



Leggi di correlazione danno costo per la definizione di scenari di perdite da sisma

Marco Di Ludovico^a, Giuseppina De Martino^a, Andrea Prota^a, Gaetano Manfredi^a

^a Università degli Studi di Napoli "Federico II", Via Claudio 21, 80125, Napoli, Italia

Parole-chiave: danno empirico, costi di riparazione, scenari di perdite economiche, esito di agibilità, ricostruzione post-sisma, curve di fragilità.

SOMMARIO

La definizione di modelli affidabili per la stima delle perdite è un aspetto cruciale nella conoscenza dei possibili effetti di un terremoto e, quindi, strumento indispensabile per la definizione di mappe di rischio, strategie di mitigazione e conseguenti scenari di perdite.

Il lavoro focalizza l'attenzione sui modelli di correlazione tra il danno fisico, l'esito di agibilità e le perdite economiche sulla base dei dati relativi alle ricostruzioni degli edifici residenziali danneggiati dal sisma che ha colpito L'Aquila nel 2009. L'analisi di tali dati ha consentito, con riferimento agli edifici residenziali in cemento armato, c.a., non solo di valutare la relazione intercorrente tra livelli di danno ed esito di agibilità, ma anche di differenziare e determinare i valori dei costi di riparazione (%CR) in funzione di ciascun livello di danno.

Tali analisi risultano di fondamentale importanza al fine di realizzare modelli in grado di stimare la probabilità di superare diverse soglie di costo di riparazione, o di assistenza alla popolazione, in funzione dell'intensità dello scuotimento sismico del terreno, ovvero al fine di predisporre curve di fragilità in termini di costi e non più in termini di danno.

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi 20 anni in Italia, e non solo, si è registrato un notevole interesse nella predisposizione di mappe di rischio sismico a livello nazionale (Zuccaro et al., 2004, Lagomarsino e Giovinazzi, 2006, Italian Civil Protection Department, 2018, Silva V. et al. 2019). La definizione delle mappe di rischio sismico prevede come passo fondamentale l'individuazione di classi di vulnerabilità del costruito e la conseguente definizione e messa a punto di curve di fragilità, per ciascuna delle classi definite, al variare dell'intensità sismica. Tale intensità può essere misurata utilizzando diverse scale strumentali basate sul moto del suolo quali il picco di accelerazione massima, PGA, la magnitudo locale o magnitudo Richter, M, la velocità spettrale, ecc...) oppure scale macrosismiche che stimano l'intensità media in una zona colpita basate su misure soggettive degli effetti prodotti dal sisma. Definito il parametro di intensità sismica al quale si intende associare la corrispondente prestazione del costruito (capacità di sostenere tale azione senza attingere prefissati livelli di danno), è possibile procedere alla definizione di curve di fragilità. Esse possono

essere costruite sia mediante metodi analitici che metodi empirici.

I metodi analitici si basano sulla definizione di modelli più o meno semplificati del comportamento degli edifici e sulla valutazione analitica della loro attitudine a subire danneggiamenti in funzione dell'intensità sismica.

In letteratura sono presenti diversi approcci che differiscono l'uno dall'altro sia per i criteri adottati nella modellazione strutturale che per la procedura di valutazione della capacità sismica (ad esempio es. D'Ayala et al., 2003; Erberik, 2008; Rota et al., 2010 per edifici in muratura e Calvi, 1999; Crowley et al., 2004; Cosenza et al., 2005; Iervolino et al., 2007; Polese et al. 2008, Borzi et al., 2008; Del Gaudio et al., 2015 per edifici in cemento armato, c.a.).

Nei metodi empirici la valutazione del danno atteso a un edificio appartenente a una determinata classe di vulnerabilità si basa sull'osservazione del danno subito durante eventi sismici passati (Braga et al., 1982, Sabetta et al., 1998; Rota et al., 2008, Zuccaro e Cacace, 2015, Del Gaudio et al., 2017, Rosti et al., 2018, Del Gaudio et al., 2019).

Sebbene le curve di fragilità ottenute mediante metodi empirici forniscano una stima della probabilità di superare diversi livelli di danno in funzione dell'intensità dello scuotimento sismico

del terreno, tuttavia, esse non risultano essere esaustive per la definizione delle perdite che a causa delle azioni di un evento sismico possono interessare, in un fissato periodo di tempo, una determinata area.

Gli orientamenti attuali della comunità scientifica sono volti ad integrare le mappe di rischio con i dati relativi alle perdite economiche intese come somma dei costi diretti necessari a riparare i danni rilevati sugli edifici a seguito di un evento sismico, e dei costi indiretti ad essi associati. I primi possono derivarsi dalla catalogazione dei più recenti dati di costo di ricostruzione di aree colpite dal sisma. Per quanto concerne, i costi indiretti, risultano avere un'elevata incidenza i costi di assistenza alla popolazione (Mannella et al., 2017) oltre a quelli dettati dall'interruzione di attività economica e la riduzione della produzione del settore industriale (Benson and Clay, 2004).

Nella presente memoria, sulla base dei dati relativi alle ricostruzioni degli edifici residenziali in cemento armato, c.a., danneggiati dal sisma che ha colpito L'Aquila nel 2009, si intende fornire indicazioni utili alla definizione delle perdite economiche connesse ad un evento sismico.

A tal fine, la memoria focalizza l'attenzione sui costi diretti intesi come costi di riparazione analizzati in relazione a: esito di agibilità; diversi livelli di danno definiti in funzione di diverse matrici di conversione tra danno empirico rilevato sulle componenti strutturali e non strutturali degli edifici e danno globale, DS.

