovvero il territorio della Toscana nord-occidentale a cavallo tra le province di Massa-Carrara e di Lucca. L'epicentro è localizzato dalla Rete Sismica Nazionale nelle Alpi Apuane, circa 9 km a N-NE dalla città di

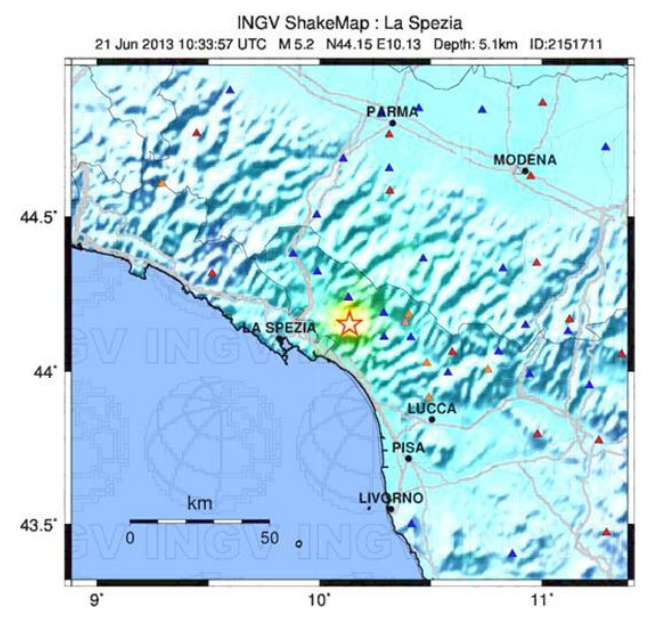
Carrara, nel punto di coordinate: 44.15°N (Lat.); 10.14°E (Long.), la profondità dell'ipocentro è pari a circa 5.1 km. La scossa principale è seguita da oltre 1300 repliche, di cui 22 con magnitudo uguale o superiore a 3 (Comunicato INGV del 1° luglio del 2013, ore 5:00 UTC) e 8 con magnitudo compresa tra 3.6 e 4.4.

Le località più colpite sono Casola in Lunigiana, Fivizzano, Sillano-Giuncugnano e Minucciano (Figura 2).

### 3 MATERIALE

#### 3.1 Mappe di Intensità macrosismica e di PGA relative al terremoto del 21/06/2013

Le ShakeMaps (Figura 3) relative al terremoto del 21/06/2013, reperite sul sito dell'INGV, sono generate automaticamente, a partire dai dati registrati dalle stazioni sismometriche e accelerometriche della Rete Sismica Nazionale, in termini di accelerazione di picco (PGA, [g]), velocità di picco (PGV, [cm/s]) e di Intensità macrosismica "instrumentally-derived", in scala Mercalli Modificata.



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severo	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. (%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL. (cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 3. ShakeMap relativa al sisma del 21/06/2013.

Con le ShakeMaps, è possibile quindi definire, per ciascun edificio su cui è stato effettuato il sopralluogo, un valore di PGA ed uno di Intensità Macrosismica. Riportando in un piano cartesiano le coppie PGA-I è possibile tracciare la retta di regressione che approssima meglio il loro andamento (Equazione 1):

$$I_{MM} = 2.542 \cdot \text{Log}(PGA) - 0.340 \quad (1)$$

(Con PGA espressa in cm/s<sup>2</sup>).

Questa espressione è utilizzata per la traduzione in termini di PGA delle curve parametriche di vulnerabilità e di fragilità, originariamente formulate da Bernardini et al. (2007a,b) in funzione dell'Intensità macrosismica EMS-98.

#### 3.2 Le schede AeDES compilate dopo il terremoto del 21/06/2013

A seguito dell'evento sismico del 2013, le attività di gestione tecnica sono svolte sotto il diretto coordinamento del Dipartimento della Protezione Civile, di concerto con le Amministrazioni competenti dei territori interessati; le campagne di sopralluogo post-sisma sono effettuate con l'ausilio della Scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari (AeDES) (Baggio et al. 2014). Le parti principali di cui si compone tale scheda sono nove: Identificazione del sopralluogo, degli aggregati e degli edifici; Descrizione dell'edificio; Tipologia; Danni ad elementi strutturali e provvedimenti di pronto intervento eseguiti; Danni ad elementi non strutturali e provvedimenti di pronto intervento eseguiti; Pericolo esterno indotto da altre costruzioni, reti, versanti e provvedimenti di pronto intervento eseguiti; Terreno e fondazioni; Giudizio di agibilità; Altre osservazioni.

Dopo il terremoto del 21/06/2013 vengono rispettivamente compilate 2385 schede per la Lunigiana e 768 per la Garfagnana (quest'ultima zona più lontana dall'epicentro).

### 4 ANALISI DEL CAMPIONE DI EDIFICI E TIPOLOGIE EDILIZIE

Gli edifici su cui vengono effettuati i sopralluoghi di agibilità post-sisma appartengono a ben 18 Comuni diversi (numero di abitanti complessivo: 55 612, fonte: ISTAT 2017/2018), 6 della Lunigiana (Aulla, Casola in Lunigiana, Fivizzano, Fosdinovo, Licciana Nardi, Mulazzo) e 12 della Garfagnana (Camporgiano, Careggine, Castelnuovo di Garfagnana, Castiglione di Garfagnana, Fosciandora, Galliciano, Sillano - Giuncugnano, Minucciano, Piazza al Serchio, San Romano in Garfagnana, Vagli Sotto, Villa Collemantina) (Figure 4).

