



Derivazione di curve di fragilità empiriche per edifici residenziali in muratura

Annalisa Rosti^a, Maria Rota^b, Guido Magenes^{a,b}, Andrea Penna^{a,b}

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia, Via Ferrata 3, 27100 Pavia

^b Dipartimento Costruzioni e Infrastrutture, Fondazione EUCENTRE, Via Ferrata 1, 27100 Pavia

Parole chiave: Vulnerabilità sismica; curve di fragilità empiriche; dati di danno post-terremoto; edifici in muratura

SOMMARIO

In questo lavoro si presenta un modello di fragilità per edifici residenziali in muratura, da utilizzare per valutazioni di vulnerabilità e rischio sismico a scala territoriale. Il modello proposto è derivato empiricamente elaborando statisticamente dati di danno post-terremoto raccolti a seguito degli eventi sismici di Irpinia (1980) e L'Aquila (2009). Le curve di fragilità sono definite per tre classi di vulnerabilità (A: alta vulnerabilità, B: media vulnerabilità, C1: bassa vulnerabilità), ulteriormente suddivise sulla base del numero di piani. A tal fine, i dati di danno post-terremoto sono classificati in tipologie edilizie, rappresentative del costruito italiano, e livelli di danno. Curve di fragilità tipologiche sono derivate per cinque stati di danno della EMS-98, considerando come misura di intensità sismica l'accelerazione di picco al suolo (PGA) da shakemap. Le tipologie edilizie sono successivamente attribuite alle classi di vulnerabilità A, B e C1, sulla base della similarità della fragilità osservata. Dall'altro lato, si presenta una metodologia per determinare la composizione del costruito esistente in termini di classi di vulnerabilità, a partire dai dati del censimento nazionale.

1 INTRODUZIONE

La valutazione del rischio sismico a scala territoriale è fondamentale per la definizione ed implementazione di strategie di mitigazione del rischio e per la gestione dell'emergenza post-terremoto. Il rischio sismico risulta dalla convoluzione di tre ingredienti, quali pericolosità, esposizione e vulnerabilità. Quest'ultima, che rappresenta la propensione di un edificio ad essere danneggiato da un evento sismico, attrae principalmente la comunità ingegneristica. La disponibilità di stime di vulnerabilità accurate, insieme all'applicazione di strategie di intervento e miglioramento sismico agli edifici esistenti, possono infatti contribuire efficacemente a limitare le conseguenze dovute a terremoti futuri.

I metodi presenti in letteratura per la quantificazione della vulnerabilità sismica sono comunemente classificati in empirici, analitici ed ibridi. La scelta del tipo di approccio dipende sia dalla natura dei dati a disposizione che dallo scopo dello studio. In questo contesto, gli approcci empirici si basano sull'elaborazione statistica di dati di danno raccolti durante i rilievi speditivi post-terremoto (e.g. Braga et al. 1982; Rossetto e Elnashai 2003; Rota et al. 2008; Karababa e

Pomonis 2011; Dolce e Goretti 2015; Del Gaudio et al. 2017; Rosti et al. 2018). L'interpretazione dei dati di danno empirici può risultare difficoltosa a causa di molteplici fonti di incertezza, principalmente associate all'acquisizione dei dati stessi, che necessitano di essere accuratamente considerate. Ciononostante, derivando dall'osservazione diretta della reale prestazione sismica degli edifici, i dati di danno osservazionali rappresentano una preziosa fonte di informazione. Inoltre, grazie alla loro natura statistica, gli approcci empirici rappresentano uno strumento efficace per la descrizione della vulnerabilità nell'ambito di applicazioni a larga scala (e.g. Rota e Rosti 2017; Rosti e Rota 2017).

In questo lavoro si derivano curve di fragilità empiriche per edifici residenziali in muratura, da utilizzare nell'ambito di studi di vulnerabilità e di rischio sismico a scala territoriale. Il modello di fragilità proposto, definito coerentemente con le caratteristiche della piattaforma nazionale del rischio sismico (Borzi et al. 2018, <http://irma.eucentre.it/irma/web/home>), è derivato elaborando statisticamente i dati di danno post-terremoto relativi agli eventi sismici di Irpinia (1980) e L'Aquila (2009). Le curve di fragilità sono definite per tre classi di vulnerabilità,

identificate sulla base della similarità della fragilità osservata di tipologie edilizie predefinite, e due classi di piano. Dall'altro lato, la derivazione di curve di fragilità per classi di vulnerabilità ha richiesto la messa a punto di una procedura per definire la composizione del costruito esistente in termini di classi di vulnerabilità, a partire dai dati del censimento nazionale.

Il modello di fragilità proposto per gli edifici residenziali in muratura, insieme a quello derivato per gli edifici in c.a. (Del Gaudio et al. 2019), è stato implementato nella piattaforma nazionale di rischio sismico per effettuare valutazioni di rischio a scala nazionale (Rosti et al. 2019).