Tale studio si innesta nell'ambito dell'accordo 2019-2021 tra il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) ed il Consorzio ReLUIS, e più in particolare nel task 4.4 "Rischio: calcolo delle conseguenze e delle perdite economiche" afferente alla linea di ricerca ReLUIS WP4 "MAPpe di Rischio e Scenari di danno sismico, MARS".

Tali analisi risultano di fondamentale importanza al fine di realizzare modelli che mirino a stimare la probabilità di superare diverse soglie di costo di riparazione, o di assistenza alla popolazione, in funzione dell'intensità dello scuotimento sismico del terreno. Ciò con l'obiettivo esplicito di predisporre, sulla base di dati provenienti da eventi sismici del passato, curve di fragilità in termini di costi e non più in termini di danno.

2 RICOSTRUZIONE POST TERRMOTO 2009

Il processo di ricostruzione degli edifici residenziali danneggiati dal sisma che ha

interessato la regione Abruzzo nel 2009 ha consentito di collezionare informazioni su 5775 edifici (49% edifici in c.a., 46% edifici in muratura e 5% edifici con struttura portante mista, in acciaio, o di altro tipo) ubicati al di fuori dei centri storici.

Per un sotto-campione di 3992 edifici (2512 in c.a. e 2480 in muratura), tali informazioni sono relative non solo alle caratteristiche costruttive del costruito, ma anche ai costi derivanti dai computi metrici allegati ai progetti presentati dai tecnici su richiesta dei proprietari per riparare i danni indotti dal sisma ed incrementare il livello di sicurezza degli edifici conformemente a quanto stabilito dalle Ordinanze post-sisma, OPCM 3779, 3790 e 3881 e relativi Indirizzi.

Tali dati sono stati ampiamente analizzati in (Di Ludovico et al. 2017a; Di Ludovico et al. 2017b, Del Vecchio et al. 2018) distinguendo il campione oltre che per tipologia costruttiva anche in funzione dell'esito di agibilità definito a seguito dei rilievi speditivi condotti in fase di emergenza. Analizzando il campione di 3992 edifici in esame in funzione dell'esito di agibilità, si evince che il 63% degli edifici (40% edifici in c.a. e 23% edifici in muratura) ha subito danni tali da renderli temporaneamente o parzialmente inagibili (esito B-C), mentre il restante 38% (23% edifici in c.a. e 15% edifici in muratura) ha subito danni più gravi ed è stato dichiarato inagibile (esito E).

Ai fini della sola richiesta di contributo, è bene sottolineare che gli edifici con esito E sono stati suddivisi, nel processo di ricostruzione, in 3 classi di ricostruzione (E-B, E, E_{dem}) in funzione della tipologia di intervento strutturale previsto e dell'entità del danno indotta dal sisma. In dettaglio la classe di ricostruzione E-B è relativa agli edifici per i quali sono stati progettati interventi di riparazione e rafforzamento locale in accordo a quanto specificato dall'O.P.C.M. n. 3779 e relativi Indirizzi; la classe di edifici con esito E è relativa agli edifici per i quali sono stati progettati interventi di riparazione e miglioramento sismico in accordo a quanto specificato dall'O.P.C.M. n. 3790 e relativi Indirizzi; la classe di edifici con esito E_{dem} è relativa agli edifici per i quali si è optato per la demolizione e ricostruzione in accordo a quanto previsto dall'O.P.C.M. n. 3881.

In Tabella 1 si riportano i costi medi di riparazione per unità di superficie, ARC, per gli edifici in c.a., muratura e totali (i.e. entrambe le tipologie) in funzione della classe di ricostruzione. I costi di riparazione, sono comprensivi degli oneri relativi alle spese tecniche ed al netto di IVA.

Si osservi che per gli edifici E_{dem} il costo di riparazione è relativo all'intero costo di

demolizione e ricostruzione dell'edificio valutato in accordo con la DGR n. 615 del 09/08/2010.

Su un ulteriore sotto-campione di 2243 edifici in c.a. oltre all'esito di agibilità e ai costi di riparazione dei danni indotti dal sisma, è stato possibile anche associare il danno rilevato mediante scheda AeDES a seguito dell'evento sismico alle componenti strutturali (strutture verticali, VS, strutture orizzontali, F, scale, S, coperture, R) e non strutturali (tamponature e tramezzi, IP). Questa ulteriore informazione ha consentito di analizzare il danno degli edifici non solo in termini di esito di agibilità, ma anche in termini di severità ed estensione del danno registrato a livello di ciascuna componente strutturale e non strutturale.

Tabella 1. Costi di riparazione, ARC, per tipologia costruttiva e classi di ricostruzione.

Classe di ricostruzione	Tipologia costruttiva	Nro di edifici	Costo di riparazione, ARC [€/mq]
B-C	c.a.	1598	183.8
	Muratura	899	216.8
	Totale	2497	195.7
E-B	c.a.	200	342.3
	Muratura	44	268.3
	Totale	244	329.0
E	c.a.	447	532.9
	Muratura	313	447.8
	Totale	760	497.9
Edem	c.a.	267	1213.4
	Muratura	224	1169.9
	Totale	491	1192.1

Nei paragrafi successivi si procede ad analizzare separatamente i due livelli di analisi del danno, ovvero mediante esito di agibilità o danno alle componenti strutturali e non strutturali, e ad associare i relativi costi di riparazione derivanti dai progetti allegati alle richieste di contributo per il campione di 2243 edifici in c.a.