La zona sismica assegnata a tali territori comunali è la 2 (zona con pericolosità sismica media in cui possono verificarsi terremoti forti).

Tutti, eccetto Sillano – Giuncugnano (Comune istituito il 1° gennaio 2015 per fusione dei territori di Sillano e Giuncugnano), rientrano nella lista di Comuni classificati sismicamente dal Regio Decreto n°431 del 13/03/1927.

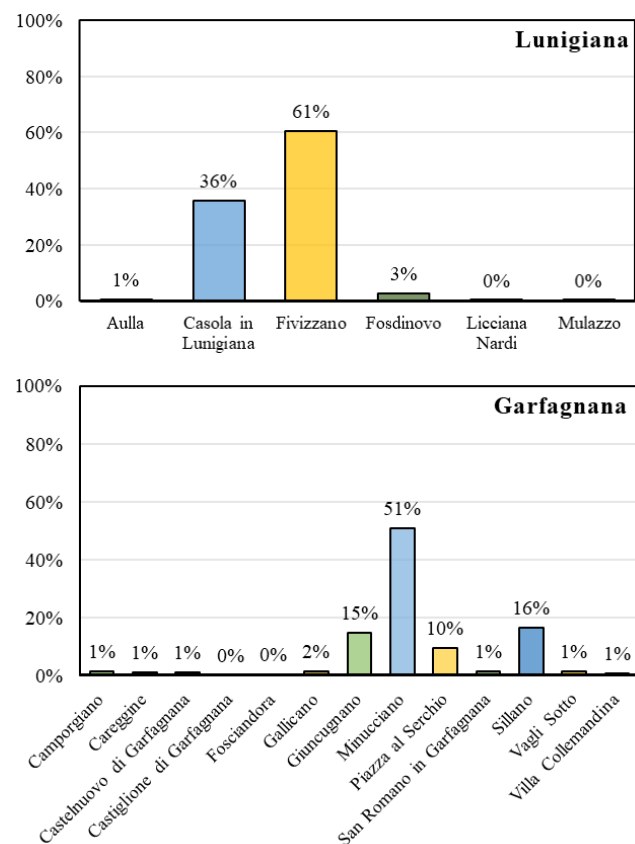


Figura 4. Distribuzione percentuale delle Schede AeDES per i comuni della Lunigiana (in alto) e Garfagnana (in basso).

Per quanto riguarda l'analisi del costruito, sia in Lunigiana che in Garfagnana prevalgono le strutture in muratura, la maggior parte delle quali (più del 70 % degli edifici analizzati) risale al XIX secolo e alla prima metà del XX secolo (Figure 5).

Dall'analisi statistica del campione di schede AeDES disponibile emerge, inoltre, che, dopo la Legge n° 88 del 1982 (Disciplina dei controlli sulle costruzioni in zone soggette a rischio sismico), circa il 25% di tali strutture è soggetto a interventi di ristrutturazione/consolidamento. Tuttavia, di questi ultimi non è possibile accertare la tipologia e la influenza sul comportamento statico e sismico degli edifici.

In funzione del materiale, del periodo di realizzazione e delle tipologie di strutture orizzontali e verticali, l'edificato censito viene classificato nelle tipologie edilizie contemplate nella scala di Intensità Macrosismica EMS98 (Grunthal, 1998): M1 (rubble stone), M3 (simple stone), M5 (unreinforced brick), M6 (unreinforced brick with RC floors), M7 (reinforced or confined masonry), RC1 (frame without earthquake-resistant design, ERD), RC2 (frame with moderate level of ERD), RC3 (frame with high level of

ERD), RC4 (shear walls without ERD), RC5 (shear walls with moderate level of ERD), RC6 (shear walls with high level of ERD).

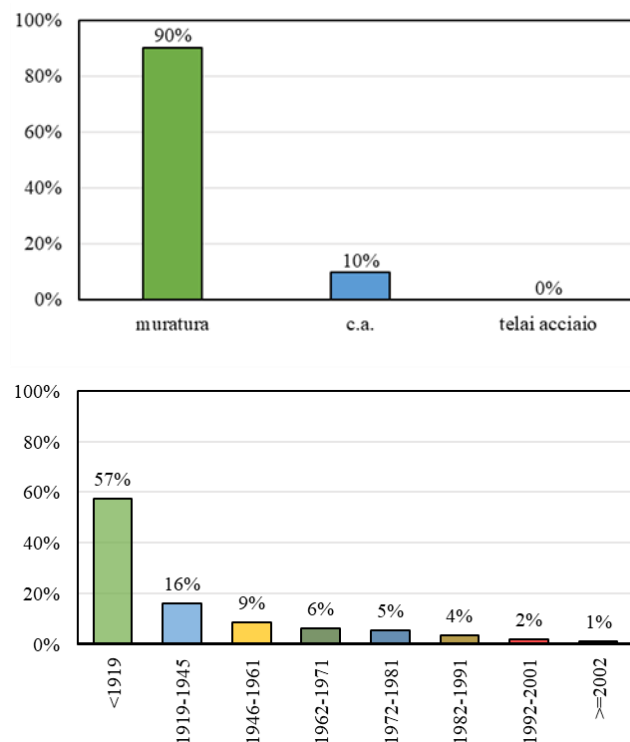


Figura 5. Tipologia di materiale (in alto) e periodo di costruzione (in basso) degli edifici analizzati tramite Schede AeDES.