2 DESCRIZIONE DEI DATI DI DANNO POST-TERREMOTO

Il modello di fragilità proposto in questo studio è derivato empiricamente, elaborando statisticamente i dati di danno post-terremoto disponibili nella piattaforma Da.D.O. (Dolce et al. 2019). Delle nove banche dati raccolte in Da.D.O. (Figura 1), si sono considerate quelle relative ai terremoti di Irpinia (1980) e L'Aquila (2009).

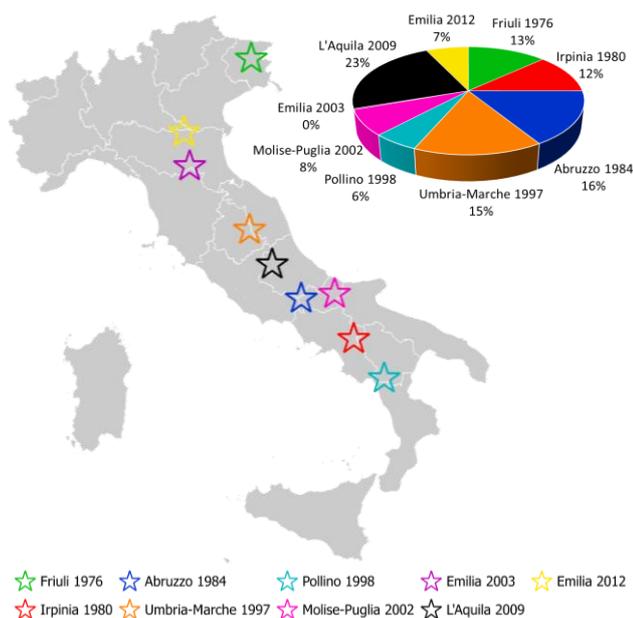


Figura 1. Localizzazione degli eventi sismici italiani del periodo 1980-2012 presenti in Da.D.O. e suddivisione delle schede di rilievo per evento sismico.

La scelta di questi due eventi sismici deriva sia dalla disponibilità di shakemaps, utilizzate per la caratterizzazione dell'input sismico, sia dalla numerosità e completezza dei dati a disposizione (ovvero rilievi effettuati su tutti gli edifici situati in una certa unità amministrativa).

L'utilizzo di dati di danno da rilievi incompleti rappresenta un aspetto critico nel trattamento dei dati osservazionali. Questa criticità riguarda

generalmente i comuni meno colpiti dal terremoto, dove è molto probabile che gli edifici per i quali non è stato richiesto il sopralluogo siano quelli non danneggiati. In questi casi, la sottostima del numero di edifici non danneggiati può comportare errori sistematici nelle distribuzioni di danno risultanti.

Con riferimento agli eventi sismici considerati (Figura 2 e Figura 3), tutti i comuni presenti nella banca dati di Irpinia (1980) sono stati rilevati a tappeto (Braga et al. 1982).

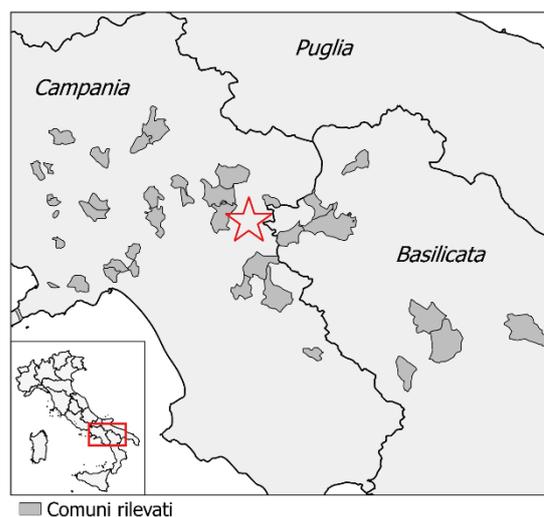


Figura 2. Identificazione dei comuni rilevati a seguito del terremoto di Irpinia (1980)

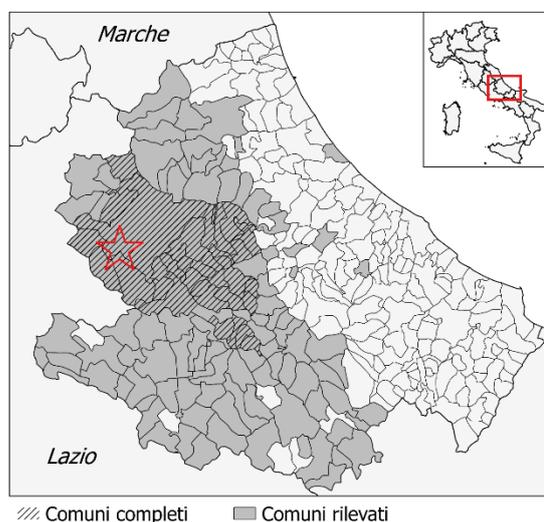


Figura 3. Identificazione dei comuni rilevati a seguito del terremoto de L'Aquila (2009)