E' evidente che l'analisi dei costi associati ad esiti di agibilità consente di avere una immediata proiezione, in caso di evento sismico, dei costi che la comunità deve affrontare una volta eseguite le verifiche di agibilità (ovvero nell'immediato post-sisma). Lo studio, inoltre, dei tempi connessi a ciascun esito di agibilità degli edifici per il rientro della popolazione residente nelle proprie abitazioni, attualmente in atto, può poi consentire di definire accanto alla predizione dei costi diretti anche la definizione di una parte (decisamente tra le più onerose) dei costi indiretti. Tuttavia, è bene osservare che in caso di scenario, la predizione delle perdite definite associando ad esiti di agibilità i relativi costi diretti ed indiretti deve

passare necessariamente attraverso l'utilizzo di curve di fragilità che correlino azione sismica ad esito di agibilità. In letteratura, però, tali curve sono decisamente meno analizzate di quanto non lo siano quelle relative al danno globale degli edifici.

L'analisi del danno globale degli edifici, DS, e dei costi ad esso associati, consente, invece, di pervenire in modo rapido ad una quantificazione delle perdite attraverso l'utilizzo di curve di fragilità disponibili in letteratura (meccaniche o empiriche) che comunemente definiscono per ciascun valore dell'azione sismica la probabilità di attingimento di un prefissato DS.

3 ESITO DI AGIBILITÀ vs. DANNO ECONOMICO

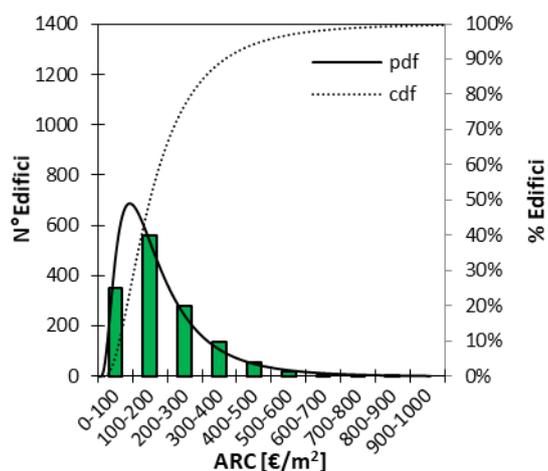
In questo paragrafo si procede con la valutazione dei valori dei costi di riparazione in funzione dell'esito di agibilità.

Il campione di 2243 edifici in c.a. è costituito da 1402 edifici con esito di agibilità B-C e 841 con esito di agibilità E (di cui 182 E-B, 421 E e 238 E_{dem} secondo la sotto-catalogazione legata al processo di ricostruzione).

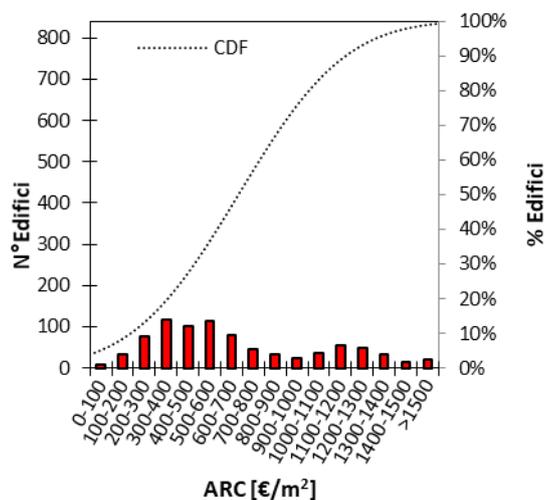
La distribuzione degli edifici con esito di agibilità B-C ed E in funzione dei costi di riparazione, ARC, raggruppati in intervalli costanti di 100€/m², è riportata, rispettivamente, in Figura 1a,b. Nei grafici di Figura 1 sono inoltre riportate le funzioni di densità di probabilità (PDF) che meglio approssimano la distribuzione dei dati e la funzione di distribuzione cumulata (CDF).

Dai grafici di Figura 1 si evince che la funzione log-normale approssima bene la distribuzione in frequenza dei costi di riparazione per il campione di edifici con esito B-C (Figura 1a), mentre per quanto riguarda gli 841 edifici con esito di agibilità E si riscontra una migliore interpretazione del dato empirico adottando la distribuzione bimodale, con valori massimi negli intervalli di costo 300-400 €/m² (118 edifici) e 1100-1200 €/m² (54 edifici) (Figura 1b). Ciò è chiaramente imputabile alla quota parte di edifici il cui danno era talmente diffuso che la riparazione con connesso rafforzamento sismico sarebbe risultato economicamente non conveniente; su tali edifici si è pertanto proceduto all'abbattimento ed alla ricostruzione secondo i parametri dell'edilizia popolare definiti dalla DGR n. 615 del 09/08/2010 che conducono ad un costo variabile in funzione delle caratteristiche dell'edificio ed in media circa pari a 1200 €/m².

