



Derivazione di curve di fragilità empiriche per edifici residenziali italiani in c.a.

Carlo Del Gaudio^a, Annalisa Rosti^b, Maria Rota^c, Paolo Ricci^a, Andrea Penna^b, Gerardo Mario Verderame^a

^a Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura – Università degli Studi di Napoli Federico II

^b Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura – Università di Pavia

^c Dipartimento Costruzioni e Infrastrutture, Fondazione EUCENTRE

Keywords: vulnerabilità sismica, curve di fragilità empiriche, dati di danno post-terremoto, edifici in c.a.

ABSTRACT

Questo lavoro presenta curve di fragilità empiriche per il costruito esistente in c.a., da utilizzare per la valutazione del rischio sismico a scala territoriale. Le curve sono state derivate elaborando statisticamente i dati di danno post-terremoto raccolti nella piattaforma Da.D.O., utilizzando l'accelerazione di picco al suolo (PGA) stimata da shakemap come misura di intensità per la caratterizzazione dello scuotimento. Gli edifici in c.a. sono classificati in quindici tipologie edilizie, identificate sulla base del numero di piani (da 1 a 5 piani) e tipo di progettazione (edifici progettati per soli carichi gravitazionali, per carichi sismici pre-1981 e post-1981). In primo luogo, le curve di fragilità sono state derivate per le tipologie edilizie identificate e per cinque livelli di danno della EMS-98, tenendo conto del danno osservato su componenti strutturali e non strutturali. Successivamente, si sono derivate curve di fragilità per due classi di vulnerabilità a vulnerabilità decrescente e tre classi di piano, pesando le curve di fragilità tipologiche sulla base della composizione del costruito esistente.

1 INTRODUZIONE

I terremoti, tra tutti i fenomeni naturali, presentano caratteri di imprevedibilità e di forza distruttiva, in grado di produrre effetti devastanti sia in termini di perdite economiche che sociali. Per questi motivi, l'attitudine al danneggiamento degli edifici a fronte dell'occorrenza dei terremoti è stata studiata sia nell'ambito di progetti internazionali (tra i quali ad esempio Hazus, RISK-UE) sia attraverso studi specifici condotti da diversi gruppi di ricerca con l'utilizzo di metodi empirici (Braga et al., 1982; Sabetta et al., 1998; Orsini et al., 1999; Di Pasquale et al., 2005; Rota et al., 2008; Zuccaro e Cacace, 2015; Del Gaudio et al., 2017a; Rosti et al., 2018; Rosti et al., 2019a; Rosti et al., 2019b; Del Gaudio et al., 2019) e meccanici/analitici (Lagomarsino e Giovinazzi, 2006; Borzi et al., 2008; Del Gaudio et al., 2016; Del Gaudio et al., 2017b; Del Gaudio et al., 2018). Recentemente, la fondazione GEM (Global Earthquake Model) ha prodotto delle Mappe di rischio sismico a livello mondiale, riportanti le perdite annue medie attese considerando gli effetti dei terremoti sulle strutture residenziali, commerciali e industriali

per ciascuna Nazione, considerando sia il danneggiamento agli elementi strutturali che non strutturali (Silva et al., 2018).

In questo lavoro saranno presentate le curve di fragilità empiriche per edifici residenziali italiani in c.a. ottenute dai dati osservati sul danneggiamento degli edifici a fronte dei terremoti che hanno colpito il territorio nazionale negli ultimi 50 anni. Ciò è stato possibile grazie al lavoro di raccolta ed elaborazione dei dati delle schede di rilievo compilate a seguito dei 9 eventi sismici di rilevanza nazionale (Friuli 1976, Irpinia 1980, Abruzzo 1984, Umbria-Marche 1997, Pollino 1998, Molise 2002, Emilia 2003, L'Aquila 2009, Emilia 2012). A tal proposito, il Dipartimento di Protezione Civile (DPC), con il supporto di Eucentre, a valle di un lavoro di catalogazione, elaborazione ed omogeneizzazione dei dati raccolti durante gli anni ha rilasciato la piattaforma Da.D.O. (Database sul Danno Osservato) (Dolce et al., 2017) che raccoglie i dati sulle caratteristiche geometriche, tipologiche oltre che sul danno per un ammontare complessivo di oltre 300,000 edifici residenziali.