Nel caso de L'Aquila (2009), gli edifici situati nei comuni con intensità macrosismica uguale o inferiore al grado VI (MCS) sono stati rilevati solo su richiesta del proprietario (Dolce e Goretti 2015). In questo caso, si sono considerati rilevati a tappeto tutti i comuni con rapporto tra numero di edifici rilevati e numero di edifici censiti superiore al 90% (e.g. Rota et al. 2008; Rosti et al. 2018). A

seguito di queste operazioni, l'insieme di dati di danno a disposizione conta approssimativamente 50'000 edifici in muratura. Per tener conto dell'evidenza negativa del danno nei comuni meno colpiti dal terremoto, l'insieme di dati di danno è stato integrato dagli edifici in muratura situati nei comuni abruzzesi non rilevati o parzialmente rilevati (con completezza inferiore al 10%), assunti non danneggiati (e.g. Karababa e Pomonis 2011).

3 INGREDIENTI DELLE CURVE DI FRAGILITÀ

La derivazione di curve di fragilità richiede l'associazione di una misura di intensità sismica ad ogni edificio ispezionato (Sezione 3.1), la classificazione tipologica del costruito esistente (Sezione 3.2) e la definizione di livelli di danno, a partire dall'informazione sul danno osservato riportata nella scheda di rilievo (Sezione 3.3). Al fine di ottenere una rappresentazione continua della fragilità in funzione della misura di intensità sismica è necessario utilizzare un modello statistico ed una appropriata procedura di regressione per approssimare i dati osservazionali (Sezione 3.4).

3.1 Caratterizzazione dello scuotimento sismico

Ad ogni edificio ispezionato si è associato un valore di PGA, stimato da shakemap (Michellini et

al. 2008). Benché altre misure di intensità sismica potrebbero essere utilizzate per caratterizzare la severità del moto del terreno, la scelta della PGA deriva dalla necessità di essere coerenti con il modello di pericolosità implementato nella piattaforma nazionale del rischio sismico (Borzi et al. 2018). L'input sismico è stato definito a livello comunale nel caso di Irpinia e a livello del singolo edificio nel caso de L'Aquila, data la disponibilità di una più accurata georeferenziazione.

3.2 Classificazione tipologica degli edifici in muratura

Gli edifici in muratura sono stati classificati in otto tipologie edilizie, rappresentative del costruito italiano (Tabella 1). In accordo con Rota et al. (2008), la classificazione tipologica adottata considera:

- tessitura e qualità della muratura (IRR: muratura con tessitura irregolare o di cattiva qualità; REG: muratura con tessitura regolare e di buona qualità);
- rigidità nel piano dei diaframmi intermedi (F: diaframma flessibile; R: diaframma rigido);
- presenza (o assenza) di elementi di collegamento (CC: con catene e/o cordoli; NCC: senza catene e cordoli).

Tabella 1. Classificazione tipologica adottata

Caratteristiche della muratura	Diaframma	Catene/Cordoli?	Tipologia edilizia
Irregolare o cattiva qualità (IRR)	Flessibile (F)	No (NCC)	IRR-F-NCC
		Sì (CC)	IRR-F-CC
	Rigido (R)	No	IRR-R-NCC
		Sì	IRR-R-CC
Regolare e buona qualità (REG)	Flessibile (F)	No	REG-F-NCC
		Sì	REG-F-CC
	Rigido (R)	No	REG-R-NCC
		Sì	REG-R-CC

La Figura 4 mostra la classificazione tipologica degli edifici in muratura, distinti sulla base della tessitura e qualità della muratura. Si osserva che la maggior parte degli edifici con muratura irregolare o di cattiva qualità è caratterizzata da solai flessibili e dall'assenza di elementi di collegamento (71%). Viceversa, diaframmi rigidi e catene e/o cordoli caratterizzano la maggior parte degli edifici con muratura di buona qualità e tessitura regolare (48%).