Il costo mediano (medio) di riparazione risulta essere pari a 108 €/m² (183 €/m²) per gli edifici con esito B-C e 577 €/m² (685 €/m²) per gli edifici con esito E. In termini di CoV si ha 64% e 56% per gli edifici con esito B-C e con esito E, rispettivamente. Tali valori di costo sono stati normalizzati rispetto al costo di demolizione e ricostruzione, Cr, medio sul territorio nazionale, assunto pari a 1350 €/m² in accordo a quanto riportato in (Italian Civil Protection Department, 2018). Il rapporto tra ARC e Cr determina la percentuale del costo di ricostruzione, %Cr, impiegata per riparare i danni indotti dall'evento sismico.



a)



b)

Figura 1. Distribuzione degli edifici con esito di agibilità B-C (a) ed E (b) al variare del costo di riparazione, ARC.

In Tabella 2 sono riportati i parametri statistici espressi in termini di %Cr: 16° percentile, mediana e 84° percentile per gli edifici con esito di agibilità B-C ed E. Dalla Tabella 2 si evince che la perdita economica in termini di %Cr varia tra il 4% e il 15% con valore mediano pari all'8% per quanto riguarda gli edifici con esito di agibilità B-C. Variabilità maggiore si riscontra per gli edifici con esito di agibilità E per i quali risulta il 16°

percentile pari al 16% del Cr e l'84° percentile pari all'87% del Cr.

Tabella 2. Percentuale del costo di ricostruzione, %Cr, per esito di agibilità

% Costo di ricostruzione, %Cr			
Esito agibilità	16°percentile	Mediana	84°percentile
B-C	4%	8%	15%
E	24%	43%	87%

La maggiore variabilità della %Cr per gli edifici con esito di agibilità E è dettata per lo più dalle scelte effettuate in fase di ricostruzione in accordo alle ordinanze che la hanno regolata e che prevedevano per edifici con tale esito la possibilità di eseguire interventi di riparazione e rafforzamento locale (E-B), riparazione e miglioramento sismico con soglia di sicurezza al minimo pari al 60% (E), e demolizione e ricostruzione (E_{dem}). Pertanto, per tener conto di ciò e dell'impatto dei costi di riparazione nelle diverse categorie di intervento, i dati rappresentati in Figura 1b sono stati suddivisi nelle tre classi di ricostruzione, E-B, E ed E_{dem} e graficizzati nelle Figure 2a,b e c rispettivamente. I parametri statistici relativi alla %Cr in funzione della classe di ricostruzione sono riportati in Tabella 3.

Dai grafici relativi alle Figure 2 si evince che la funzione normale approssima bene la distribuzione in frequenza dei costi di riparazione indipendentemente dalla classe di ricostruzione. Il costo mediano (medio) di riparazione risulta essere pari a 342 €/m² (347 €/m²) per gli edifici E-B, 535 €/m² (532 €/m²) per gli edifici E 1205 €/m² per gli edifici E_{dem} (1213 €/m²). In termini di CoV si ha 42%, 35% e 17% per gli edifici con esito edifici E-B, E, ed E_{dem} rispettivamente. Come si può notare da tali valori, nel caso di edifici con danni severi alle strutture (i.e E o E_{dem}) il CoV è risultato inferiore al caso di edifici con danni leggeri (B-C o E-B). Tale dato può essere imputato alla variabilità dei costi relativi agli interventi di riparazione del danno su tramezzature e tamponature e sulle componenti non strutturali in genere (i.e. impianti, infissi, finiture, etc.). Per gli edifici B-C o E-B in c.a. risulta chiaro che tale esito di agibilità è risultato significativamente affetto dai danni alle parti non strutturali le quali, in funzione dell'entità e soprattutto dell'estensione del danno, possono indurre a costi di riparazione molto variabili. La definizione della %Cr associata a ciascun esito di agibilità (o classe di ricostruzione) è di fondamentale importanza nell'ottica di effettuare una stima delle perdite economiche relative ai costi diretti necessari a riparare i danni indotti dagli eventi sismici. A tal fine risulta necessario definire matrici di probabilità o curve di fragilità basate non sul

danno, bensì sull'esito di agibilità (Zucconi et al., 2018), o, obiettivo più complesso, sulle classi di ricostruzione. La correlazione tra parametro di intensità sismica e la probabilità che il campione di edifici residenziali superi un certo grado di inagibilità (o una certa classe di ricostruzione) per ogni valore dell'input sismico consente una stima delle perdite economiche associando a ciascun esito di agibilità (o classe di ricostruzione) il relativo valore di costo, ovvero la %Cr.