Figura 6. Esempio di edificio in classe M1.

La tipologia più diffusa nel territorio oggetto di studio è la M1 (Figura 6, Tabella 1), le cui principali caratteristiche sono:

- Periodo di costruzione di norma antecedente al 1900 o, più raramente, appartenente alla prima metà del 1900.
- Muratura a tessitura irregolare e di cattiva qualità (pietrame non squadrate, ciottoli, etc.), con o senza catene o cordoli.
- Solai deformabili o irrigiditi grazie ad interventi di ristrutturazione o di ripristino strutturale.
- Possibile presenza di volte incatenate.
- Edifici costituiti da 2 o 3 piani fuori terra e, in generale, assenza di piani interrati.

Come precisato nel Manuale AeDES, gli edifici su cui effettuare il sopralluogo sono scelti in base ai danni riportati e alle dirette richieste dei proprietari. La distribuzione della percentuale di edifici rilevati per classe tipologica EMS98 è riportata in Figura 7. Il numero di schede relative a edifici moderni, in calcestruzzo armato e poco vulnerabili, che hanno subito danni lievi a seguito dell'evento sismico, è pertanto molto ristretto (Figura 7).

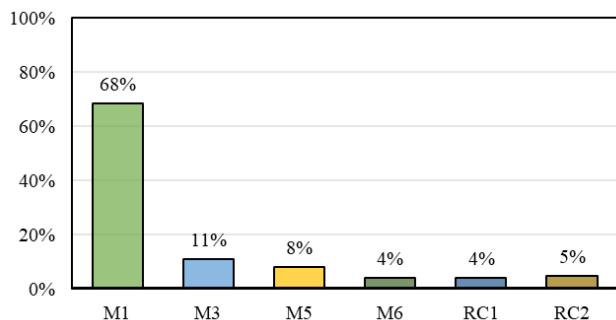


Figura 7. Distribuzione delle diverse tipologie edilizie EMS-98 in Lunigiana e in Garfagnana.

Tabella 1. Numero di schede AeDES compilate per ciascuna tipologia edilizia EMS-98.

Tipologia edilizia	Numero di schede	Percentuale
M1	2083	(68%)
M3	335	(11%)
M5	257	(8%)
M6	109	(4%)
RC1	135	(4%)
RC2	142	(5%)

## 5 ANALISI DI VULNERABILITÀ

Per valutare la vulnerabilità sismica di ciascun edificio ispezionato si adotta il Metodo Macrosismico (Lagormasino e Giovinazzi 2006, Bernardini et al. 2007a,b, Mouroux et al. 2004), come spesso utilizzato in recenti studi di vulnerabilità a scala territoriale (alcuni esempi in Vicente et al. 2011, Del Gaudio et al. 2016, Cherif et al. 2017, Colajanni et al. 2017).

Esplicitata la classe tipologica di appartenenza di ogni edificio, è possibile attribuire ad esso un indice numerico di vulnerabilità di partenza,  $V_0$ . Per pervenire all'indice finale  $V$  (compreso tra 0 e 1), si agisce su  $V_0$ , sommandogli algebricamente numerosi modificatori di comportamento sismico (stato di conservazione, numero di piani, sistema strutturale, copertura, fondazioni,...), differenziati per le strutture in muratura e per quelle in calcestruzzo armato e scelti in base al periodo di costruzione e all'evoluzione normativa in materia sismica, ai dati contenuti nelle schede AeDES o a particolari colti con l'osservazione diretta dei manufatti su GoogleMaps-Streetview.

Per tracciare le curve di vulnerabilità relative a ciascuna tipologia edilizia, si ricorre alla Equazione 2 di (Bernardini et al. 2007a,b) che restituisce il danno medio atteso in funzione dell'indice di vulnerabilità  $V$  e dell'Intensità macrosismica  $I_{EMS-98}$  (variabile tra  $V$  e  $XII$ ):

$$\mu_D = (2.5 + 3 \cdot \tanh\left(\frac{I+6.25V-12.7}{3}\right)) \cdot f(V, I) \quad (2)$$

$$f(V, I) = e^{(V/2 - (I-7))}, \text{ per } I \leq 7; f(V, I) = 1, \text{ per } I > 7 \quad (3)$$

in cui  $\mu_D$  è parametro di danno medio,  $I$  è l'intensità macrosismica in scala EMS-98 e  $V$  è l'indice di vulnerabilità (compreso tra 0 e 1).

Per ogni classe di edifici si disegnano le curve di vulnerabilità con  $V=V_{\min}$ ,  $V=V_{\text{medio}}$  e  $V=V_{\max}$ , ovvero si definiscono dei fusi di danneggiamento probabile (Figure 8). Infine, grazie alla correlazione lineare espressa in Equazione 1, si possono tradurre tali grafici in termini di PGA. Per bassi valori dei parametri di scuotimento ( $I_{EMS-98} < 6$ ) il danno medio leggibile su queste curve si mantiene al di sotto del valore unitario.

Per quanto concerne, invece, le curve di fragilità è necessario conoscere la probabilità di superamento di ciascun livello di danno EMS-98, per diversi valori di Intensità macrosismica ( $I=5 \div 12$ ) o di PGA (Figura 8).