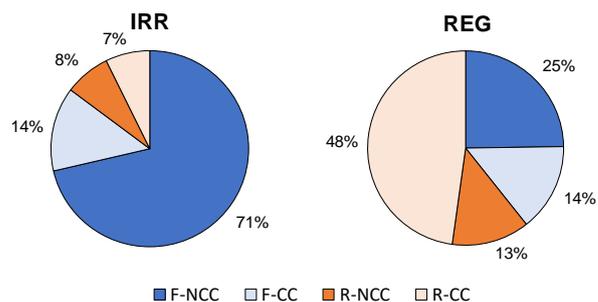


Figura 4. Classificazione tipologica degli edifici in muratura, distinti sulla base della tessitura e qualità della muratura

3.3 Classificazione del danno sismico osservato

Ad ogni edificio ispezionato è stato associato un livello di danno globale, a partire dall'informazione sul danno riportata nelle schede di rilievo. Quest'ultima è stata convertita nei livelli di danno della EMS-98 (Grünthal et al. 1998), utilizzando le leggi di conversione proposte da Dolce et al. (2019) e Rota et al. (2008) per Irpinia e L'Aquila, rispettivamente. Ad ogni edificio ispezionato, si è quindi associato un livello di danno globale, definito sulla base del massimo danno osservato su diversi componenti strutturali (Rosti et al. 2018). La classificazione del danno osservato è mostrata in Figura 5, con riferimento alle tipologie edilizie identificate in Tabella 1.

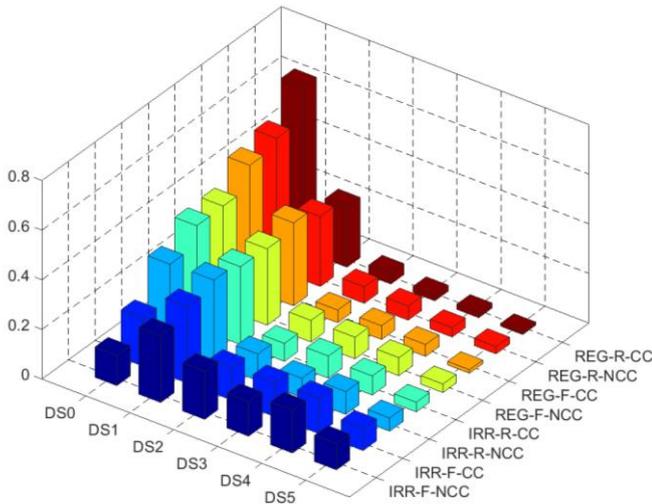


Figura 5. Distribuzione del danno per le tipologie edilizie (Tabella 1)

3.4 Modello statistico e procedura di regressione

Coerentemente con le caratteristiche della piattaforma nazionale del rischio sismico, la curva di fragilità, ovvero la probabilità di raggiungere o di eccedere un dato stato di danno in funzione della PGA, è stata definita dalla distribuzione lognormale cumulata:

$$P(ds \geq DS_i | PGA_j) = \Phi \left[\frac{\ln(PGA_j / \theta_{DS_i})}{\beta} \right] \quad (1)$$

dove θ_{DS_i} indica il valore mediano di PGA associato al livello di danno DS_i e β indica la deviazione standard logaritmica. Per garantire la natura ordinale del danno ed evitare l'intersezione delle curve di fragilità, è stato assunto lo stesso valore di dispersione (β) per tutti gli stati di danno.

Per una data soglia di PGA, PGA_j , la ripartizione degli edifici nei diversi stati di danno, n_{ij} , è stata approssimata dal modello multinomiale (e.g. Charvet et al. 2014):

$$n_{ij} \sim \prod_{i=0}^n \frac{N_j!}{n_{ij}!} P(ds = DS_i | PGA_j)^{n_{ij}} \quad (2)$$

dove N_j indica il numero totale di edifici corrispondente alla soglia PGA_j e $P(ds = DS_i | PGA_j)$ è la probabilità di occorrenza del livello di danno DS_i condizionata alla PGA.

Le incognite del modello di fragilità, quali valore mediano della PGA associato a ciascun livello di danno (θ_{DS_i}) e deviazione standard logaritmica (β), sono state ottenute imponendo simultaneamente le curve di fragilità ai dati osservazionali, mediante il metodo della massima verosimiglianza (MLE).

4 DERIVAZIONE DI CURVE DI FRAGILITÀ

Le curve di fragilità sono state derivate per le otto tipologie edilizie (Figura 6), considerando il modello statistico e la procedura di regressione descritti in Sezione 3.4.

Le curve di fragilità sono state successivamente derivate per tre classi di vulnerabilità, a vulnerabilità decrescente, i.e. classe A (alta vulnerabilità), classe B (media vulnerabilità) e classe C1 (bassa vulnerabilità), e per le classi di piano L (i.e. edifici bassi: 1-2 piani) e MH (i.e. edifici medio-alti: >2 piani). L'identificazione delle classi di vulnerabilità è stata effettuata a posteriori, sulla base della similarità della fragilità osservata delle tipologie edilizie, implementando un algoritmo di aggregazione gerarchica (e.g. Day and Edelsbrunner, 1984).

La definizione delle classi di vulnerabilità ottenuta dalla strategia di aggregazione adottata è riportata in Tabella 2. Si osserva che la maggior parte degli edifici in muratura con tessitura irregolare o di cattiva qualità rientra nella classe a vulnerabilità più alta (classe A), ad eccezione di quelli con solai rigidi e con catene e/o cordoli, caratterizzati da media vulnerabilità (classe B). Le tipologie edilizie con muratura regolare e di buona qualità rientrano nella classe C1 (bassa vulnerabilità), ad eccezione degli edifici con solai flessibili e privi di elementi di collegamento, caratterizzati da media vulnerabilità (classe B).