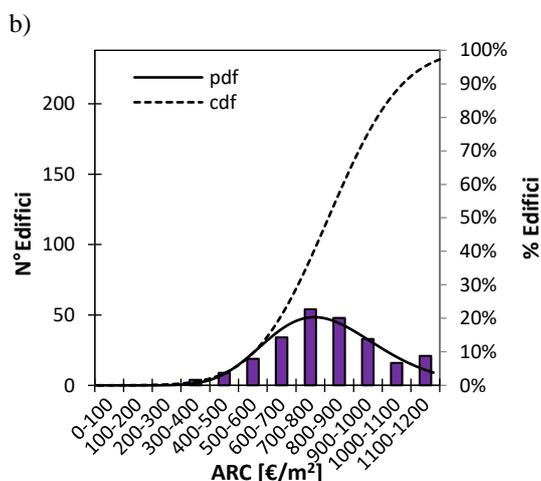
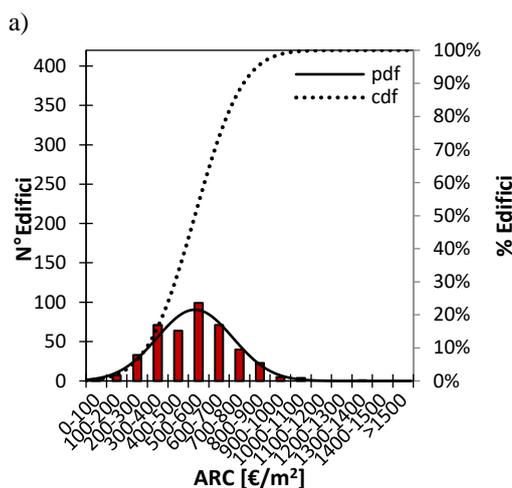
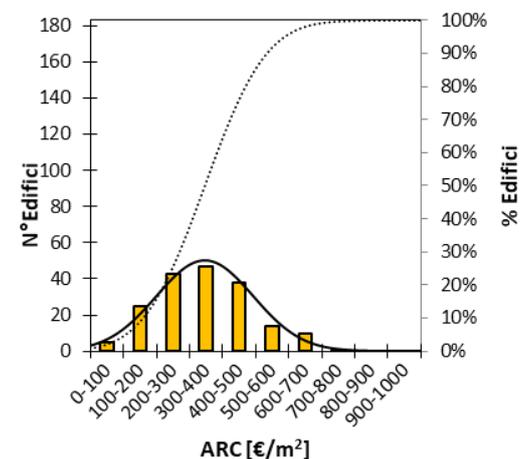


Figura 2. Distribuzione degli edifici per le classi di ricostruzione E-B (a), E (b) ed Edem (c) al variare del costo di riparazione, ARC.

Tabella 3. Percentuale del costo di ricostruzione, %Cr, in funzione della classe di ricostruzione.

Classi di ricostruzione	% Costo di ricostruzione, %Cr		
	16°percentile	Mediana	84°percentile
E-B	14%	26%	36%
E	25%	39%	53%
Edem	78%	88%	103%

E' bene sottolineare che ai fini di una completa definizione degli scenari di perdita è necessario definire anche funzioni di correlazione tra parametro sismico ed edifici con esito A e ad essi poi associare i relativi costi di riparazione. Seppur con danni limitatissimi, infatti, anche in questo caso risulta necessario provvedere ad alcune lavorazioni (quali ad esempio pitturazioni o ripristini di piccole parti di intonaco nei casi peggiori) che possano ripristinare danni molto contenuti ad elementi non strutturali ed impianti da realizzarsi entro un mese dall'inizio dei lavori, OPCM 3778. A tal fine un primo utile riferimento può essere desunto dalle indicazioni post sisma di L'Aquila 2009 in base alle quali era possibile ottenere un contributo per la riparazione in edifici con esito A nella misura di 10000€ per appartamento a cui poteva essere aggiunto l'ulteriore importo massimo di 2500€ per la copertura di spese relative alla riparazione di parti comuni degli edifici, OPCM 3778. Dunque, moltiplicando il costo massimo per appartamento per il numero medio di appartamenti che costituiscono un edificio in c.a. di L'Aquila (3.95 in accordo ai dati ISTAT 2011), aggiungendo il costo relativo alle parti comuni, e dividendo il totale ottenuto per la superficie coperta media degli edifici in c.a. di L'Aquila, pari a circa 401m², si ottiene un valore di 105 €/m², pari a circa il 7% in termini di %Cr. Considerando che non tutti gli appartamenti e parti comuni hanno usufruito di tale possibile contributo, è lecito associare ad un edificio con esito A, un %Cr variabile tra 0% - 7%.

Si osservi inoltre che utilizzare le curve di fragilità in termini di esito di agibilità consentirebbe di effettuare anche una valutazione dei costi indiretti relativi all'assistenza della popolazione che risulta essere sfollata a seguito di un evento sismico, una volta noti i tempi ed i relativi costi delle diverse forme di assistenza e le leggi di correlazione degli stessi con gli esiti di agibilità degli edifici. Indicazioni utili, sebbene preliminari, si possono trovare in tal senso nello studio condotto in Mannella et al, 2017.

L'analisi condotta in (Mannella et al, 2017) ha consentito, infatti, di conoscere il numero di persone sfollate a seguito dell'evento sismico di L'Aquila suddiviso per popolazione residente in

edifici con diverso esito di agibilità, nonché le forme di assistenza offerte alla popolazione (Hotel, Contributo Autonomia Sistemazione, CAS, affitto a canone controllato, MAP, progetto C.A.S.E.). Per ciascuna forma di assistenza è inoltre stato determinato il tempo di permanenza della popolazione. La valutazione dei relativi costi unitari (costo/giorno per persona) è, invece, attualmente oggetto di studio ed approfondimento; valutazioni specifiche e relative al comune di Barisciano sono riportate in Fico et al. 2019. Pertanto conoscere le leggi di correlazione tra numero di sfollati, tipologie di forme di assistenza, tempi di rientro della popolazione nelle proprie abitazioni e i costi relativi a ciascuna forma di assistenza potrebbe rivelarsi particolarmente utile in quanto consentirebbe, aspetto questo di particolare complessità, di effettuare una stima di una parte considerevole delle perdite associate ai costi indiretti per ciascun esito di agibilità. In questo modo si verrebbe certamente a scenari di perdite più aderenti al reale ammontare complessivo delle stesse.