A partire da questi dati, in questo lavoro è stato condotto un ulteriore processo di revisione e selezione per gli edifici in Cemento Armato (c.a.) per ottenere un subset di edifici completo ed affidabile per la derivazione delle curve di fragilità. Tra i criteri di selezione, la completezza del dato d'origine ha rappresentato uno degli aspetti principali. Infatti, spesso le operazioni di ispezioni agli edifici avevano luogo solo su esplicita richiesta dei proprietari, minando la rappresentatività dei dati raccolti. Dal momento che la scelta degli edifici da ispezionare non era motivata da un campionamento casuale semplice, ma al contrario era governata da dinamiche interconnesse al livello di danneggiamento degli edifici stessi, i dati così raccolti, senza ulteriori elaborazioni, potrebbero introdurre errori sistematici nelle elaborazioni successive (Rossetto et al., 2018). Il campione rilevato in tal modo potrebbe, infatti, risultare parziale ed incompleto, campionando maggiormente gli edifici danneggiati rispetto ai non-danneggiati con conseguente potenziale sovrastima della vulnerabilità.

Questo subset di edifici scelto per rappresentare il costruito italiano in ca, sarà utilizzato per effettuare un'analisi di fragilità, in cui il parametro scelto per la definizione dell'intensità sismica è la l'accelerazione di picco al suolo (PGA, peak ground acceleration). Le curve di fragilità, basate su una metrica del danno costituita da 5+1 livelli di danno conformemente alla classificazione del danno della scala macrosismica europea (EMS98) (Grünthal 1998), considera sia il danneggiamento alle strutture verticali che alle tamponature/tramezzi.

In definitiva, saranno prese in considerazione 15 differenti tipologie strutturali per la derivazione delle curve di fragilità, definite sulla base del numero di piani (da 1 a 5), della tipologia di progettazione (sismica o gravitazionale), e dell'epoca di costruzione (precedente o successiva al 1981). Di queste, 2 sole classi, C2 e D, con vulnerabilità decrescente, saranno prescelte per la definizione delle curve di fragilità per sviluppare una procedura generalizzabile e basata su soli dati censuari. Queste curve saranno ottenute come media pesata delle curve di fragilità delle 15 tipologie strutturali, i cui pesi sono rappresentati dall'occorrenza di ciascuna classe sul territorio nazionale valutata con dati censuari.

2 DESCRIZIONE DELLE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLA PIATTAFORMA DA.D.O.

Questo studio è basato sull'elaborazione dei dati sul danneggiamento degli edifici inclusi nella piattaforma Da.D.O. (Dolce et al., 2017). Questi dati sono stati raccolti durante le campagne di rilievo degli edifici ordinari pianificate e predisposte dal DPC a seguito delle emergenze sismiche relativamente ai 9 eventi sismici di rilevanza nazionale (Friuli 1976, Irpinia 1980, Abruzzo 1984, Umbria-Marche 1997, Pollino 1998, Molise 2002, Emilia 2003, L'Aquila 2009, Emilia 2012).

Le informazioni raccolte per ciascun edificio riguardano la posizione, le caratteristiche geometriche (numero di piani, altezza di interpiano, superficie), le caratteristiche tipologiche (epoca di costruzione, struttura verticale portante, tipo di orizzontamento) ed il livello di danneggiamento per differenti componenti strutturali.

Ovviamente, negli anni sono state utilizzate diverse versioni delle schede di rilievo, che hanno prodotto differenze nella quantità e nella qualità dei dati raccolti durante le ispezioni degli edifici, ad esempio per la definizione del danneggiamento a causa dell'utilizzo di differenti versioni delle scale di danno. Queste divergenze hanno quindi richiesto un laborioso processo di omogeneizzazione dei dati raccolti durante i vari eventi considerati. In definitiva, la piattaforma Da.D.O. include 319,470 schede relative ad altrettanti edifici ordinari, di cui il 78% costituito da una struttura portante in muratura, l'8% in c.a. e la restante parte in altre tipologie (ad esempio strutture miste o in acciaio).

3 DERIVAZIONE DELLE CURVE DI FRAGILITÀ EMPIRICHE

In questa sezione viene presentata la procedura per la definizione delle curve di fragilità del costruito italiano in ca. I passi salienti per la definizione delle stesse prevedono innanzitutto la selezione delle banche dati da usare, l'approccio adottato per la caratterizzazione dell'input sismico e la definizione dei livelli di danno considerati. Nei successivi paragrafi, saranno ampiamente discussi il modello statistico e la procedura di regressione adottati per la derivazione delle curve di fragilità per classi tipologiche e classi di vulnerabilità.