La Figura 7 mostra la distribuzione spaziale delle tipologie edilizie (a) e delle classi di vulnerabilità (b), con riferimento ai comuni aquilani. Si osserva che la maggior parte del costruito esistente è costituito da edifici ad elevata vulnerabilità. Le curve di fragilità derivate per classi di vulnerabilità e classi di piano sono mostrate in Figura 8.

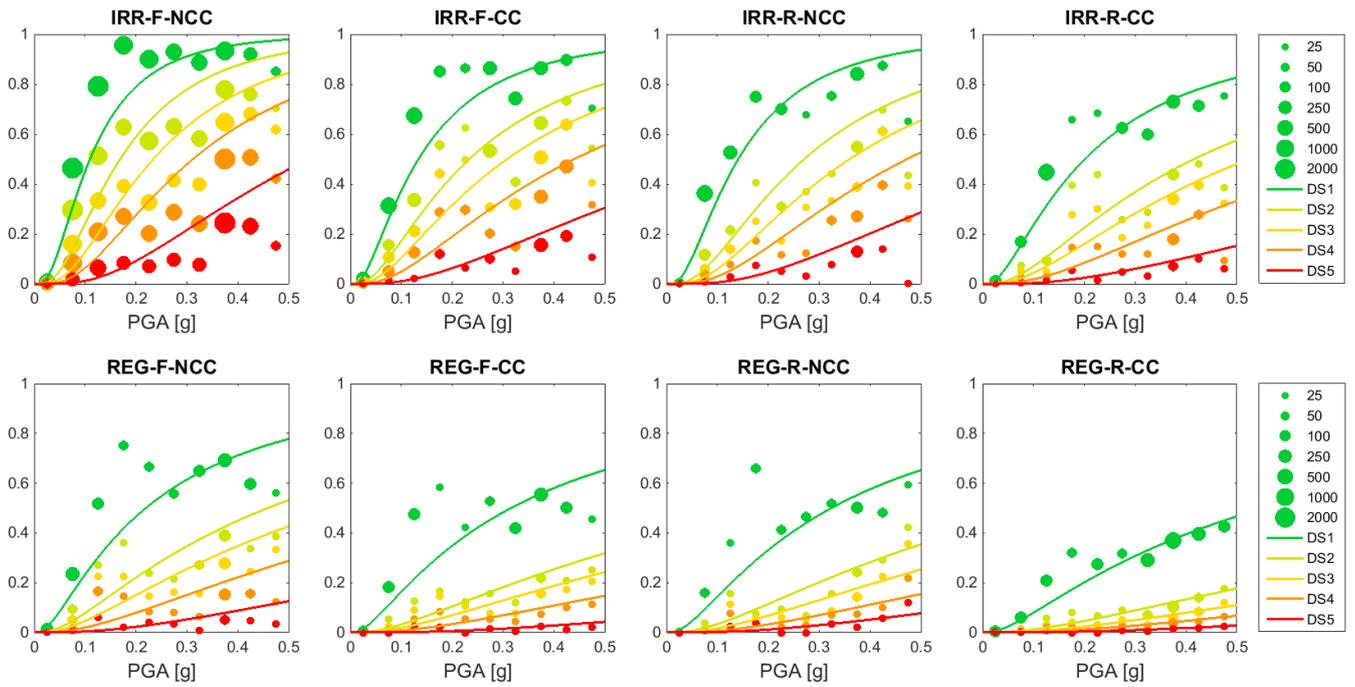


Figura 6. Curve di fragilità tipologiche

Tabella 2. Definizione delle classi di vulnerabilità.

Classe A	Classe B	Classe C1
IRR-F-NCC	IRR-R-CC	REG-F-CC
IRR-F-CC	REG-F-NCC	REG-R-NCC
IRR-R-NCC		REG-R-CC