4 STATO DI DANNO DEGLI EDIFICI, DS, vs. DANNO ECONOMICO

L'analisi del danno globale dell'edificio è stata effettuata sulla base dei dati raccolti nella sezione 4 della scheda AeDES. Tale sezione classifica il danno indotto dal terremoto sulle componenti strutturali (strutture verticali, VS, strutture orizzontali, F, scale, S, coperture, R) e non strutturali (tamponature e tramezzi, IP) in funzione della severità del danno (D0: nullo; D1: danno leggero; D2-D3: danno medio grave; D4-D5: danno gravissimo) e la relativa estensione (<1/3, 1/3-2/3, >2/3).

Per convertire il danno alle componenti strutturali e non strutturali in danno globale dell'edificio, coerentemente con l'approccio proposto in EMS'98 (Grunthal 1998), definito nel seguito DS, in letteratura sono presenti diversi approcci. Con riferimento a tre diversi approcci di letteratura, si è proceduto nel seguito alla analisi della correlazione tra DS e ARC, valutando in ogni caso per ciascun DS il valore mediano ed il 16° e 84° percentile di ARC. Gli approcci analizzati per la conversione in danno globale sono di seguito riportati:

- DS_I-approccio: è considerato solo il danno, alle strutture verticali (VS) in termini sia di estensione che di severità in accordo alla metrica di conversione riportata in (Dolce et al., 2019)

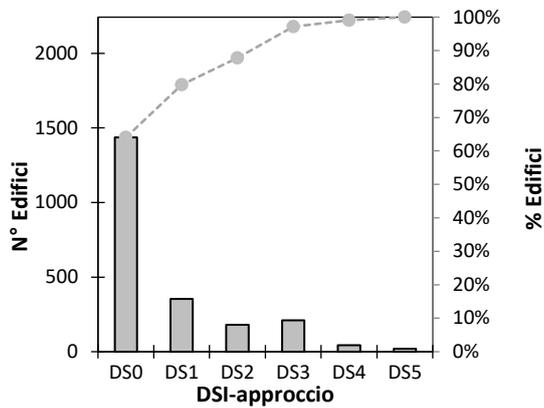
- DS_{II}-approccio: è considerata la massima severità del danno a strutture verticali, solai e coperture (VS, F and R) (Rota et al., 2008)
- DS_{III}-approccio: è considerata la massima severità del danno, DS, tra quello ottenuto dalla metrica di conversione riportata in (Del Gaudio et al., 2017) per VS e IP.

Nelle Figure 3a,b e c si riportano le distribuzioni del numero di edifici al variare dei DS definiti rispettivamente mediante il I, il II e il III approccio.

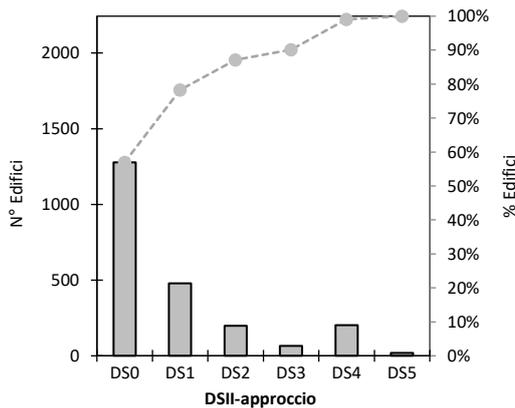
I grafici mostrano che la distribuzione del numero di edifici ha andamento decrescente al crescere del livello di danneggiamento per il I (Figura 3a) e il II approccio (Figura 3b) con una percentuale di edifici con danno nullo, DS0, superiore al 55%. Ciò indica chiaramente che la conversione proposta, per lo più basata sul danno alle strutture, induce ad una sottostima del danno empirico globale, e conseguentemente delle perdite economiche, considerando che il campione in esame è costituito da 63% edifici con esito B-C e 37% edifici con esito E. Se si tiene conto anche del danno alle componenti non strutturali (DS_{III}-approccio) la distribuzione dei DS cambia significativamente presentando un andamento crescente fino a DS2, con un picco di 756 edifici, e poi decrescente (Figura 3c). La distribuzione del numero di edifici per DS_{III}-approccio in funzione dell'esito di agibilità è riportata in Figura 4. Il grafico mostra che gli edifici con esito di agibilità B-C presentano un livello di danneggiamento variabile tra DS0 e DS3, con un picco di 631 edifici con danno DS1; mentre gli edifici con esito E presentano danni maggiori, con una maggiore frequenza nella classe DS3 (395).

Inoltre si osserva che i valori mediani in funzione dei DS sono simili per il I e II approccio fino al DS2, per livelli di danno DS3 e DS4, invece, si riscontrano valori simili per il II e III approccio. Il costo mediano di riparazione risulta essere circa uguale nei tre approcci per il DS5. Un'elevata differenza si riscontra con la mediana dei costi ARC dei DS inferiori a DS3 valutati mediante il III approccio. In dettaglio, la Figura 4d mostra che la mediana dei costi ARC per DS0 è pari a 187 €/m² (I approccio) e 184 €/m² (II approccio) mentre risulta pari a 107 €/m² per l'approccio III.

