



Effetto dell'indice di danno su curve di fragilità tipologiche per edifici in CA

Fabio Romano^a, Maria Zucconi^a, Barbara Ferracuti^a

^a Università degli Studi Niccolò Cusano, Via Don Carlo Gnocchi, 3 - 00166 Roma, Italia

Keywords: curve di fragilità; indici di danno; dati osservazionali; terremoto Emilia; classi tipologiche.

SOMMARIO

I numerosi eventi sismici che negli anni si susseguono in tutto il mondo sottolineano sempre più l'importanza di ridurre il rischio sismico del patrimonio edilizio nazionale. In questo contesto, una stima affidabile della vulnerabilità sismica degli edifici è fondamentale per avere una visione globale sull'allocazione delle limitate risorse economiche disponibili per la riduzione del rischio sismico a scala territoriale. A tal fine, risulta di particolare importanza una stima probabilistica della vulnerabilità sismica attraverso la definizione di curve di fragilità calibrate a partire dai dati di danno rilevato *in situ* dopo gli eventi sismici o, in alternativa, attraverso scenari di danno simulati. In particolare, in questo lavoro sono state definite delle curve di fragilità tipologiche a partire dai danni post sisma rilevati a seguito del terremoto dell'Emilia-Romagna del 2012. Il campione selezionato comprende circa 1,600 edifici in calcestruzzo armato, per il quale sono state definite due classi tipologiche in funzione del numero di piani. Due diversi indici di danno globale sono stati considerati al fine di stimare il danno dell'intero edificio a partire da quello rilevato a livello di elemento, quali le strutture verticali e/o le tamponature e tramezzi. Tali indici sono stati selezionati tra le proposte disponibili in letteratura, con lo scopo di evidenziare come tale scelta possa influire sulla stima dei parametri delle curve di fragilità. Infine, sono state adottate due diverse distribuzioni probabilistiche al fine di individuare quella che meglio approssima i dati statistici del danno rilevato.

1 INTRODUZIONE

Il gran numero di perdite umane ed economiche subite in seguito agli eventi sismici del passato, specialmente quelli degli ultimi cinquanta anni di cui abbiamo statistiche più dettagliate ed affidabili, hanno mostrato sempre più la necessità di sviluppare metodologie per la previsione delle perdite in futuri terremoti. Il crescente interesse è dimostrato dai numerosi studi disponibili in letteratura sia riguardo la valutazione della vulnerabilità che del rischio a livello di singolo edificio (Cardone and Perrone, 2017; Colonna et al., 2017; Kohrangi et al., 2016; Ramirez et al., 2012; Romano et al., 2019a, 2018a) o a larga scala (Rota et al. 2011; Silva et al. 2013; Ferlito et al. 2013; Buratti et al. 2017; Romano et al. 2019a).

A tal riguardo, esistono diversi approcci per la valutazione della vulnerabilità tipologica a scala

territoriale. Al giorno d'oggi, essa è espressa principalmente in termini probabilistici attraverso curve di fragilità per classi tipologiche di edifici, che esprimono la probabilità per un dato edificio di eccedere un certo stato di danno al crescere della intensità sismica. Tra i principali metodi possiamo distinguere quelli empirici, quelli analitico-meccanici e i metodi ibridi, che sfruttano i pregi dei primi due approcci, come ampiamente trattato da Calvi et al. (2006) e D'Ayala et al. (2015). Una sintetica trattazione riguardo i diversi aspetti che influenzano lo sviluppo di curve di fragilità tipologiche può essere trovata in Romano et al. (2017, 2018b), in cui vengono anche brevemente comparate alcune delle metodologie empiriche e meccanico-analitiche sviluppate in Italia negli ultimi quindici anni.

In particolare, il presente articolo si focalizza sull'utilizzo dei metodi empirici, ricavando curve

di fragilità tipologiche per edifici in calcestruzzo armato (CA) a partire dai dati di danno osservati in seguito al terremoto dell'Emilia del 2012. In generale, nello sviluppo di modelli empirici il risultato è fortemente influenzato dalla qualità e dal tipo di dato disponibile, che a sua volta è legato alla scheda di danno utilizzata durante il rilievo post sisma. Nel caso italiano si fa uso della scheda AeDES "Scheda di I livello di rilevamento del danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica" (Baggio et al., 2014), che permette il rilievo del danno per i diversi elementi strutturali, pertanto è necessario ricondurre tale danno ad un unico indice di danno globale, che sia rappresentativo della condizione di danno dell'intera struttura. A tal riguardo in letteratura sono disponibili diverse proposte, (De Martino et al., 2017; Ferlito and Zuconi, 2015; Goretti and Di Pasquale, 2004), che tengono conto del danno delle sole strutture verticali portanti o anche di altri elementi strutturali, quali le tamponature e/o tramezzi, o anche gli orizzontamenti o le scale. In questo lavoro, gli indici di danno di edificio di Dolce et al. 2017 e di Del Gaudio et al. 2017 sono comparati, valutando l'effetto di tale scelta sulla definizione delle curve di fragilità tipologiche.