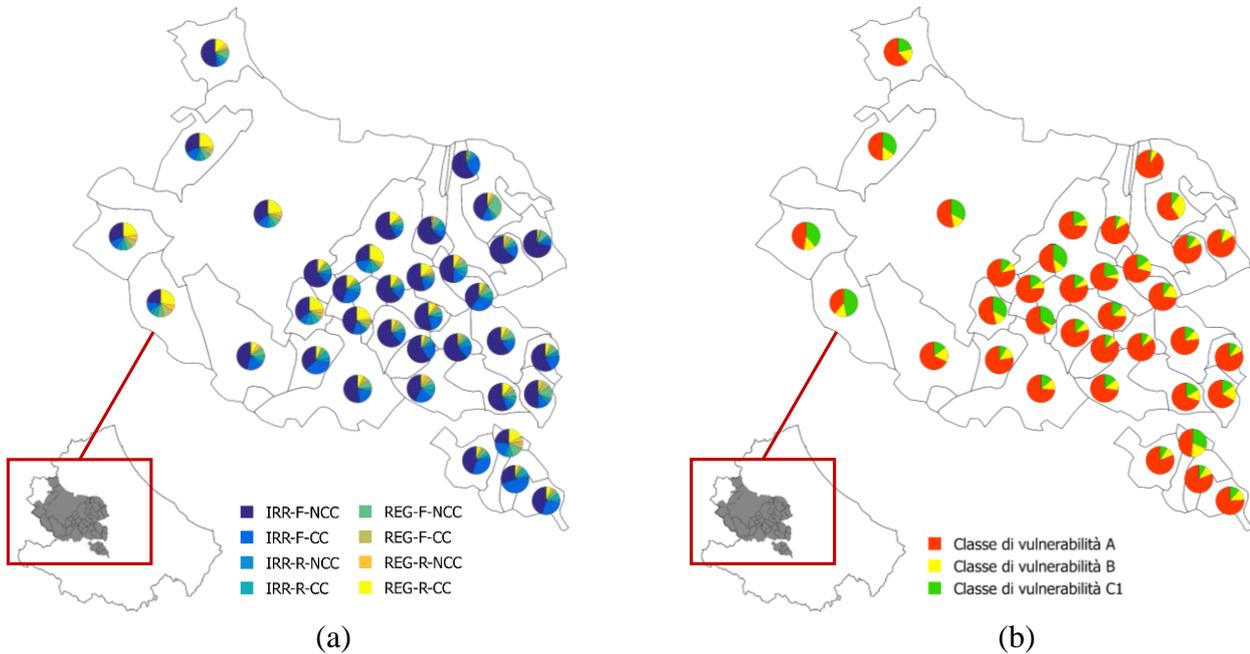


Figura 7. Distribuzione spaziale delle tipologie edilizie (a) e delle classi di vulnerabilità (b) nei comuni aquilani