Per determinare le probabilità di occorrenza di ciascun grado di danno EMS-98 si integra la funzione di densità di probabilità beta (in cui  $t=8$  e  $r$  variabile in funzione del danno medio  $\mu_D$ ) tra gli estremi suggeriti da Bernardini et al. (2007a), come riportato in Equazione 4:

$$P(0) = \int_0^{0.5} p_\beta(x) dx \quad P(k) = \int_{k-0.5}^{k+0.5} p_\beta(x) dx$$

$$P(5) = \int_{4.5}^5 p_\beta(x) dx$$

$$k=1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

In riferimento ad un'intensità macrosismica EMS-98 pari a  $V$  (la più diffusa per il sisma del 2013 in oggetto), si rileva una percentuale di edifici con danno uguale o superiore a D3, D4 o D5 quasi nulla. Per circa il 20% dei fabbricati si prevede un danno D2, mentre, per la parte rimanente di essi, D0/D1.

Si specifica che da qui in avanti si farà prevalentemente riferimento alla tipologia M1 in quanto il numero di edifici schedati è molto alto e superiore di un ordine di grandezza rispetto a quello delle altre classi e, in molte località della Lunigiana e della Garfagnana, la percentuale di edifici ispezionati supera il 60% del numero totale di edifici M1 censiti. Diversi autori (Bramerini et al. 1995, Rota et al. 2008) ritengono tale percentuale sufficiente ai fini del conseguimento

di risultati e statistiche attendibili per una determinata tipologia edilizia.

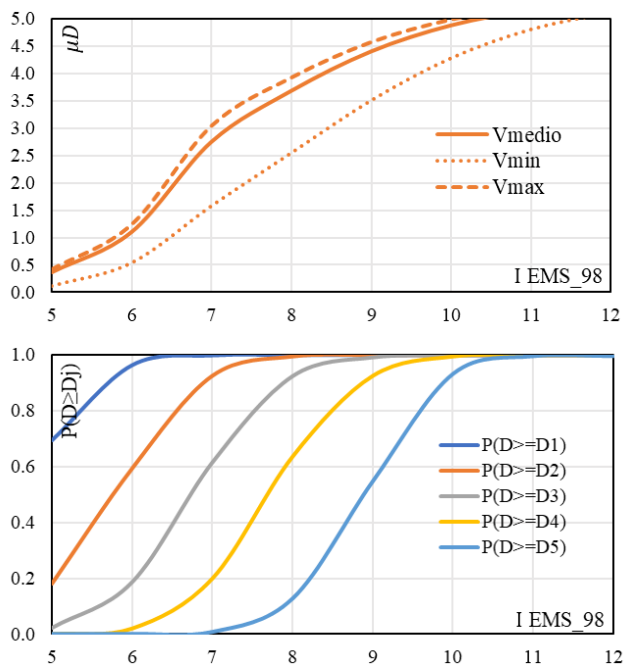


Figura 8. Curve di vulnerabilità (in alto) e di fragilità (in basso) per la tipologia edilizia M1.

## 6 ANALISI DI DANNO E AGIBILITÀ

Per poter descrivere la distribuzione del danno subito dagli edifici della Lunigiana e della Garfagnana si prende in esame la Sezione 4 delle schede AeDES (Figura 9). Per poter passare dalla Tabella dei “danni ad elementi strutturali” ad un unico livello globale di danneggiamento di ciascun fabbricato, si applica il metodo introdotto nel Progetto SAVE (Zuccaro 2004).

Livello - estensione	DANNO <sup>(1)</sup>										PROVEDIMENTI DI P.I. ESEGUITI					
	D4-D5 Gravissimo			D2-D3 Medio grave			D1 Leggero				Nullo					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	A	B	C	D	E	F
1 Strutture verticali	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Solai	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 Scale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 Copertura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 Tamponature-tramezzi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6 Danno preesistente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 9. Tabella di rilevamento del danno contenuta nella Sezione 4 delle schede AeDES.

Questa procedura prevede il calcolo di un indice di danno di partenza (Indice di partenza o Piniziale) sia per le strutture verticali che per quelle orizzontali, nell’ipotesi di un livello di gravità di danneggiamento decrescente linearmente dal danno D4-D5 esteso a più di 2/3 dell’edificio (colonna A della suddetta Tabella, Figura 9) al danno D1 esteso a meno di 1/3 del manufatto (colonna I). L’indice viene poi normalizzato rispetto alla combinazione di danno più penalizzante per ogni componente strutturale, che si verifica in caso di danno gravissimo con estensione maggiore di 2/3 (Pdi(A)) e danno

medio-grave con estensione minore di 1/3 (Pdi(F)); il risultato della somma Pdi(A)+Pdi(F) deve essere pari a 100. I valori Pdi così conseguiti sono riportati nell’ultima riga della Tabella 2.

Tabella 2. Valori dell’Indice di danno Pd deducibili dalla Tabella del danno contenuta nelle schede AeDES.

Tab. AeDES	A	B	C	D	E
Piniziale	100	80	60	50	30
Pdi	83.33	66.67	50.00	41.67	25.00

Tab. AeDES	F	G	H	I
Piniziale	20	15	10	5
Pdi	16.67	12.50	8.33	4.17

Nota l’indice Pdi massimo tra quello relativo alle strutture verticali e quello relativo alle strutture orizzontali (Pdimax=Pd), è possibile ricondursi al danno medio dell’edificio,  $d_m$  (scala del danno EMS98, Tabella 3):

Tabella 3. Attribuzione dei gradi di danno EMS98 in funzione del parametro Pd.