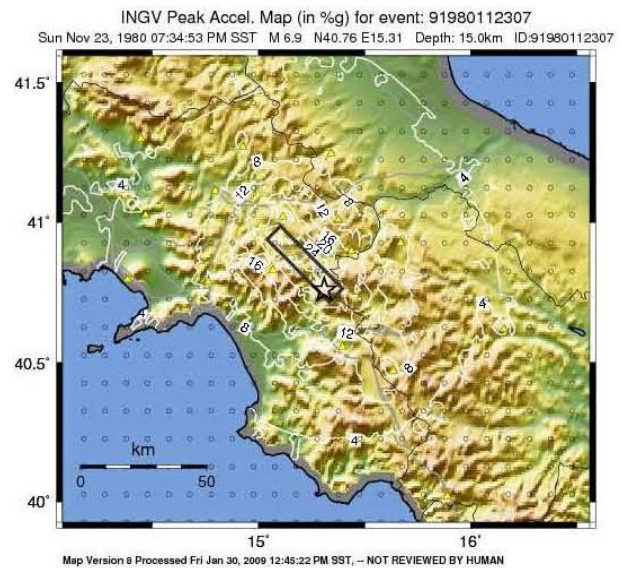
3.1 Caratterizzazione dell'input sismico

Il parametro usato in questo lavoro per la misura e la caratterizzazione dell'intensità sismica è rappresentato dalla PGA. Per ciascun edificio, il valore di PGA a cui è stato sottoposto durante l'evento sismico, è ottenuto per interpolazione spaziale da una ShakeMap, la cui disponibilità per ciascuno dei 9 eventi considerati in Da.D.O. rappresenta quindi un requisito essenziale per la definizione dell'input sismico e la successiva derivazione delle curve di fragilità. Le ShakeMap utilizzate in questo lavoro sono quelle rilasciate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), basate sull'utilizzo combinato di leggi di attenuazione sismica oltre che sui segnali registrati dalla Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) e dalla Rete Sismica Nazionale (RSN) secondo l'approccio di Meletti et al. (2007). In Figura 1 sono riportate le ShakeMap in termini di PGA rilasciate dall'INGV per i terremoti del 23 Novembre 1980 e del 6 Aprile 2009.

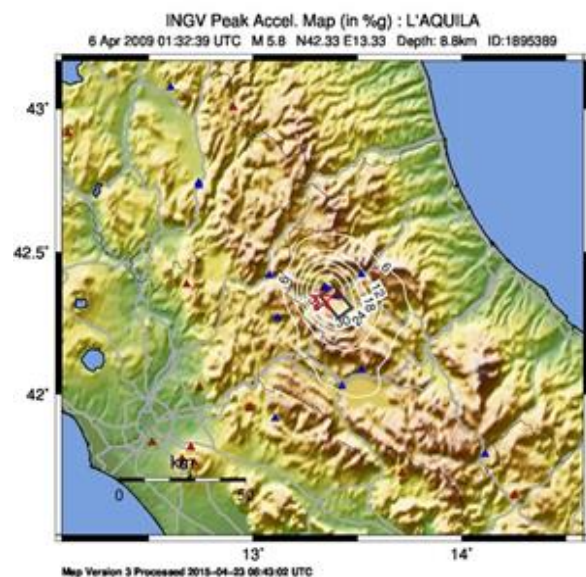
Tuttavia, solo per gli eventi successivi al 2008 vengono pubblicamente rilasciate delle versioni ufficiali delle ShakeMap sul sito ufficiale dell'INGV. Per gli eventi precedenti a tale data, non sempre sono disponibili delle versioni ufficiali rilasciate coerentemente all'approccio discusso in precedenza. Questo rappresenta, nel presente lavoro, uno dei requisiti di esclusione per il corrispondente database dalle successive elaborazioni. Gli altri requisiti adottati in questo lavoro per la selezione dei database da usare per la derivazione delle curve di fragilità sono la possibilità di usufruire di dati sul danneggiamento riguardante sia gli elementi verticali che le tamponature/tramezzi, la cui caratterizzazione è risultata imprescindibile nella definizione del danneggiamento di edifici in c.a. e delle relative conseguenze dall'analisi del danneggiamento dei più recenti terremoti, oltre che la disponibilità di un rilievo effettuato a tappeto per le aree maggiormente colpite.

In particolare, tutti i 41 Comuni rilevati a seguito del terremoto del 23 Novembre 1980 furono rilevati a tappeto, in quanto prescelti come rappresentativi del danneggiamento delle isosisme a cui essi appartenevano (Braga et al., 1982). Analogamente, i Comuni rilevati a seguito del terremoto del 6 Aprile 2009 caratterizzati da un'intensità macrosismica superiore a VI risultano rilevati a tappeto (Dolce e Goretti, 2015). In aggiunta, i Comuni caratterizzati da un grado di completezza, valutato come rapporto tra il numero di edifici ispezionati e il numero di

edifici residenziali secondo ISTAT 2001, superiore a 0.90 (Del Gaudio et al., 2019) saranno ritenuti rilevati a tappeto ed inclusi nelle successive elaborazioni, mentre quelli con grado di completezza inferiore saranno esclusi.