2 TERREMOTO DELL'EMILIA DEL 2012: SELEZIONE DEL DATASET

Il campione di edifici colpito dal terremoto dell'Emilia del 2012 è stato ottenuto dalla piattaforma Da.D.O (Database di Danno Osservato) (Dolce et al., 2017), un applicativo web GIS promosso dal Dipartimento di Protezione Civile nazionale nato con lo scopo di raccogliere e catalogare informazioni riguardanti le caratteristiche strutturali e lo stato di danno di edifici ordinari che sono stati oggetto di sopralluoghi in seguito agli eventi sismici italiani degli ultimi cinquanta anni. In particolare, per il terremoto dell'Emilia del 2012, il rilievo del danno è stato effettuato per mezzo della scheda AeDES, versione 06/2008 (Baggio et al., 2007), la quale permette di indicare il livello di danno per le diverse componenti strutturali verticali e orizzontali.

Il database complessivo relativo al terremoto dell'Emilia del 2012 include 22,554 edifici, la cui distribuzione in funzione della tipologia strutturale sismo-resistente verticale è mostrata in Figura 1. Dalla figura si evince una forte prevalenza degli edifici in muratura, che rappresentano circa l'80% degli edifici totali, seguiti dagli edifici in CA, con circa il 10%, e dagli edifici con struttura mista CA-muratura al di sotto del 10%.

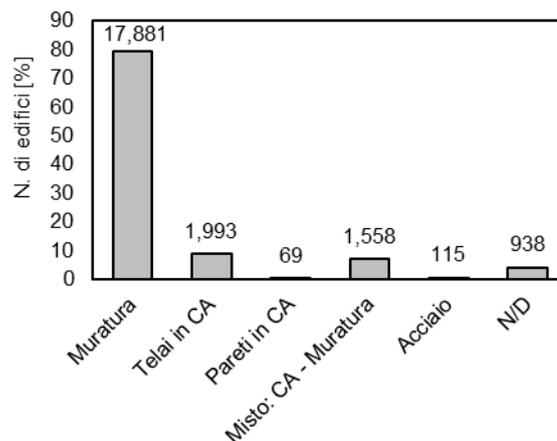


Figura 1. Frequenze relative delle tipologie costruttive, classificate in base alla struttura sismo-resistente verticale. Numero totale di edifici: 22,554.

I telai in cemento armato del campione sono complessivamente 1,993 edifici, tra questi vi è però una forte presenza di edifici industriali, essendo l'Emilia-Romagna una delle regioni più produttive d'Italia. Tali edifici presentano una vulnerabilità sismica ben diversa da quella degli edifici ordinari in CA (Buratti et al., 2017) essendo caratterizzati prevalentemente da una struttura prefabbricata isostatica. Per tale motivo, a partire dal campione di 1,993 telai in CA sono stati scartati 362 edifici industriali prefabbricati. La selezione è stata effettuata con riferimento agli edifici ad un piano con altezza di interpiano $H \geq 5.0$ m ed area di piano $A_{piano} \geq 130$ m².

Il campione così ottenuto, pari a 1,631 edifici, è stato in seguito suddiviso in due classi tipologiche in funzione del numero di piani, con lo scopo di individuare classi di edifici con simile comportamento sismico. In particolare, si è distinto tra:

1. edifici bassi, con un numero di piani $N \leq 3$;
2. edifici medio-alti, con un numero di piani $N \geq 4$.

Tale criterio è comunemente utilizzato da diversi autori italiani e in altre parti del mondo (Del Gaudio et al., 2015; Rota et al., 2008). Infine, sono stati scartati un esiguo numero di edifici per i quali l'informazione sul numero di piani non era disponibile. Il campione finale di 1,616 edifici, utilizzato per la calibrazione delle curve di fragilità empiriche, comprende 965 edifici bassi e 651 medio-alti.

Un altro criterio frequentemente utilizzato per la classificazione tipologica degli edifici si basa sul periodo di costruzione. Tale criterio non è stato considerato per l'Emilia-Romagna poiché classificata come regione con sismicità rilevante soltanto dopo l'ordinanza OPCM 3274 del 2003, pertanto la progettazione relativa agli anni precedenti non è stata oggetto di importanti cambiamenti prescrittivi.

3 INDICI DI DANNO DI EDIFICIO

L'analisi del danno è effettuata a partire dalle informazioni della Sezione 4 della scheda AeDES, che permette di distinguere il danno sui diversi elementi strutturali. La scheda assume tre possibili stati di danno per ogni elemento strutturale, incluse le tamponature, ottenuti dalla semplificazione dei cinque stati di danno della Scala Macrosismica Europea (EMS-98) (Grünthal, 1998). Oltre al livello di danno, è necessario specificare l'estensione del danno di elemento all'interno dell'edificio.

I dati statistici mostrano che circa il 70% dei 1,616 edifici selezionati non presenta danno alle strutture verticali in CA, e il 32% non presenta danno alle tamponature e/o tramezzi. Il danno registrato è perlopiù Leggero (D1), rispettivamente pari al 14% e 43% per le strutture portanti verticali e per le tamponature, mentre per gli stati di danno Medio-Grave (D2-D3) e Gravissimo (D4-D5) le percentuali sono limitate all'8% e 6% per gli elementi in CA, e al 16% e 8% per le tamponature.