Pd	$90 \leq Pd$	$60 \leq Pd < 90$	$25 \leq Pd < 60$	$10 \leq Pd < 25$	$Pd < 10$
$d_m$	5	4	3	2	1

Ai fini del confronto tra i dati sperimentali di danno e le curve parametriche di vulnerabilità, serve stabilire una correlazione tra Pd (0÷100) e il parametro di danno  $\mu_D$  (0÷5). A tale proposito, dato che i range di Pd corrispondenti ai diversi gradi di danno EMS-98 non mostrano tutti la medesima ampiezza, ci si avvale di cinque differenti relazioni lineari tra le due grandezze. Esse sono trascritte nel grafico in Figura 10.

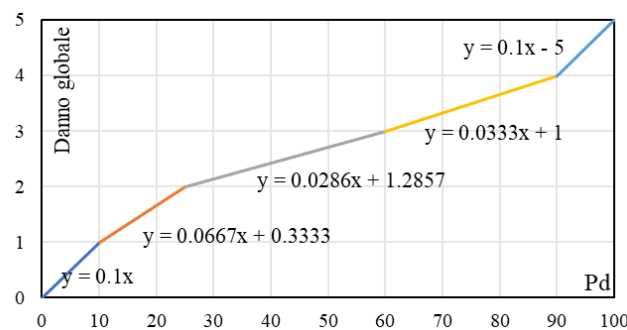


Figura 10. Relazioni lineari  $\mu_D$ -Pd.

## 7 CALIBRAZIONE DI CURVE DI VULNERABILITÀ E DI FRAGILITÀ

Si suddivide il campione dei manufatti in M1 in più gruppi caratterizzati da intensità macrosismica o PGA costante dovuta all’evento sismico; per ciascuno di questi ultimi, si procede con l’eliminazione dei dati outliers, ovvero dei valori anomali di danno che fuoriescono dai rispettivi boxplots della distribuzione, e si va a mediare il

danno globale subito sul volume del costruito. In questo modo è possibile, nei grafici in cui si sono rappresentati i fusi di vulnerabilità e le curve di fragilità in funzione dell'Intensità macrosismica e della PGA, introdurre i punti "sperimentali/empirici" trovati, con coordinate rispettivamente pari a ( $I_{EMS-98}$ ;  $\mu_D$  ponderato sul volume degli edifici) e ( $PGA$ ;  $\mu_D$  ponderato sul volume degli edifici).

I risultati ottenuti sono riportati nelle Figure 11, in termini di curve di vulnerabilità, e nelle Figure 12, a livello di curve di fragilità.

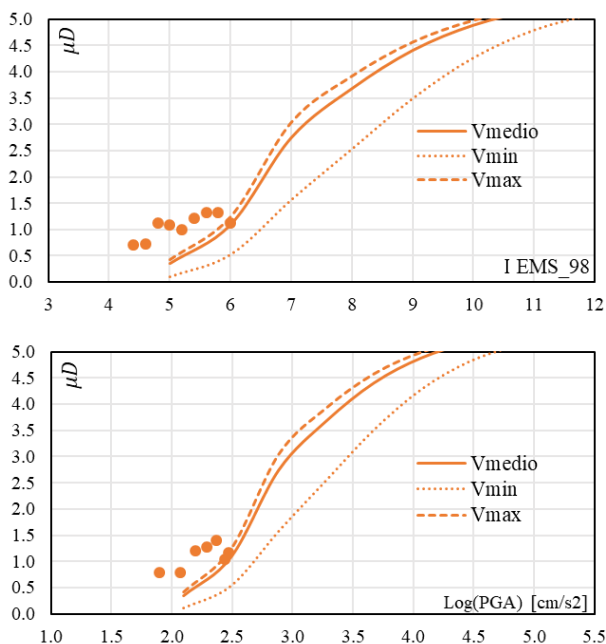


Figura 11. Curve e punti sperimentali di vulnerabilità per la tipologia edilizia M1, in termini di  $I_{EMS-98}$  (in alto) e PGA (in basso).

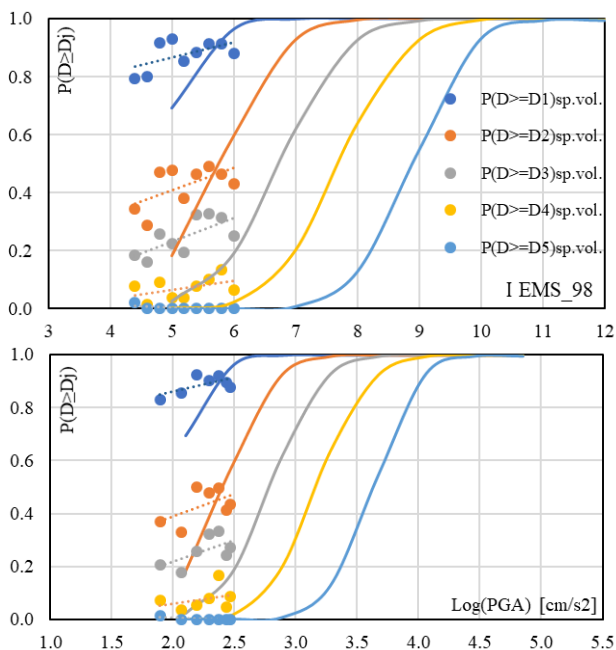


Figura 12. Curve e punti sperimentali di fragilità per la tipologia edilizia M1, in termini di  $I_{EMS-98}$  (in alto) e PGA (in basso).