(a)



(b)

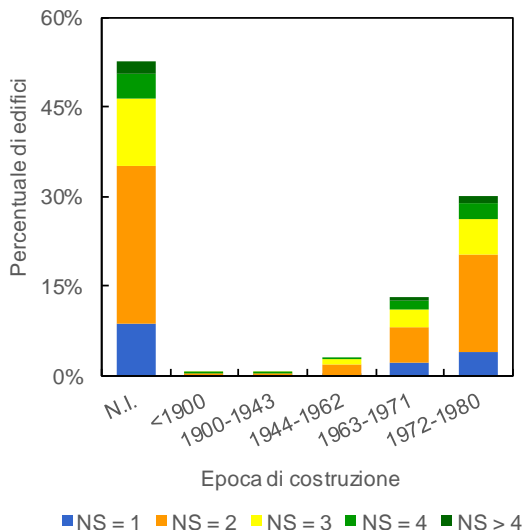
Figura 1: Shakemaps relativa ai terremoti di Irpinia del del 23 Novembre 1980 Irpinia (a) e L'Aquila del 6 Aprile 2009 (b).

In definitiva, solo 2 eventi su un totale di 9 considerati nella piattaforma Da.D.O. hanno pienamente soddisfatto i criteri esposti in precedenza, ovvero Irpinia 1980 e L'Aquila 2009, che rappresentano il 67% del campione complessivo di edifici residenziali in c.a.. Gli edifici di cui sono composti saranno utilizzati per la derivazione delle curve di fragilità del costruito in c.a. italiano.

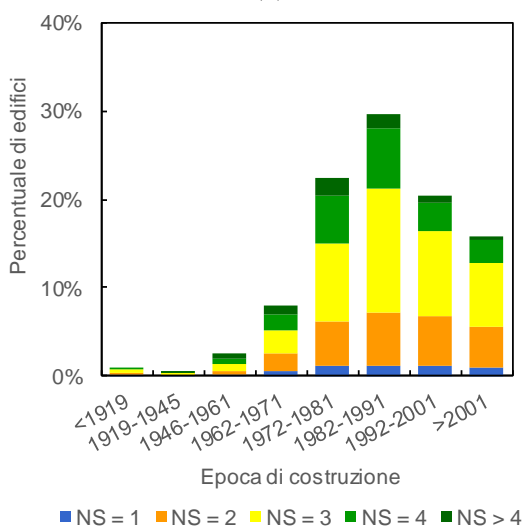
3.2 Classificazione degli edifici in c.a.

Il numero complessivo di edifici residenziali in c.a. considerato in questo studio e proveniente dalle 2 banche dati Irpinia 1980 e L'Aquila 2009 risultano pari, rispettivamente a 2,130 e 8,206.

Le statistiche sul numero di piani ed epoca di costruzione sono riportate in Figura 2. Non è stata rilevata alcuna correlazione tra i 2 parametri sia per il database Irpinia 1980 che per L'Aquila 2009.



(a)



(b)

Figura 2: Distribuzione dell'epoca di costruzione e del numero di piani per i database Irpinia 1980 (a) e L'Aquila 2009 (b).

Gran parte degli edifici di Irpinia 1980, per cui è possibile risalire all'epoca di costruzione, è stata costruita tra il 1962 ed il 1980, mentre per quanto riguarda il database L'Aquila 2009 il 34% è stato costruito prima del 1981 ed il 66% dopo il 1981. Il 66% degli edifici del database Irpinia 1980 presenta un numero di piani compreso tra 1 e 2, il 30% tra 3 e 4, solo il 4% superiore a 4. Al

contrario, il 29% degli edifici del database L'Aquila 2009 presenta un numero di piani tra 1 e 2, il 64% tra 3 e 4, il 7% superiore a 4.

Inoltre, informazioni aggiuntive riguardanti la tipologia di progettazione degli edifici possono essere desunte dal confronto tra l'epoca di costruzione degli edifici e l'epoca di prima classificazione sismica dei rispettivi Comuni. A valle di questa analisi, risulta che gran parte degli edifici colpiti dal terremoto dell'Irpinia 1980 è stata classificata solo a valle di questo evento (Decreto Ministeriale del 7 Marzo 1981), risultando quindi progettata per resistere esclusivamente ad azioni di tipo gravitazionale. Al contrario, gran parte degli edifici del database L'Aquila 2009 è stata classificata con il Regio Decreto Legge del 29 Aprile 1915, risultando quindi progettata per resistere anche ad azioni di tipo sismico.