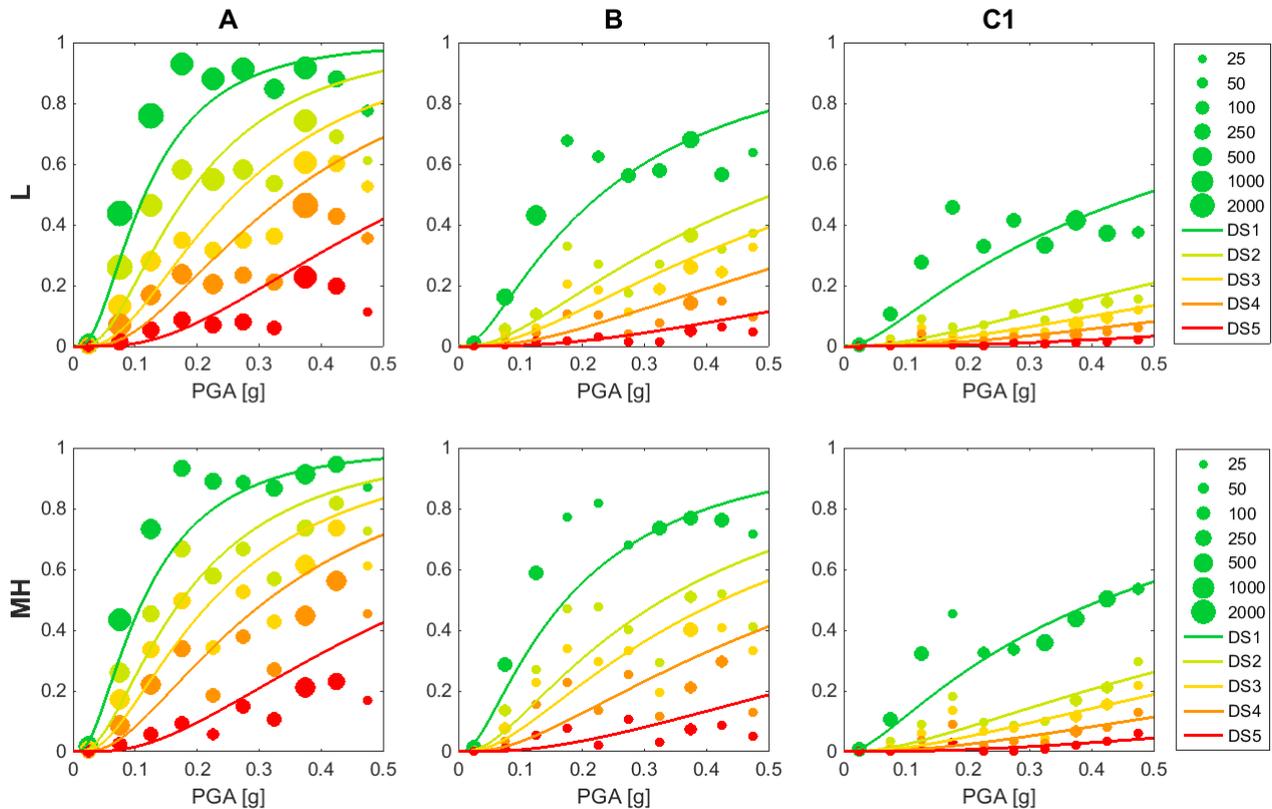


Figura 8. Curve di fragilità per classi di vulnerabilità (A, B e C1) e classi di piano (L: 1-2 piani; MH: >2 piani)

5 COMPOSIZIONE DELLA VULNERABILITÀ DEL COSTRUITO ESISTENTE

Al fine di associare le curve di fragilità derivate per classi di vulnerabilità e classi di piano a categorie di edifici (nel seguito indicate come categorie ISTAT) definite coerentemente con le informazioni rilevabili dal censimento nazionale, è stato necessario determinare la composizione del costruito in termini di classi di vulnerabilità. A tal fine, gli edifici in muratura sono stati classificati in categorie ISTAT, considerando due classi di piano (edifici bassi: 1-2 piani ed edifici medio-alti: >2 piani) e sei classi di epoca di costruzione (<1919, 1919-45, 1946-61, 1962-71, 1972-81, >1981). I dati di danno empirici relativi a ciascuna categoria ISTAT sono stati approssimati dalla distribuzione lognormale, in accordo con la procedura descritta in Sezione 3.4. Le curve di fragilità di ciascuna categoria ISTAT sono state successivamente espresse come combinazione lineare delle curve di fragilità delle classi di vulnerabilità. Le percentuali di appartenenza delle categorie ISTAT alle classi di vulnerabilità, ovvero coefficienti della combinazione lineare, sono state ottenute

minimizzando lo scarto con le curve di fragilità empiriche.

A titolo di esempio, si riporta la composizione degli edifici in muratura della regione Toscana (Figura 9) in termini di classi di vulnerabilità (Figura 10), a seguito della procedura delineata. Si osserva che buona parte dei comuni toscani dell'entroterra è per lo più costituita da edifici ad elevata vulnerabilità (classe A). Al contrario, i comuni situati lungo la costa presentano una maggiore percentuale di edifici a bassa vulnerabilità (classe C1).

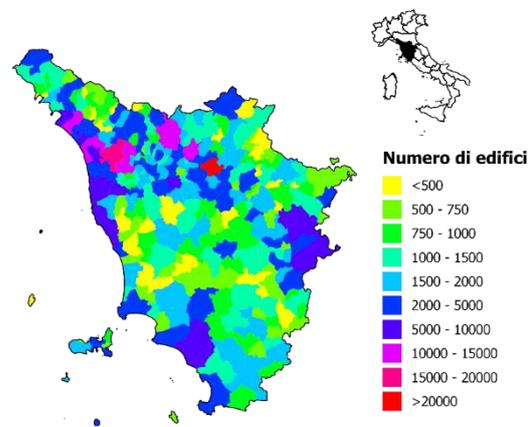


Figura 9. Esposizione: numero di edifici in muratura.

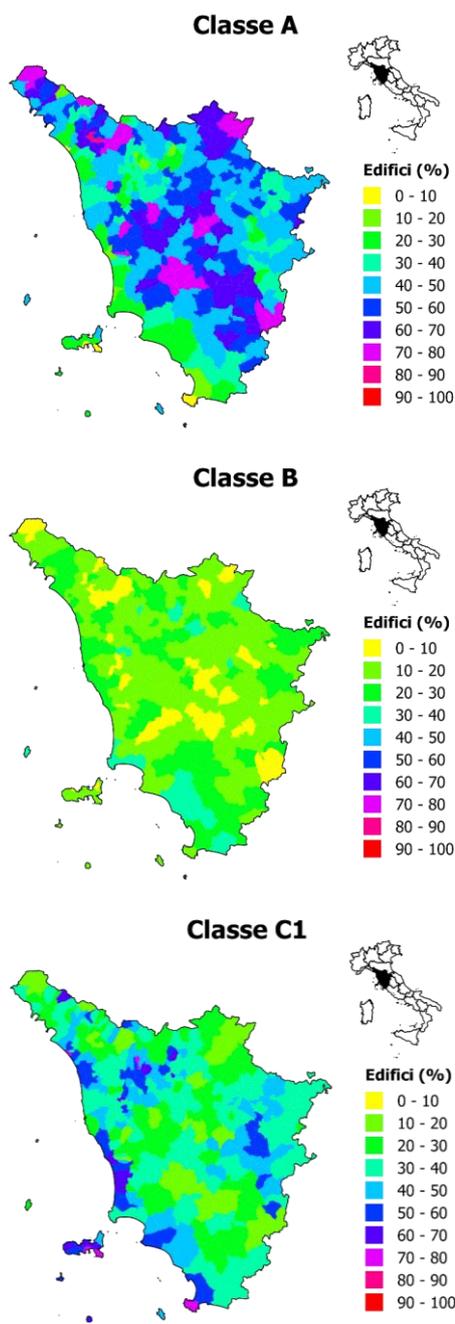


Figura 10. Distribuzione spaziale della percentuale degli edifici in muratura appartenenti alle classi di vulnerabilità A, B e C1.