Si può facilmente notare che, per basse intensità macrosismiche (o per valori contenuti di PGA), il danno medio reale degli edifici M1 è superiore a quello prevedibile con la funzione di danno proposta da letteratura, almeno per i casi studio analizzati in questa ricerca. Al fine di poter pervenire ad una più cautelativa stima del danno, per gli immobili della classe M1 della Lunigiana e della Garfagnana, si avanza l'ipotesi di un riadattamento dell'equazione del danno medio (Equazioni 2 e 3). In base a quanto desunto dai dati di danno raccolti dopo il terremoto del 21/06/2013 apparirebbe opportuno eliminare il termine moltiplicativo  $f(V,I)=e^{(V/2 \cdot (I-7))}$  anche per le basse intensità ( $I_{EMS-98} \leq 7$ ).

Assumendo che l'equazione  $\mu_D = (2.5 + 3 \tanh((I + 6.25 \cdot V - 12.7)/3))$  valga per tutti i valori di intensità macrosismica compresi tra IV e XII, si giunge al risultato espresso nelle Figure 13: tutti i punti sperimentali/empirici rientrano nei nuovi fusi di vulnerabilità.

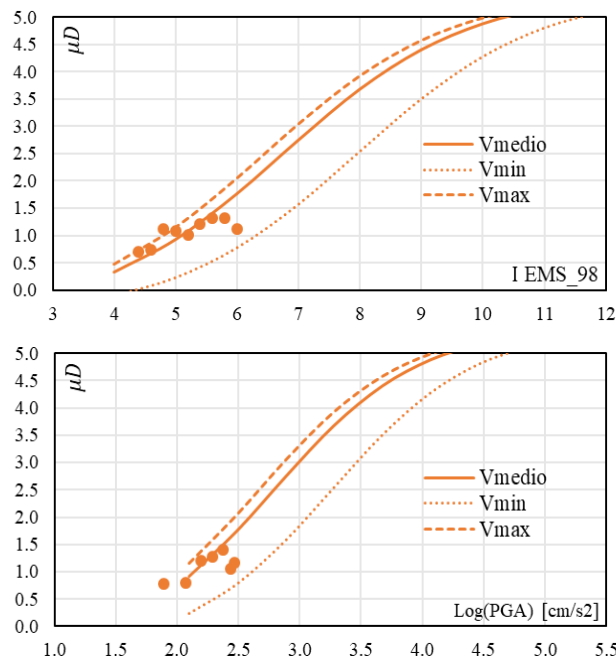


Figura 13. Nuove curve e punti sperimentali di vulnerabilità per la tipologia edilizia M1, in termini di  $I_{EMS-98}$  (in alto) e PGA (in basso).

Per quanto concerne le altre classi tipologiche, si limita l'attenzione alla M3, la seconda in termini di numerosità di schede compilate a seguito dell'evento sismico. Nonostante il campione di dati a disposizione per la tipologia costruttiva M3 sia limitato (Tabella 1), si riportano i dati sperimentali nei grafici in cui sono disegnate le curve di vulnerabilità (Figure 14). In tal caso, si rileva che il fuso parametrico di vulnerabilità individuato dalle Equazioni 2 e 3 contiene tutti i punti sperimentali. Per la classe di edifici M3 viene così avvalorata l'adeguatezza della funzione

originaria di stima del danno medio, sebbene con un campione limitato di dati.

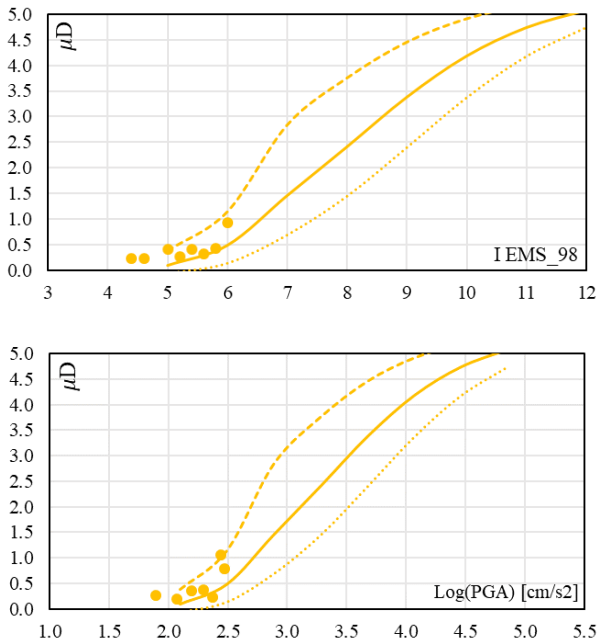


Figura 14. Curve e punti sperimentali di vulnerabilità per la tipologia edilizia M3, in termini di  $I_{EMS-98}$  (in alto) e PGA (in basso).

## 8 CALIBRAZIONE DI CURVE DI INAGIBILITÀ

Il database AeDES per la Lunigiana e Garfagnana viene, infine, impiegato anche per proporre una nuova correlazione di danno-inagibilità. In particolare, si studia il legame che intercorre tra i giudizi di inagibilità e i livelli di danneggiamento EMS-98 o i parametri di scuotimento.