Dal danno dei singoli elementi strutturali è necessario definire uno stato di danno complessivo dell'edificio. A tal fine in letteratura sono disponibili diverse proposte che permettono di definire un indice di danno globale dell'intero edificio. In questo lavoro, due diverse proposte sono state adottate e comparate con lo scopo di valutare l'effetto di tale scelta sulla stima dei parametri delle curve di fragilità. In particolare, si è fatto riferimento alle proposte di Del Gaudio et al. 2017 e di Dolce et al. 2017, che riconducono il danno di elemento della scheda AeDES al danno globale dell'edificio classificato secondo la scala EMS-98. I due indici sono presentati brevemente di seguito, e i risultati, espressi in termini di frequenze relative di danno, sono comparati per le due classi tipologiche in cui è stato suddiviso il campione.

La Tabella 1 riporta l'associazione tra il danno di elemento e il danno di edificio come proposto da Dolce et al. 2017. In particolare, i cinque stati di danno EMS-98 sono ottenuti attraverso molte possibili alternative combinazioni di danno ed estensione possibili nella scheda AeDES per i soli elementi strutturali verticali in CA. Il danno alle tamponature è ignorato nella valutazione del danno globale di edificio.

La

Tabella 2 riporta invece l'associazione tra il danno di elemento e il danno di edificio come proposto da Del Gaudio et al. 2017. La grande differenza tra i due indici è che in questo secondo caso è considerato anche il livello e l'estensione

del danno alle tamponature, stimando il danno globale come il massimo tra quello ottenuto dai due elementi strutturali.

Tabella 1. Conversione dal danno di elemento AeDES al danno di edificio EMS-98, come proposto da Dolce et al. 2017.

| D4-D5 Gravissimo | D3-D2 Medio-Grave | D1 Leggero | Danno nullo | Livello danno EMS-98 |
|---------------------|----------------------|---------------|----------------|----------------------------|
| | | | ✓ | 0 |
| | | <1/3 | | 1 |
| | | 1/3-2/3 | | 1 |
| | | >2/3 | | 1 |
| | <1/3 | | | 2 |
| | <1/3 | <1/3 | | 2 |
| | <1/3 | 1/3-2/3 | | 2 |
| | <1/3 | >2/3 | | 2 |
| | 1/3-2/3 | <1/3 | | 3 |
| | 1/3-2/3 | | | 3 |
| | >2/3 | | | 3 |
| <1/3 | | | | 3 |
| <1/3 | | <1/3 | | 3 |
| <1/3 | | 1/3-2/3 | | 3 |
| <1/3 | <1/3 | | | 3 |
| <1/3 | <1/3 | <1/3 | | 3 |
| <1/3 | 1/3-2/3 | | | 4 |
| <1/3 | >2/3 | | | 4 |
| 1/3-2/3 | | | | 4 |
| 1/3-2/3 | | 1/3-2/3 | | 4 |
| 1/3-2/3 | <1/3 | | | 4 |
| 1/3-2/3 | 1/3-2/3 | | | 5 |
| >2/3 | | | | 5 |
| >2/3 | | <1/3 | | 5 |
| >2/3 | <1/3 | | | 5 |

Tabella 2. Conversione dal danno di elemento AeDES al danno di edificio EMS-98, come proposto da Del Gaudio et al. 2017.

| Danno EMS-98 | Danno di elemento AeDES | | | |
|-----------------|-------------------------|---------|------------------------|---------|
| | Tamponature/tramezzi | | Struttura verticale | |
| | Livello danno AeDES | Estens. | Livello danno AeDES | Estens. |
| DS1 | D1 | <1/3 | D1 | <1/3 |
| | D1 | 1/3-2/3 | D1 | 1/3-2/3 |
| | D1 | >2/3 | D1 | >2/3 |
| DS2 | D2-D3 | <1/3 | | |
| | D2-D3 | 1/3-2/3 | D2-D3 | <1/3 |
| | D2-D3 | >2/3 | | |
| DS3 | D4-D5 | <1/3 | D2-D3 | 1/3-2/3 |
| | D4-D5 | 1/3-2/3 | D2-D3 | >2/3 |
| | D4-D5 | >2/3 | | |
| DS4 | / | | D4-D5 | <1/3 |
| | / | | D4-D5 | 1/3-2/3 |
| DS5 | / | | D4-D5 | >2/3 |

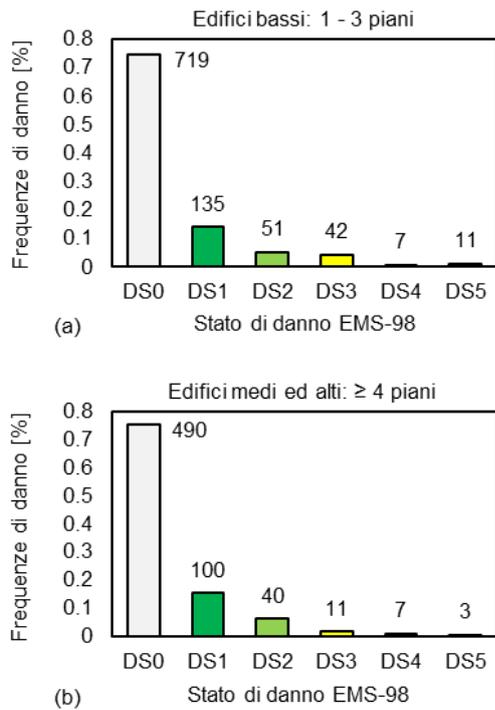


Figura 2. Frequenze relative di danno EMS-98 per le due classi tipologiche di edifici in CA: (a) edifici bassi; (b) edifici medi ed alti. Indice di danno: Dolce et al. 2017.