Il campione costituito dai 10,336 edifici in c.a. (2,130 + 8,206, provenienti rispettivamente dalle banche dati Irpinia 1980 e L'Aquila 2009) è stato successivamente integrato con dati provenienti dal censimento nazionale ISTAT 2001, riconosciuta l'importanza dei dati non danneggiati nella valutazione del danno atteso specialmente per bassi valori di PGA. Infatti, l'esclusione degli edifici con grado di completezza inferiore alla soglia prescelta (pari a 0.9 in questo lavoro), è necessaria da un lato per eliminare eventuali errori sistematici nella valutazione della fragilità sismica dovuti a eventuali rilievi di subset parziali o incompleti, ma dall'altro lato esclude dalle successive elaborazioni tutti gli edifici ispezionati situati in queste aree. In particolare, nelle aree caratterizzate da bassi valori di PGA (inferiori a 0.05g), il bassissimo grado di completezza caratterizzante le stesse, può essere assunto come dimostrazione del fatto che in queste aree gran parte degli edifici risulti completamente non danneggiata a seguito del terremoto. Trascurando completamente questi dati dalle analisi successive, si correrebbe il rischio di sottostimare fortemente l'influenza che l'evidenza negativa del danno manifestata in queste aree ha sulle curve di fragilità. Per ovviare a questo problema, i dati relativi agli edifici dei Comuni non ispezionati della Regione Abruzzo oltre a quelli ispezionati parzialmente (con grado di completezza inferiore al 10%), il cui ammontare complessivo e le loro caratteristiche sono state determinate a partire dai

dati ISTAT 2001, sono assunti come completamente non danneggiati e aggiunti al database originale ottenuto a partire da Da.D.O. come fonte integrativa. In definitiva, quindi, ai 10,336 edifici in c.a. sono stati aggiunti 50,824 edifici non danneggiati situati in zone a bassa PGA (per lo più inferiore a 0.05g).

3.3 Definizione della metrica di conversione del danno osservato

Le informazioni sul danneggiamento degli edifici, utilizzando una metrica basata su 5 + 1 livelli di danno (nessun danno – DS0, danno lieve – DS1, danno moderato – DS2, danno

significativo – DS3, danno grave – DS4, collasso DS5), sono state definite sulla base della classificazione riportata nella EMS98 a partire dalle informazioni riportate dalle schede di rilievo post-terremoto su due componenti strutturali: strutture verticali e tamponamenti/tramezzi. A tal scopo, sono state utilizzate le regole di conversione riportate da Rota et al. (2008) per le strutture verticali, e da Del Gaudio et al. (2017a) per i tamponamenti/tramezzi. Il massimo livello di danno osservato tra le strutture verticali e i tamponamenti/tramezzi definisce il livello di danno per l'edificio considerato.

Tabella 1: Regole di conversione del danno adottate per la classificazione del danno degli edifici in c.a.

	Scheda di rilievo Irpinia		Scheda di rilievo L'Aquila	
	Strutture verticali	Tamponature/ tramezzi	Strutture verticali	Tamponature/ tramezzi
DS0	Nessun danno	Nessun danno	D0	D0
DS1	Irrilevante Lieve	Irrilevante Lieve	D1 - <1/3 D1 - 1/3-2/3 D1 - >2/3	D1 - <1/3 D1 - 1/3-2/3 D1 - >2/3
DS2	Notevole Grave	Notevole Grave	D2-D3 - <1/3	D2-D3 - <1/3 D2-D3 - 1/3-2/3 D2-D3 - >2/3
DS3	Gravissimo	Gravissimo Crollato parzialmente Distretto	D2-D3 - 1/3-2/3 D2-D3 - >2/3	D4-D5 - <1/3 D4-D5 - 1/3-2/3 D4-D5 - >2/3
DS4	Crollato parzialmente		D4-D5 - <1/3 D4-D5 - 1/3-2/3	
DS5	Distretto		D4-D5 - >2/3	

3.4 Tecnica di regressione statistica

In questo lavoro, la funzione cumulata della distribuzione lognormale è stata scelta come modello statistico per rappresentare la probabilità di superamento in funzione della PGA dei differenti livelli di danno.

La distribuzione multinomiale è stata prescelta per definire l'occorrenza degli edifici, n_{ij} , per ciascun livello di danno, DS_i , (Charvet et al. 2014) per ciascun bin equispaziato di PGA_j , dell'ampiezza di 0.05g:

$$n_{ij} \sim \prod_{i=0}^n \frac{N_j!}{n_{ij}!} P(ds = DS_i | PGA_j)^{n_{ij}} \quad (1)$$

in cui N_j rappresenta il numero totale di edifici nel bin j -esimo, $P(ds=DS_i|PGA_j)$ rappresenta la probabilità di occorrenza del DS_i nel bin PGA_j

La funzione cumulata della distribuzione lognormale, $\Phi[\cdot]$, restituisce la probabilità di superamento dell' i -esimo DS relativamente al j -esimo valore di PGA:

$$P(ds = DS_i | PGA_j) = \Phi \left[\frac{\ln(PGA_j / \theta_{DS_i})}{\beta} \right] \quad (2)$$

in cui θ_{DS_i} e β rappresentano i parametri della distribuzione lognormale, media e deviazione standard logaritmici relativi al DS_i .