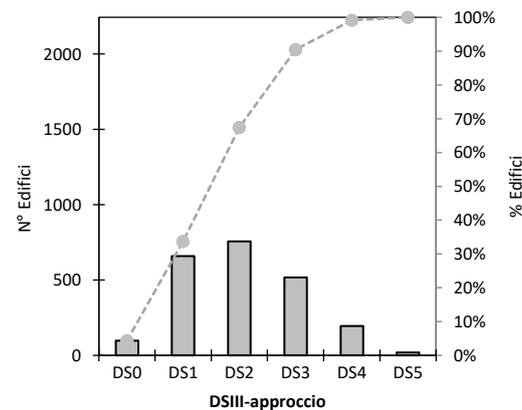
Le Figure 5a,b mostrano un'elevata variabilità dei costi ARC tra il 16° e l'84° percentile per gli livelli di danno DS0, DS1 e DS2 valutati con il I-II approccio. Tale variabilità si riduce significativamente nel caso del III approccio.



a)



b)



c)

Figura 3. Distribuzione del numero di edifici in funzione dei DS_I-approccio (a) DS_{II}-approccio (b) e DS_{III}-approccio (c)

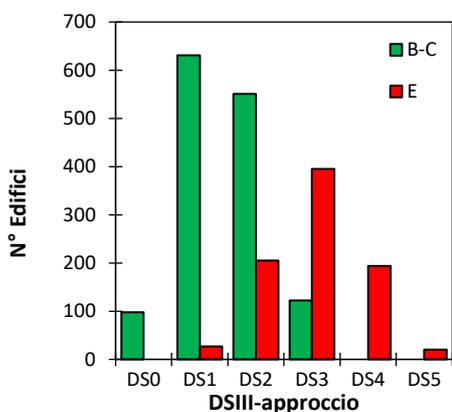


Figura 4. Distribuzione del numero di edifici in funzione dei DS_{III}-approccio per edificio con esito di agibilità B-C ed E.

Ciò conferma quanto riportato in Del Vecchio et al 2018, ovvero che il danno agli elementi tamponature/tramezzature (IP) influenza fortemente i costi di riparazione degli edifici ed è un fattore chiave nelle analisi di stima delle perdite. Si noti che anche adottando l'approccio III, si ha tuttavia, una elevata dispersione per i DS più elevati (DS3, DS4, e DS5).

La dispersione per tali DS mostra che altri parametri come l'estensione del danno su ciascuna componente strutturale e/o non strutturale e il peso del danno su un singolo componente sui costi di riparazione totali dell'edificio possono anche influenzare fortemente l'entità dei fondi necessari per le riparazioni. In altre parole, le matrici di conversione adottate per la definizione del danno globale e del relativo costo potrebbero risultare non idonee per una corretta stima delle perdite in quanto prettamente connesse alla sola severità del danno massimo riscontrato.

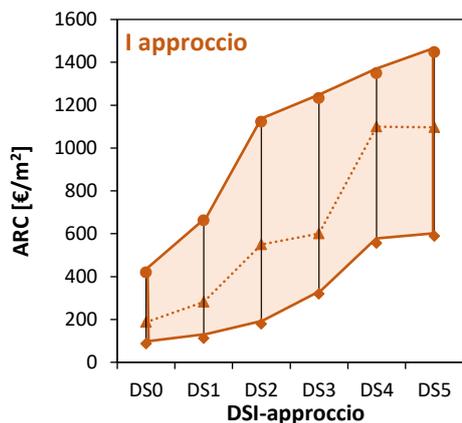
I valori di mediana, 16° e 84° percentile espressi come percentuale del costo di ricostruzione, %Cr, per ciascun DS_{III}-approccio, sono riportati in Tabella 4.

Particolare attenzione va posta nei riguardi dei valori di %Cr riferiti ai DS più bassi, in particolare DS0 e DS1. E' bene ricordare infatti che i valori di %Cr sono stati valutati sul campione di edifici residenziali con esito B-C ed E per cui è stata presentata e approvata la richiesta di contributo, pertanto non rappresentativo dell'intero campione di edifici del territorio colpito dall'evento sismico (non sono stati presi in considerazione gli edifici con esito A o che non hanno richiesto il contributo sebbene investiti da azioni sismiche basse). Tenendo conto di tali aspetti, i valori mediani di %Cr da adottare in scenari di perdite potrebbero subire significative riduzioni.

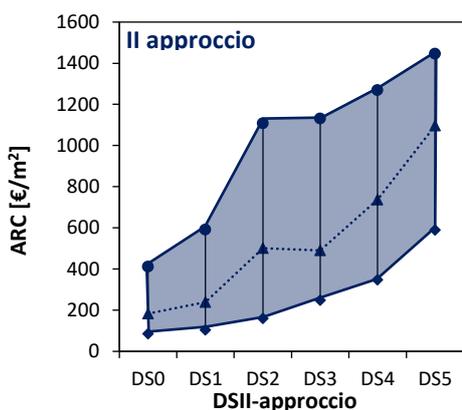
A tal fine è necessario prendere in considerazione la totalità degli edifici residenziali in c.a. di L'Aquila per i quali è stata redatta la scheda AeDES (5546 edifici) e non solo il sottocampione di 2243 edifici, oggetto del presente lavoro, per i quali oltre al danno sono noti anche i costi di riparazione dai computi metrici.