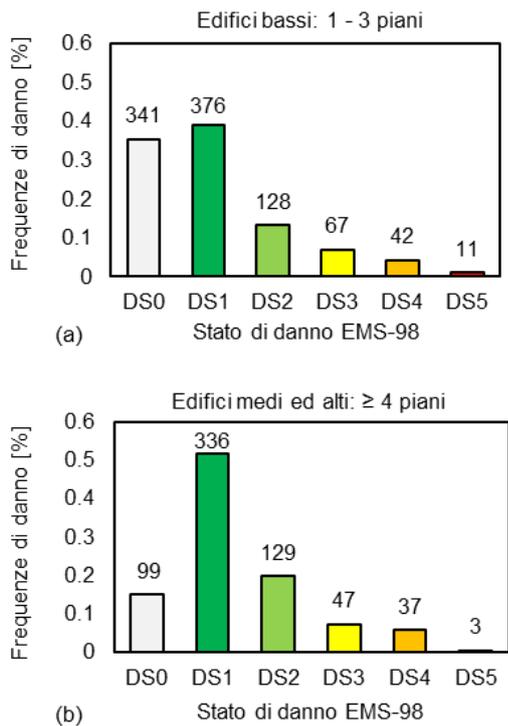


Figura 3. Frequenze relative di danno EMS-98 per le due classi tipologiche di edifici in CA: (a) edifici bassi; (b) edifici medi ed alti. Indice di danno: Del Gaudio et al. 2017.

Le Figure 2 e 3 mostrano le frequenze relative dei cinque stati di danno ottenuti rispettivamente con gli indici di Dolce et al. 2017 e di Del Gaudio et al. 2017. I risultati sono stati rappresentati separatamente per le due classi tipologiche basate sul numero di piani. Per entrambe le classi tipologiche, gli istogrammi in Figura 2 mostrano una netta prevalenza di edifici avente danno DS0

(circa il 75% per entrambe le classi); per gli stati di danno superiori le percentuali diminuiscono gradualmente in maniera tra loro simile. I risultati in Figura 3, relativi all'indice di Del Gaudio et al. 2017, mostrano un andamento ben diverso: per entrambi le classi tipologiche, molti edifici che nel caso precedente avevano un danno DS0 si sono spostati verso gli stati di danno superiori, soprattutto il DS1 e i successivi DS2 e DS3. Questo passaggio è più evidente per la classe di edifici medio-alti ($N \geq 4$), per i quali gli edifici con DS0 sono circa un 1/5 di quelli ottenuti con l'indice di Dolce et al. 2017. Questa forte diversità è dovuta soprattutto al fatto che il secondo indice include il danno alle tamponature nella stima di quello globale, pertanto i primi tre stati di danno possono essere raggiunti in assenza di danno alle strutture verticali in CA. Non si evincono invece differenze per lo stato di danno DS5, descritto in maniera molto simile per i due indici considerati.

Data la pochezza del campione statistico per gli stati di danno più gravi, il DS4 e DS5, non sono state calibrate per essi le curve di fragilità tipologiche.

4 MAPPE DI SCUOTIMENTO E INTENSITÀ SISMICA

Il territorio dell'Emilia è stato colpito da uno sciame sismico nel Maggio del 2012, che ha causato in totale 27 morti, 400 feriti e circa 15,000 sfollati (Magliulo et al., 2014). L'evento considerato in questo lavoro è la scossa principale del 20 Maggio, di magnitudo $M_w = 5.9$ e profondità 10.0 km. La misura d'intensità (IM) scelta è la accelerazione massima al suolo (PGA), spesso utilizzata in letteratura (Rota et al., 2008; Sabetta et al., 1998) perché è un parametro facilmente misurabile e comune a tutti gli edifici in un'area urbana. In Italia, i parametri di intensità sismica sono misurati dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) su tutto il territorio nazionale e forniti per una maglia quadrata con lato 1 km (<http://shakemap.rm.ingv.it/shake/index.html>).

Tali punti sono stimati a partire da quelli della rete accelerometrica nazionale mediante l'utilizzo di leggi di attenuazione e le equazioni predittive del moto del terreno. Questa stima implica puntualmente la presenza di un valore atteso e di un'incertezza, che è stata trascurata in questo lavoro. In particolare, a partire dai valori di PGA misurati nei nodi della maglia, per ognuno dei 1,616 edifici nel campione il valore di PGA è stato stimato come media pesata dei valori forniti nei quattro nodi della maglia più vicini al singolo

edificio; il peso è dato dall'inverso della distanza dell'edificio dai quattro nodi.