6 CONCLUSIONI

In questo lavoro si sono derivate curve di fragilità empiriche per edifici residenziali in muratura, mediante l'elaborazione statistica dei dati di danno post-terremoto raccolti a seguito degli eventi sismici di Irpinia (1980) e L'Aquila (2009). Il modello di fragilità è stato sviluppato coerentemente con le principali caratteristiche della piattaforma nazionale del rischio sismico (Borzi et al. 2018), dove è stato successivamente implementato. Ad ogni edificio ispezionato si è associato un valore di PGA, stimato da shakemap.

I dati di danno post-terremoto sono stati classificati in tipologie edilizie, rappresentative del costruito italiano, e nei livelli di danno della EMS-98. Si sono derivate curve di fragilità tipologiche, utilizzando la distribuzione lognormale per approssimare i punti osservazionali. Le classi di vulnerabilità sono state successivamente identificate sulla base della similarità della fragilità osservata delle tipologie edilizie.

È stata inoltre sviluppata una procedura per determinare la composizione del costruito esistente in termini di classi di vulnerabilità, al fine di attribuire le curve di fragilità proposte a categorie di edifici identificate sulla base delle informazioni rilevabili dal censimento nazionale.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile, che ha finanziato questo lavoro, svolto nell'ambito del progetto ReLUIS-DPC 2014-2018.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Borzi, B., Faravelli, M., Onida, M., Polli, D., Quaroni, D., Pagano, M., Di Meo, A., 2018. IRMA Platform (Italian Risk Maps). Atti della 37° Conferenza Nazionale GNGTS. Novembre 19-21, Bologna, Italia.
- Braga, F., Dolce, M., Liberatore, D., 1982. A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K.-76 scale. Atti della 7° Conferenza Europea di Ingegneria Sismica. Settembre 20-25, Atene, Grecia.
- Charvet, I., Ioannou, I., Rossetto, T., Suppasri, A., Imamura, F., 2014. Empirical fragility assessment of buildings affected by the 2011 Great East Japan tsunami using improved statistical models. *Natural Hazards*, **73**, 951-973.
- Day, W.H.E., Edelsbrunner, H., 1984. Efficient Algorithms for Agglomerative Hierarchical Clustering Methods. *Journal of Classification*, **1**, 7-24.
- 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. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**, 1425-1450.
- Del Gaudio, C., Rosti, A., Rota, M., Ricci, P., Penna, A., Verderame, G.M., 2019. Derivazione di curve di fragilità empiriche per edifici residenziali in c.a.. Atti del XVIII Convegno Nazionale in Ingegneria Sismica ANIDIS. Settembre 15-19, Ascoli Piceno, Italia.
- Dolce, M., Goretti, A., 2015. Building damage assessment after the 2009 Abruzzi earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **13**(8), 2241-2264.
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Borzi, B., Bocchi, F., Conte, C., Di Meo, A., Faravelli, M., Pascale, V., 2019. Observed damage database of past Italian earthquakes: the Da.D.O. Webgis. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, **60**(2): 141-164.
- 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.
- Karababa, F.S., Pomonis, A., 2011. Damage data analysis and vulnerability estimation following the August 14, 2003 Lefkada Island, Greece, Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**, 1015–1046.
- Michelini, A., Faenza, L., Lauciani, V., Malagnini, L., 2008. Shakemap implementation in Italy. *Seismological Research Letters*, **79**, 688-697.
- Rossetto, T., Elnashai, A., 2003. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures*, **25**(10), 1241-1263.
- Rosti, A., Rota, M., 2017. Comparison of PSH results with historical macroseismic observations at different scales – Part 2: applications to South-East France. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**(11), 4609-4633.
- 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., 2019. Uso di curve di fragilità empiriche per la valutazione del rischio sismico a scala nazionale. Atti del XVIII Convegno Nazionale in Ingegneria Sismica ANIDIS. Settembre 15-19, Ascoli Piceno, Italia.
- Rota, M., Penna, A., Strobbia, C.L., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, **28**, 933-947.
- Rota, M., Rosti, A., 2017. Comparison of PSH results with historical macroseismic observations at different scales - Part 1: methodology. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**(11), 4585-4607.