Quindi le curve di fragilità empiriche sono state derivate attraverso il metodo della Massima Verosimiglianza (Maximum Likelihood Estimation method). Al fine di rispettare la natura ordinale del danneggiamento è stato assunto un valore costante di dispersione per tutti i livelli di danno per ciascun set di curve. A tal fine, è stato effettuato un processo di ottimizzazione, valutando simultaneamente i 5 valori di θ_{DS_i} ($i = 1, \dots, 5$) ed un unico valore di β .

3.5 Curve di fragilità per classi tipologiche e per classi di vulnerabilità

Per la derivazione delle curve di fragilità, sono state individuate 15 tipologie, in funzione del numero di piani (variabile da 1 a 5), della

tipologia di progettazione (gravitazionale e sismica) e dell'epoca di costruzione (edifici costruiti prima e dopo il 1981). La suddivisione in relazione all'epoca di costruzione garantisce in primo luogo la consistenza interna tra i 2 database considerati (quello Irpinia 1980 ha al suo interno solo edifici costruiti anteriormente a tale data) ed inoltre evidenzia una lecita separazione dovuta all'emanazione di una nuova generazione di norme tecniche sulle costruzioni, inaugurata dalla Legge n.70 del 20 Marzo 1975.

Per quanto riguarda invece le tipologie di progettazione, gli edifici progettati per resistere solo ad azioni gravitazionali sono rappresentati per lo più da quelli del database di Irpinia 1980, così come definito nel paragrafo 3.2, mentre viceversa quelli progettati per resistere anche ad azioni di tipo sismico da quelli del database L'Aquila 2009.

Le curve di fragilità derivate per queste 15 tipologie strutturali, mostrano una chiara gerarchia, con riduzione della vulnerabilità nel passaggio da edifici gravitazionali a quelli sismici pre-1981 a quelli sismici post-1981, e maggiore vulnerabilità a parità di ciascuna tipologia all'aumentare del numero di piani.

Infine, è stato applicato un processo di generalizzazione orientato ad applicazioni su

scala regionale/nazionale, come quella sviluppata in Rosti et al. (2019c) per quanto riguarda gli edifici in c.a., a partire dalle elaborazioni sviluppate nel presente lavoro, e tale da ricondurre le curve iniziali a un minor numero di parametri, desumibili da dati di base "poveri", come ad esempio i dati censuari. A tal fine, le 15 classi tipologiche sono state ridotte a 2 sole classi, C2 e D, con vulnerabilità decrescente, ulteriormente suddivise in 3 classi di altezza: bassa (L) costituita da edifici di 1-2 piani; media (M) 3-4 piani; alta (H) >4 piani.

In particolare, la classe C2 è costituita dall'aggregazione degli edifici gravitazionali e da quelli sismici obsoleti (in quanto costruiti prima dell'emanazione della Legge n.70 del 20 Marzo 1975), mentre la classe D dagli edifici sismici di nuova generazione (costituiti dopo l'emanazione della Legge n.70 del 20 Marzo 1975). I 6 (=3×2) gruppi di curve di fragilità (Figura 3) relativi alle classi di vulnerabilità, C2 e D, per le 3 classi di altezza (L, M, H) sono ottenute come media pesata di quelle relative alle 15 classi tipologiche, definendo come pesi l'occorrenza di ciascuna classe tipologica su base nazionale, definita attraverso i dati ISTAT 2001.