Analizzando quanto desunto dalle schede AeDES, in primo luogo, si perviene all'Equazione 5 di seguito riportata:

$$P_{in} = 0.1p_{(D1)} + 0.7p_{(D2)} + 0.9p_{(D3)} + 1[p_{(D4)} + p_{(D5)}], \quad (5)$$

dove  $P_{in}$  esprime la probabilità di inagibilità complessiva, mentre  $p_{(Di)}$  è la probabilità di danneggiamento  $D_i$  (con  $i$  che varia da 1 a 5).

Essa appare molto simile a quella proposta da Sabetta et al. (2013), fatta eccezione per il termine relativo agli edifici con danno D1 dichiarati inagibili. Per quanto attiene al sisma del 2013, gli edifici con danno globale D1 non sono, infatti, del tutto esenti dal giudizio di inagibilità (temporanea), a causa di vulnerabilità intrinseche delle strutture che possono essere imputate ad una non idonea manutenzione delle abitazioni o particolarmente scarse caratteristiche meccaniche dei materiali o delle malte (Boschi et al. 2019).

Prendendo in considerazione la tipologia M1, si definisce la relazione sperimentale che esiste tra l'Intensità macrosismica EMS-98 registrata (o la PGA) e la percentuale di immobili completamente inagibili (a cui è stato fornito giudizio E) e si tracciano le rette di regressione (crescenti) che meglio approssimano l'andamento dei dati reali. Queste sono rappresentate nelle Figure 15. Si nota un coefficiente di determinazione medio alto in entrambi i casi, maggiore nel caso di intensità macrosismica espressa secondo la scala EMS-98 ( $R^2=0.762$ ).

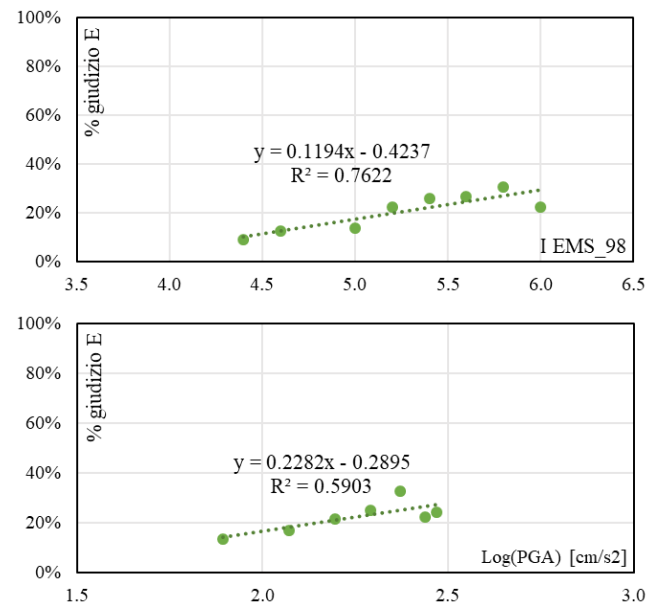


Figura 14. Curve di agibilità per la tipologia edilizia M1 desunte dai dati empirici, in termini di  $I_{EMS-98}$  (in alto) e PGA (in basso).

Nel caso della classe tipologica M3, il modesto campione di dati empirici a disposizione non permette il tracciamento di curve sperimentali di inagibilità. Nonostante ciò, è possibile osservare che, per analoghi valori di intensità macrosismica EMS-98, le percentuali di edifici inagibili appartenenti alla classe M3 sono inferiori rispetto a quelle riscontrate per la tipologia M1. Tale risultato conferma nuovamente la maggiore suscettibilità al danneggiamento di quest'ultima.

## 9 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il lavoro descritto nella memoria attiene all'ambito delle analisi di vulnerabilità a larga scala ed ha avuto come principale obiettivo la calibrazione di curve di vulnerabilità e di fragilità, sulla base di un consistente database di schede AeDES compilate in seguito al sisma del 21/06/2013. Nella ricerca si è proceduto all'applicazione del Metodo Macrosismico nella versione modificata di Bernardini et al. 2007, per



la specifica realtà territoriale della Lunigiana e della Garfagnana.

In particolare, il lavoro svolto ha previsto la suddivisione del campione di edifici su cui è stato eseguito il sopralluogo di agibilità post-sisma in più classi tipologiche, ed il calcolo, per ciascuno di essi, dell'indice numerico di vulnerabilità, V, messo in relazione sia con i danni sofferti dai fabbricati sia con l'entità dello scuotimento subito.

Lo studio è culminato nell'avanzamento di una proposta di riadattamento delle curve parametriche di vulnerabilità e di fragilità insite nel suddetto metodo, in base ai dati reali di scuotimento e di danno relativi all'evento sismico del 21/06/2013. L'evidenza sperimentale ha suggerito di apportare tali modifiche solo per i fabbricati in classe M1 (relativa alla scala EMS-98), ovvero fabbricati caratterizzati da muratura con tessitura irregolare e solai deformabili, e di mantenere la versione originaria dell'equazione per tutte le altre categorie di costruzioni.

Infine, sfruttando i dati in possesso a seguito dell'evento sismico, è stato possibile definire le equazioni empiriche che correlano la percentuale di edifici inagibili con l'intensità macrosismica e con la PGA, integrando quando presente allo stato attuale nella letteratura scientifica.