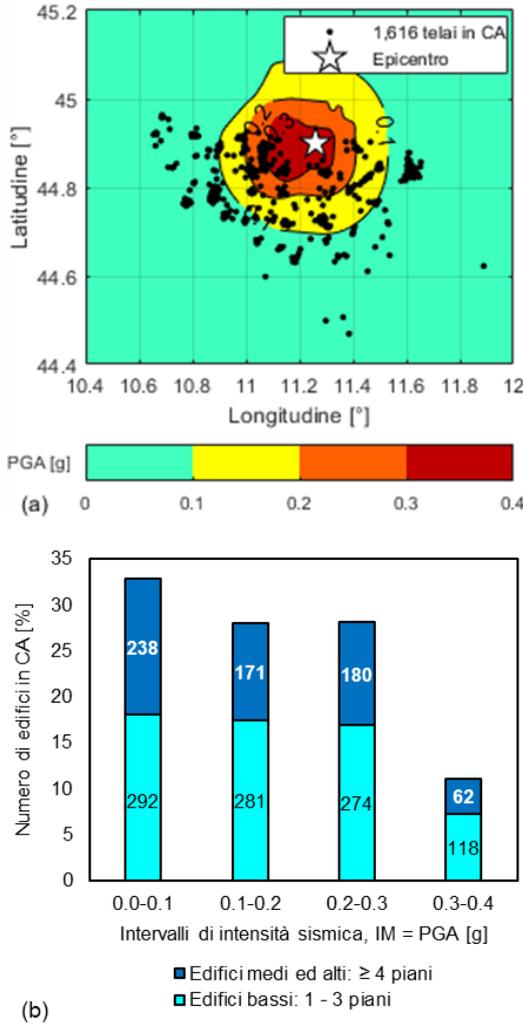


Figura 4. Intensità sismica, in termini di PGA, per il terremoto dell'Emilia del 20 Maggio 2012: (a) Mappa di scuotimento; (b) frequenze relative delle due classi tipologiche di edifici, suddivise in intervalli di PGA.

La Figura 4(a) rappresenta la mappa di scuotimento del terreno per l'evento sismico del 20 Maggio in termini di PGA, con indicata la posizione dei 1,616 edifici in CA selezionati. Tali edifici sono stati poi raggruppati in intervalli di PGA, tenendo conto anche della suddivisione nelle due classi tipologiche; in questo modo è stato possibile ricavare le frequenze cumulate di eccedenza per ogni stato di danno in ogni intervallo di PGA, ovvero individuare i punti statistici necessari per la calibrazione delle curve di fragilità. Sono stati considerati quattro intervalli di PGA, con un passo di 0.10 g. I risultati rappresentati in Figura 4(b) per le due classi tipologiche mostrano una distribuzione di edifici abbastanza equa nei prime tre intervalli di PGA, mentre diminuisce nel quarto intervallo (0.30 – 0.40 g) dove si ha solo il 10% di edifici. Il valore categoriale assegnato ad ogni intervallo di PGA coincide con il valore centrale dello stesso.

5 CALIBRAZIONE DELLE CURVE DI FRAGILITÀ

Le distribuzioni del danno riportate nelle Figure 2 e 3, relative rispettivamente agli indici proposti da Dolce et al. 2017 e Del Gaudio et al. 2017, suddivise negli intervalli di PGA definiti in Figura 4, rappresentano la base statistica per la calibrazione delle curve di fragilità empiriche per le due classi tipologiche di edifici. Per la stima dei parametri statistici delle curve di fragilità è stato utilizzato il metodo della massima verosimiglianza, assumendo una distribuzione binomiale del danno. Due diverse distribuzioni probabilistiche sono state selezionate per il *fitting* dei punti statistici di danno, la distribuzione lognormale e la distribuzione esponenziale. La prima è tra le più utilizzate in letteratura (Hancilar et al., 2013; Liel and Lynch, 2012), ed è espressa dall'Equazione 1

$$P(DS \geq DS_i | PGA) = \Phi \left(\frac{\ln(PGA) - \mu}{\sigma} \right) \quad (1)$$

dove i parametri μ e σ rappresentano rispettivamente la media logaritmica e la deviazione standard logaritmica. La seconda distribuzione, come proposta da Rossetto and Elnashai 2003, è descritta dall'Equazione 2 tramite i parametri α e β

$$P(DS \geq DS_i | PGA) = 1 - e^{-\alpha PGA^\beta} \quad (2)$$

Le Figure 5 e 6 mostrano le curve di fragilità ottenute rispettivamente con gli indici di danno di Dolce et al. 2017 e di Del Gaudio et al. 2017 per le due classi tipologiche di edifici bassi ed edifici medio-alti. È bene ricordare che per i danni più gravi, DS4 e DS5, le curve non sono state ricavate, e che il valore di PGA assegnato ad ogni intervallo è pari al valore medio dell'intervallo stesso.

Le curve di fragilità riportate in Figura 5 mostrano in generale una bassa probabilità di danno sia per gli edifici bassi Figura 5(a) che per gli edifici medio-alti Figura 5(b). Osservando le probabilità di eccedenza dei vari stati di danno in corrispondenza della massima PGA rappresentata, pari a 0.4 g, si osserva una vulnerabilità leggermente maggiore per gli edifici bassi rispetto a quelli medio-alti. Inoltre, il confronto tra la distribuzione lognormale e quella esponenziale evidenzia una migliore approssimazione della distribuzione esponenziale per gli edifici medio-alti, in quanto la funzione di verosimiglianza assume valori leggermente maggiori; le differenze sono invece insignificanti per gli edifici bassi. Tale risultato è coerente con quanto ottenuto in studi precedenti come Del Gaudio et al. 2017. I set di

curve rappresentati in Figura 6 mostrano una vulnerabilità più alta per tutti gli stati di danno rispetto a quelli ottenuti con l'indice di Dolce et al. 2017 in Figura 5. Diversamente da questi ultimi risultati, utilizzare l'indice di danno proposto da Del Gaudio et al. 2017 comporta una vulnerabilità maggiore per gli edifici medio-alti rispetto agli edifici bassi, relativamente agli stati di danno DS1 e DS2. Anche in questo caso la distribuzione esponenziale fornisce un *fitting* migliore, limitatamente allo stato di danno DS1.