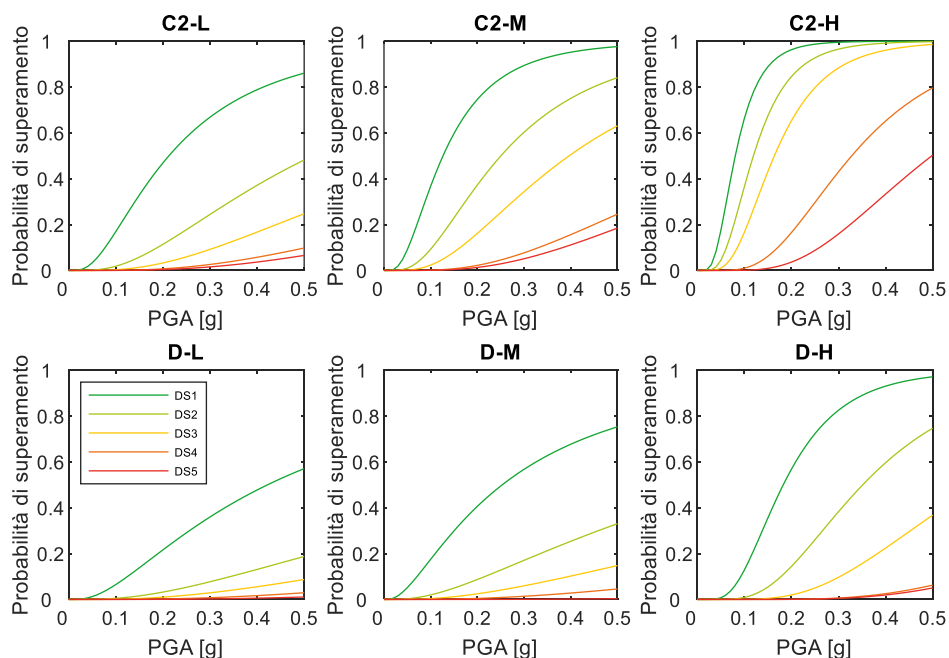


Figura 3: Curve di fragilità empiriche per le 2 classi di vulnerabilità (C2 e D) e le 3 classi di altezza (L, M and H).

DPC 2014-2018. Gli autori ringraziano per l'inestimabile supporto.

4 CONCLUSIONI

In questo lavoro sono state derivate le curve di fragilità empiriche per il costruito esistente in c.a. elaborando statisticamente i dati raccolti nella piattaforma online Da.D.O., recentemente rilasciata dal Dipartimento della Protezione Civile. Quest'ultimo raccoglie informazioni su un campione di 319,470 edifici residenziali, ispezionati successivamente ai terremoti di rilevanza nazionale avvenuti dal 1976 al 2012.

L'accelerazione di picco al suolo, utilizzata come parametro per la definizione dell'intensità sismica, è stata valutata per ciascun edificio utilizzando le mappe di scuotimento derivate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. I 5 livelli di danno considerati, coerentemente con la classificazione della scala EMS98, sono ottenuti in funzione del massimo danno osservato sulle strutture verticali e sui tamponamenti/tramezzi. Le curve di fragilità lognormali sono state ottenute massimizzando la funzione verosimiglianza, in cui la distribuzione multinomiale definisce l'occorrenza delle probabilità di danneggiamento nei vari livelli di danno.

Le curve di fragilità sono ottenute dapprima per quindici tipologie strutturali, identificate sulla base del numero di piani (da 1 a 5 piani) e tipo di progettazione (edifici progettati per soli carichi gravitazionali, per carichi sismici pre-1981 e post-1981), e successivamente, per 2 sole classi di, C2 e D, con vulnerabilità decrescente, attraverso un processo di generalizzazione indirizzato per applicazioni basate su dati censuari. Tali classi sono ottenute per aggregazione delle 15 tipologie strutturali. In particolare, la classe C2 è ottenuta dall'aggregazione degli edifici gravitazionali e da quelli sismici obsoleti (pre-1981), mentre la classe D dagli edifici sismici di nuova generazione (post-1981). L'aggregazione viene effettuata attraverso la media pesata delle curve relative alle 15 classi tipologiche, in cui i pesi definiscono l'occorrenza di ciascuna classe tipologica su base nazionale attraverso l'analisi dei dati ISTAT 2001.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto con il sostegno finanziario del Dipartimento della Protezione Civile italiano nell'ambito del progetto ReLUI-

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Borzi, B., Pinho, R., Crowley, H., 2008. Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings. *Engineering Structures*, **30**(3), 804-820.
- Borzi, B., Faravelli, M., Onida, M., Polli, D., Quaroni, D., Pagano, M., Di Meo, A., 2018. IRMA Platform (Italian Risk Maps). *37th National Conference GNGTS*, November 19-21, Bologna, Italy.
- Braga, F., Dolce, M., Liberatore, D., 1982. A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K.-76 scale. *7th European Conference on Earthquake Engineering*, September 20-25, Athens, Greece.
- 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. *Engineering Structures*, **91**, 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.031>
- Del Gaudio, C., Ricci, P., Verderame, G.M., Manfredi, G., 2016. Observed and predicted earthquake damage scenarios: the case study of Pettino (L'Aquila) after the 6th April 2009 event. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **14**, 2643-2678. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9919-2>
- Del Gaudio, C., De Martino, G., Di Ludovico, M., Ricci, P., Verderame, G.M., 2017a. Empirical fragility curves from damage data on RC buildings after the 2009 L'Aquila earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**, 1425-1450. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0026-1>
- Del Gaudio, C., Ricci, P., Verderame, G.M., Manfredi, G., 2017b. Urban-scale seismic fragility assessment of RC buildings subjected to L'Aquila earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng*, **96**, 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.003>
- Del Gaudio, C., Ricci, P., Verderame, G.M., 2018. A class-oriented mechanical approach for seismic damage assessment of RC buildings subjected to the 2009 L'Aquila earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**, 4581-4605. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0365-1>
- Del Gaudio, C., Di Ludovico, M., Magenes, G., Penna, A., Polese, M., Prota, A., Ricci, P., Rosti, A., Rota, M., Verderame, G.M., 2019. A procedure for seismic risk assessment of Italian RC buildings. *7th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, June 24-26, Crete, Greece.
- Di Pasquale, G., Orsini, G., Romeo, R.W., 2005. New developments in seismic risk assessment in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3**(1), 101-128.
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Borzi, B., Bocchi, F., Conte, C., Di Meo, A., Faravelli, M., Pascale, V., 2017. Da.D.O. – A web-based tool for analyzing and comparing post-earthquake damage database relevant to national seismic events since 1976. *17th Italian Conference on Earthquake Engineering*, September 17-21, Pistoia, Italy.