In breve, si è, quindi, validato un modello generale di vulnerabilità e di inagibilità che, a partire da dati di pericolosità locale e di caratterizzazione tipologico-strutturale, può consentire di tracciare agevolmente sia mappe di vulnerabilità che scenari di danno/inagibilità. Semplicemente sovrapponendo alle mappe di vulnerabilità quelle di pericolosità e di esposizione si potrebbe, inoltre, pervenire a mappe di rischio sismico a scala di aree omogenee sub-comunali.

Tra i possibili sviluppi futuri dello studio, si propone l'implementazione di modelli analitici di edifici-tipo rappresentativi delle diverse categorie edilizie, primariamente per quelle rappresentative di M1. Essi permetterebbero di esaminare più nel dettaglio le peculiarità regionali del costruito e di ritrarre anche i vari modificatori di vulnerabilità del Metodo Macrosismico, in relazione alla loro effettiva influenza sul comportamento sismico dei manufatti.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i tecnici del Settore Sismica della Regione Toscana, in particolare il dirigente Ing. F. Gallori ed il Dott. Geol. M. Baglione, ed il team di S2R, spin off dell'Università di Firenze, per il contributo nella realizzazione dello studio.

## BIBLIOGRAFIA

- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Bella, M. D., Pasquale, G. D., . . . Zuccaro, 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). Dipartimento della Protezione Civile.
- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. Sulla vulnerabilità di edifici in muratura: proposta di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, Vol. 149, No. 1, pp. 66-74
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., & Parodi, S., 2007a. Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98. *XII Convegno ANIDIS*, 10-14 giugno 2007, Pisa, Italia.
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., & Parodi, S., 2007b. Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98. *XII Convegno ANIDIS*, 10-14 giugno 2007, Pisa, Italia.
- Boschi, S., Ciavattone, A., Vignoli, A., 2017. Estimation of the seismic structural capacity of masonry buildings through simplified procedures. *XVII Convegno ANIDIS*. 17-21 Settembre 2017, Pistoia, Italia.
- Boschi, S., Galano, L. & Vignoli, A., 2019. *Bull Earthquake Eng* (2019) 17: 413. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0451-4>.
- Bramerini, F., Pasquale, G. D., Orsini, A., Pugliese, A., Romeo, R., & Sabetta, F., 1995. Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari. *In Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale, SSN/RT/95/01*. Roma.
- Cherif, S., Chourak, M., Abed, M., Pujades, L. 2017. *Nat Hazards* (2017) 85:329–347 DOI 10.1007/s11069-016-2566-8.
- Chinni, C., Mazzotti, C., Savoia, M., Perri, G., 2013. RE.SIS.TO@: una metodologia speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica di edifici in muratura e calcestruzzo armato. *Atti del XV Convegno ANIDIS*. Padova, Italia.
- Colajanni, P., Accardi, M., Cucchiara, C., Di Gesaro, G., Minafò, G., 2017. Valutazione della Vulnerabilità a Scala Territoriale: Il Caso Studio di Caltabellotta (AG). *XVII Convegno ANIDIS*. 17-21 Settembre 2017, Pistoia, Italia.
- Del Gaudio, C., Ricci, P., Verderame, G.M., et al., 2016. *Bull Earthquake Eng* (2016) 14: 2643. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9919-2>.
- Fiorentino, G., Forte, A., Pagano, E. et al., 2018. *Bull Earthquake Eng* (2018) 16: 1399. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0254-z>.
- G.N.D.T. 1993. Rischio sismico di edifici pubblici, Parte I: aspetti metodologici. *Proceedings of CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Roma, Italia.
- Grunthal G., 1998. European Macroseismic Scale. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg 1998; Vol. 15.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2006. *Bull Earthquake Eng* (2006) 4: 415. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>.
- Lestuzzi, P., Podestà, S., Luchini, C. et al., 2016. *Nat Hazards* (2016) 84: 249. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2420-z>.
- Milutinovic, Z. V., Trendafiloski, G. S., 2003. *RISK-UE - An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. Contract No. EVK4-CT-2000-00014, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje.

- Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B.L., Depinois, S., Masure, P., Risk-UE Team, 2004. The European Risk-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. In: Proceedings of the 13th world conference earthquake engineering, Vancouver (CD-ROM, Paper No. 3329).
- Rota, M., Penna, A., & Strobbia, C., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 933-947
- Rapporto ANCE/CRESME, 2012. LO STATO DEL TERRITORIO ITALIANO Insediamiento e rischio sismico e idrogeologico.
- Rovida, A., Camassi, R., Gasperini, P., & Stucchi, M., 2011. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Tratto da <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>.
- Sabetta, F., Speranza, E., Borzi, B., & Faravelli, M., 2013. Scenari di danno empirici e analitici a confronto con recenti terremoti italiani. *Convegno GNGTS*.
- Sorrentino, L., Cattari, S., da Porto, F. et al. *Bull Earthquake Eng* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0370-4>.
- Vicente, R., Parodi, S., Lagomarsino, S. et al. *Bull Earthquake Eng* (2011) 9: 1067. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9233-3>.
- Zuccaro, G., 2004. Inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio-economiche - *INGV, Progetto SAVE*.
- Zuccaro, G., De Gregorio D., Dolce, M., Speranza, E., Moroni, C. 2014. Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari – CARTIS 2014, *Progetto Reluis 2014-2016, Unità di ricerca Università degli Studi di Napoli Federico II*, Dipartimento della Protezione Civile.
- 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. 34 *Convegno Nazionale GNGTS*, Trieste, Italia.