Al di là di queste considerazioni, tutti i set di curve di fragilità mostrano un andamento molto piatto, con valori di dispersione alti. Tale andamento è probabilmente legato all'incompletezza del campione di edifici, con particolare riferimento agli edifici non danneggiati dal sisma, che essendo tali non sono stati rilevati a seguito del terremoto e pertanto non compaiono nel database di danno dell'Emilia-Romagna. In particolare, le aree più affette da tale incompletezza sono quelle più lontane dall'epicentro, quindi relative a PGA molto basse, dove la probabilità di avere edifici con danno nullo o insignificante è più alta (Zucconi et al., 2018). Questa incompletezza rende il campione selezionato non rappresentativo della reale distribuzione del danno degli edifici presenti nell'area studiata, a causa di una forte sottostima del numero totale di edifici presente nel territorio ed una sovrastima delle distribuzioni di danno osservate. Per superare tale limitazione dovuta all'incompletezza del campione di dati Zucconi et al. (Zucconi et al., 2018) hanno proposto una procedura, messa a punto per il database di danno relativo ai dati de L'Aquila del 2009, per la stima del numero totale di edifici basata sull'utilizzo del database del censimento nazionale (ISTAT, 2011), che risulta essere l'unico disponibile sull'intero territorio nazionale. La procedura, seppur approssimata, ha evidenziato l'importanza di integrare il numero totale di edifici per evitare una forte sovrastima delle perdite post-sisma (Zucconi et al., 2019). Pertanto, tale procedura verrà implementata in futuro per sopperire a tale limitazione.

Tuttavia, va evidenziato che il terremoto dell'Emilia non è stato caratterizzato da una forte intensità sismica, pertanto gli edifici soggetti ad alti valori di PGA e con alti livelli di danno sono stati modesti.

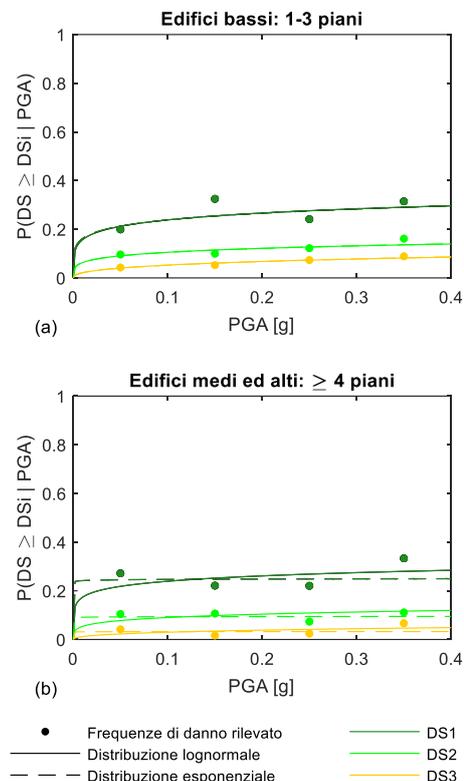


Figura 5. Curve di fragilità empiriche per le due distribuzioni di probabilità assunte e per le due classi tipologiche: (a) edifici bassi; (b) edifici medio-alti. Indice di danno: Dolce et al. 2017.

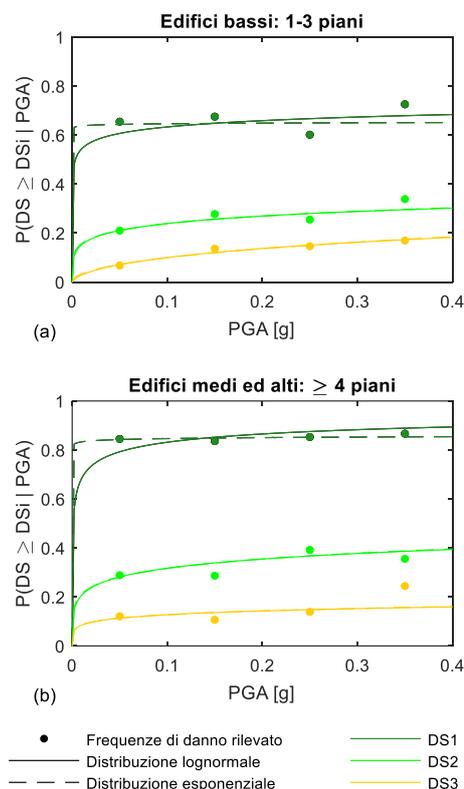


Figura 6. Curve di fragilità empiriche per le due distribuzioni di probabilità assunte e per le due classi tipologiche: (a) edifici bassi; (b) edifici medio-alti. Indice di danno: Del Gaudio et al. 2017.