- Federal Emergency Management Agency (FEMA). Hazus-MH 2.1 Technical Manual: Earthquake Model, 2012
- Grünthal, G. (ed.), Musson, R.M.W., Schwarz, J., Stucchi, M., 1998. European Macroseismic Scale. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15 - European Macroseismic Scale 1998. European Centre for Geodynamics and Seismology, Luxembourg.
- ISTAT (2001). 14^{mo} Censimento generale della popolazione e delle abitazioni.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **4**, 415–443.
- Meletti, C., 2007. Progetto S1. Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274/2003 e progettazione di ulteriori sviluppi. Rapporto finale, del Progetto INGV-DPC S1.
- Michelini, A., Faenza, L., Lauciani, V., Malagnini, L., 2008. Shakemap implementation in Italy. *Seismological Research Letters*, **79**, 688-697.
- Ministerial decree n. 40 3/3/1975, Approval of the technical standards for constructions in seismic zones ", official gazette n. 93 of 8/4/1975. (in Italian).
- Ministerial decree 07/03/1981. Declaration in seismic areas in the regions of Campania, Basilicata and Puglia. (in Italian).
- Ministerial decree 19/03/1982. Updating of seismic areas in the Tuscany region. (in Italian).
- Mouroux, P., Le Brun, B., 2006. Presentation of RISK-UE project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **4**(4), 323-339.
- Orsini, G., 1999. A model for buildings' vulnerability assessment using the Parameterless Scale of Seismic Intensity (PSI). *Earthquake Spectra*, **15**(3), 463-483.
- Rossetto, T., Ioannou, I., 2018. Empirical Fragility and Vulnerability Assessment: Not Just a Regression. *Risk Modeling for Hazards and Disasters*, 79-103.
- 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**, 3687-3720.
- Rosti, A., Del Gaudio, C., Di Ludovico, M., Magenes, G., Penna, A., Polese, M., Prota, A., Ricci, P., Rota, M., Verderame, G.M., 2019a. Empirical vulnerability curves for Italian residential buildings. *Submitted to Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*.
- Rosti, A., Rota, M., Magenes, G., Penna A., 2019b. A procedure for seismic risk assessment of Italian masonry buildings. *7th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, June 24-26, 2019, Crete, Greece.
- Rosti, A., Del Gaudio, C., Rota, M., Ricci, P., Penna, A., Verderame, G.M., 2019c. Uso di curve di fragilità empiriche per la valutazione del rischio sismico a scala nazionale. XVIII Convegno ANIDIS 2019 "L'ingegneria sismica in Italia" (Ascoli Piceno, 15 settembre – 19 settembre 2019).
- Rota, M., Penna, A., Strobbia, C.L., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(10): 933-947.
- Rota, M. Penna, A., Strobbia, C., Magenes, G., 2011. Typological seismic risk maps for Italy. *Earthquake Spectra*, **27**, 907-926.
- Royal decree 29/04/1915. Technical and hygienic rules to be observed for construction works in the areas hit by the earthquake of 13 January 1915. (in Italian).
- Royal decree n. 431 13/03/1927. Technical and hygienic standards of construction for places hit by earthquakes. Official Gazette n. 82 of 04/08/1927. (in Italian).
- Sabetta, F., Goretti, A., Lucantoni, A., 1998. Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion. *Proceedings of the 11th European Conference on earthquake Engineering*, September 6-11, 1998, Paris, France.
- Silva, V., Amo-Oduro, D., Calderon, A., Dabbeek, J., Despotaki, V., Martins, L., Rao, A., Simionato, M., Viganò, D., Yepes, C., Acevedo, A., Horspool, N., Crowley, H., Jaiswal, K., Journeay, M., Pittore, M., 2018. Global Earthquake Model (GEM) Seismic Risk Map (version 2018.1). DOI: 10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-RISK-MAP-2018.1.
- Zuccaro, G., Cacace, F., 2015. Seismic vulnerability assessment based on typological characteristics. The first level procedure "SAVE". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **69**, 262-269.