6 CONCLUSIONI

Questo lavoro mira a valutare l'effetto della scelta dell'indice di danno globale su curve di fragilità di tipo empirico per classi tipologiche di edifici in CA. In particolare, le curve sono state ricavate a partire dai dati di danno post-sisma relativi al terremoto dell'Emilia del 2012, a partire da un campione di 1,616 edifici in CA con struttura a telai ordinari. L'intensità sismica per l'area colpita è rappresentata dalla PGA, in particolare si è fatto riferimento alla scossa del 20 Maggio; l'incertezza nella stima della PGA per ogni edificio è stata trascurata. Gli edifici del campione sono stati suddivisi in due classi tipologiche in base al numero di piani, distinguendo tra strutture basse (meno di 4 piani) e strutture medio-alte (più di 3 piani). Il danno a livello di elemento ottenuto con la scheda AeDES è stato trasformato in danno globale di edificio attraverso due diversi indici di danno dedotti da letteratura: Dolce et al. 2017 e Del Gaudio et al. 2017. Gli edifici in CA selezionati sono stati poi raggruppati in quattro intervalli uguali di PGA, caratterizzati da un passo di 0.1 g, e distinti in base alla classe tipologica. Due diverse distribuzioni probabilistiche sono state adottate per le curve di fragilità, quella lognormale e quella esponenziale. I risultati in termini rivelano una vulnerabilità maggiore con l'utilizzo dell'indice di danno di Del Gaudio et al. 2017 rispetto a quello di Dolce et al. 2017. Tale differenza è legata principalmente alla considerazione o meno del danno alle tamponature, che non è valutata in quest'ultimo indice, dove viene considerato esclusivamente il danno alle strutture verticali in CA. A riguardo, vale la pena osservare che in letteratura sono disponibili altre formulazioni per la definizione dell'indice di danno globale tra cui quelle proposte da Ferlito e Zucconi (Ferlito and Zucconi, 2015) e De Martino et al. (De Martino et al., 2017), che considerano, non solo il danno delle tamponature, ma anche il danno dei diversi elementi strutturali rilevati con la scheda AeDES, non inclusi nei precedenti indici di danno, quali ad esempio le strutture orizzontali e le scale. Pertanto, altre formulazioni verranno prese in considerazione per gli sviluppi futuri.

Le curve di fragilità mostrano valori molto alti di dispersione, dovuti probabilmente ad una forte incompletezza del campione di dati utilizzato, a causa dell'assenza nel database degli edifici lontani dalle aree epicentrali e pertanto caratterizzati da un danno nullo o esiguo. Tale incompletezza rende il campione non rappresentativo della reale distribuzione del danno nell'area studiata. Per superare tale limite in futuro

verrà implementata una procedura per la stima del numero totale di edifici basata sull'utilizzo dei dati del censimento nazionale (ISTAT, 2011), come proposto da Zucconi et al. (Zucconi et al., 2018). Infine, per quel che riguarda la scelta della distribuzione di probabilità si è osservato che la distribuzione esponenziale fornisce in generale un *fitting* migliore rispetto a quella lognormale, tale risultato andrà comunque confermato una volta implementato il database.

7 RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il supporto finanziario ricevuto dal Dipartimento della Protezione Civile (progetto ReLUI: inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti - CARTIS).

BIBLIOGRAFIA

- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Bella, M. Della, Pasquale, G. Di, Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., Papa, F., 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), 2nd ed. (in Italian).
- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Bella, M. Della, Pasquale, G.D.I., 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 (AeDES). European Communities, 2007 Reproduction.
- Buratti, N., Minghini, F., Ongaretto, E., Savoia, M., Tullini, N., 2017. Empirical seismic fragility for the precast RC industrial buildings damaged by the 2012 Emilia (Italy) earthquakes. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 46, 2317–2335. <https://doi.org/10.1002/eqe.2906>
- Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo-Vélez, L.F., Crowley, H., 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISSET J. Earthq. Technol.* 43, 75–104.
- Cardone, D., Perrone, G., 2017. Damage and Loss Assessment of Pre-70 RC Frame Buildings with FEMA P-58. *J. Earthq. Eng.* 21, 23–61. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1149893>
- Colonna, S., Imperatore, S., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2017. Post-seismic damage assessment of a historical masonry building: The case study of a school in Teramo, in: International Conference on Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composites Materials, MuRiCo5, Bologna, Italy, 28-30 June. Key Engineering Materials, Bologna, pp. 620–627. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.620>
- D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K.,

- Rossetto, T., Crowley, H., Silva, V., 2015. Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment - Low/Mid-Rise, GEM Technical Report. <https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12>
- De Martino, G., Di Ludovico, M., Prota, A., Moroni, C., Manfredi, G., Dolce, M., 2017. Estimation of repair costs for RC and masonry residential buildings based on damage data collected by post-earthquake visual inspection. *Bull. Earthq. Eng.* 15, 1681–1706. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0039-9>
- Del Gaudio, C., De Martino, G., Di Ludovico, M., Manfredi, G., Prota, A., Ricci, P., Verderame, G.M., 2017. Empirical fragility curves from damage data on RC buildings after the 2009 L'Aquila earthquake. *Bull. Earthq. Eng.* 15, 1425–1450. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0026-1>
- Del Gaudio, C., Ricci, P., Verderame, G.M., Manfredi, G., 2015. Development and urban-scale application of a simplified method for seismic fragility assessment of RC buildings. *Eng. Struct.* 91, 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.031>
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Borzi, B., Bocchi, F., Conte, C., Meo, D., Faravelli, M., Pascale, V., 2017. Da . D . O - Uno strumento per la consultazione e la comparazione del danno osservato relativo ai più significativi eventi sismici in Italia dal 1976 ., in: XXVII Convegno ANIDIS-L'Ingegneria Sismica in Italia. Pistoia, pp. 348–357.
- Ferlito, R., Guarascio, M., Zucconi, M., 2013. Assessment of a vulnerability model against post-earthquake damage data: The case study of the historic city centre of L'Aquila in Italy, in: 9th World Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures, A Coruna, Spain, 8-10 July. WIT Transactions on the Built Environment, pp. 393–404. <https://doi.org/10.2495/ERES130321>
- Ferlito, R., Zucconi, M., 2015. Proposta di una nuova metodologia per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura nei centri urbani, in: XVI Convegno ANIDIS 2015 - L'ingegneria Sismica in Italia. L'Aquila.
- Goretti, A., Di Pasquale, G., 2004. Building inspection and damage data for the 2002 Molise, Italy, earthquake. *Earthq. Spectra* 20, S167–S190. <https://doi.org/10.1193/1.1769373>
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.
- Hancilar, U., Taucer, F., Corbane, C., 2013. Empirical Fragility Functions based on Remote Sensing and Field Data after the 12 January 2010 Haiti Earthquake. *Earthq. Spectra* 29, 1275–1310. <https://doi.org/10.1193/121711EQS308M>
- ISTAT, 2011. 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011 [WWW Document].
- Kohrangi, M., Vamvatsikos, D., Bazzurro, P., 2016. Implications of Intensity Measure selection for seismic loss assessment of 3-D buildings. *Earthq. Spectra* 32, 2167–2189. <https://doi.org/10.1193/112215EQS177M>
- Liel, A.B., Lynch, K.P., 2012. Vulnerability of Reinforced-Concrete-Frame Buildings and Their Occupants in the 2009 L'Aquila, Italy, Earthquake. *Nat. Hazards Rev.* 13, 11–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000047](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000047)
- Magliulo, G., Ercolino, M., Petrone, C., Coppola, O., Manfredi, G., 2014. The Emilia Earthquake: Seismic Performance of Precast Reinforced Concrete Buildings. *Earthq. Spectra* 30, 891–912. <https://doi.org/10.1193/091012EQS285M>
- Ramirez, C.M., Liel, A.B., Mitrani-Reiser, J., Haselton, C.B., Spear, A.D., Steiner, J., Deierlein, G.G., Miranda, E., 2012. Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 41, 1455–1475. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Romano, F., Alam, M.S., Faggella, M., Zucconi, M., Barbosa, A.R., Ferracuti, B., 2019a. Seismic loss analysis of a modern RC building accounting for uncertainty of infill strut modeling parameters, in: Papadrakakis, M., Fragiadakis, M. (Eds.), COMPDYN 2019 -7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. pp. 24–26.
- Romano, F., Faggella, M., Gigliotti, R., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2018a. Comparative seismic loss analysis of an existing infilled RC building based on element fragility functions proposals. *Eng. Struct.* 177, 707–723. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.005>
- Romano, F., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2019b. Seismic fragility curves for RC buildings at territorial scale, in: Papadrakakis, M., Fragiadakis, M. (Eds.), COMPDYN 2019 -7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Crete, Greece, pp. 24–26.
- Romano, F., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2018b. Comparative analysis of seismic vulnerability assessment methodologies for RC buildings at territorial scale, in: Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki, pp. 1–12.
- Romano, F., Zucconi, M., Imperatore, S., Ferracuti, B., 2017. Advancements in Seismic Vulnerability Assessment Methodologies for RC Buildings at Territorial Scale, in: XVII ANIDIS 2017 - L'ingegneria Sismica in Italia. pp. 303–313.
- Rossetto, T., Elnashai, A., 2003. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Eng. Struct.* 25, 1241–1263. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00060-9)
- Rota, M., Penna, A., Strobbia, C., Magenes, G., 2011. Typological Seismic Risk Maps for Italy. *Earthq. Spectra* 27, 907–926. <https://doi.org/10.1193/1.3609850>
- Rota, M., Penna, A., Strobbia, C.L., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 28, 933–947. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.010>
- Sabetta, F., Goretti, A., Lucantoni, A., 1998. Empirical Fragility Curves from Damage Surveys and Estimated Strong Ground Motion, in: 11th European Conference on Earthquake Engineering. Paris, France, Paris,

France, pp. 1–11.

- Silva, V., Crowley, H., Pinho, R., Varum, H., 2013. Extending displacement-based earthquake loss assessment (DBELA) for the computation of fragility curves. *Eng. Struct.* 56, 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.04.023>
- Zucconi, M., Ferlito, R., Sorrentino, L., 2019. Validation and extension of a statistical usability model for unreinforced masonry buildings with different ground motion intensity measures. *Bull. Earthq. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00669-2>
- Zucconi, M., Ferlito, R., Sorrentino, L., 2018. Simplified survey form of unreinforced masonry buildings calibrated on data from the 2009 L’Aquila earthquake. *Bull. Earthq. Eng.* 16, 2877–2911. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0283-7>