Assumendo che tutti gli edifici in c.a. siano ubicati al di fuori dei centri storici, il rapporto, per ciascun DS, tra il numero di edifici del sottocampione di 2243 edifici e la totalità di edifici in c.a. (5546 edifici con scheda AeDES) fornisce un coefficiente η minore di 1. Il complemento ad 1 di η rappresenta la quota parte di edifici con danno globale DS0 o DS1 per i quali non è stata fatta richiesta di contributo o che hanno ricevuto contributo massimo in linea con gli edifici con esito A (range 0 -7%Cr). Tali analisi, attualmente

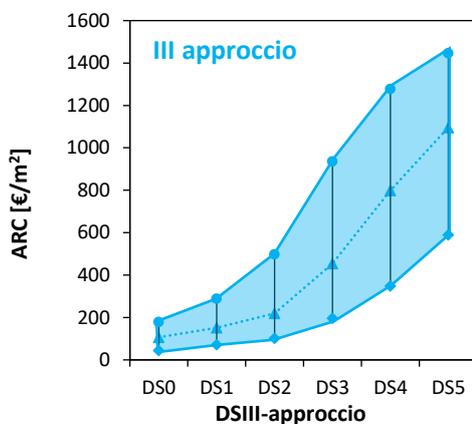
in elaborazione, sono necessarie per meglio calibrare i valori di %Cr da associare a DS0 e DS1



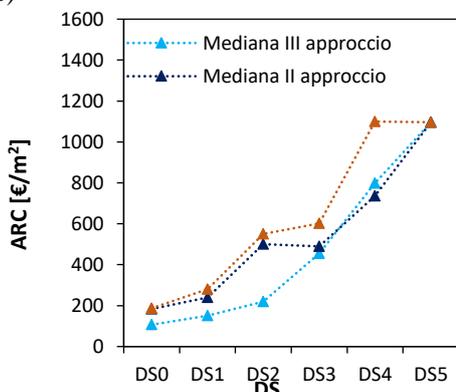
a)



b)



c)



d)

Figura 5. Costi di riparazione, ARC, in funzione dei DS_I-approccio (a) DS_{II}-approccio (b) e DS_{III}-approccio (c)

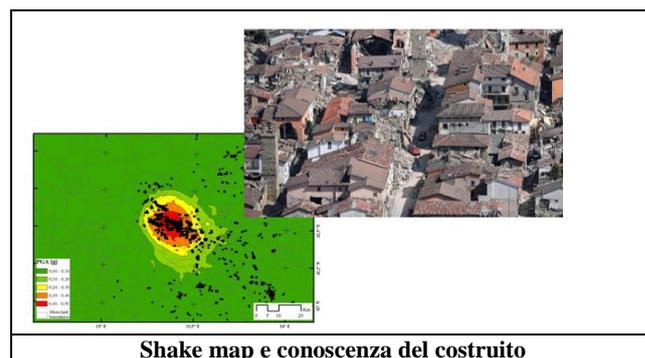
Tabella 4. Percentuale del costo di ricostruzione, %Cr, in funzione dei DS_{III}-approccio.

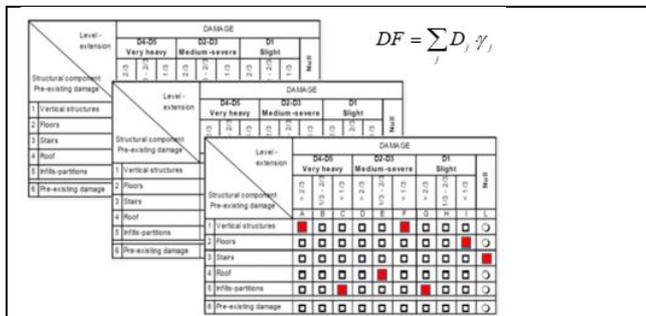
Danno DS	% Costo di ricostruzione, %Cr		
	16°percentile	Mediana	84°percentile
DS0	3%	8%	13%
DS1	5%	11%	21%
DS2	8%	16%	37%
DS3	15%	34%	69%
DS4	26%	59%	95%
DS5	44%	81%	107%

5 CURVE DI FRAGILITA' INPUT SISMICO – COSTI DI RIPARAZIONE

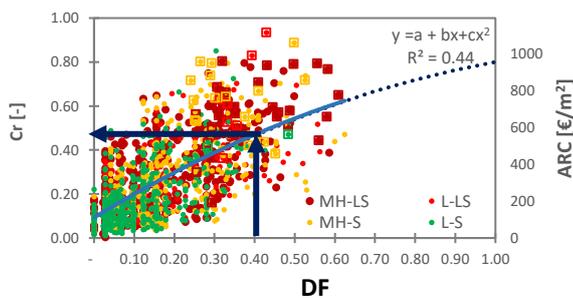
Quanto riportato al paragrafo precedente in termini di %Cr associata a ciascun livello di danno può consentire una stima delle perdite economiche passando attraverso l'utilizzo di curve di fragilità che mettano in relazione l'input sismico con la probabilità di attingimento di un determinato DS (ad esempio, adottando le curve di fragilità implementate nella piattaforma IRMA ((Borzi et al. 2018, <http://irma.eucentre.it/irma/web/home>).

In alternativa si potrebbero definire curve di fragilità in termini di costi. Occorre a tal fine, tuttavia, definire livelli di %Cr da associare ad edifici che hanno subito determinato input sismico. Per avere valori di %Cr continui e non discreti e per tenere in conto in tale analisi anche gli edifici con esito A, è possibile perseguire tale obiettivo mediante l'utilizzo delle leggi analitiche determinate in De Martino et al 2017. In tale lavoro, infatti, si definisce un nuovo parametro di danno globale, DF, che è stato opportunamente calibrato per tenere in debito conto la diffusione del danno e il peso di quest'ultimo in termini di costi di riparazione in funzione della componente danneggiata. Sulla base dei dati di costo di riparazione è stata definita una legge di correlazione DF-ARC (o analogamente DF-%Cr) che consente di avere valori continui di ARC (%Cr) al variare del danno empirico. Il processo logico sopradescritto è riportato in forma sintetica in Figura 6.

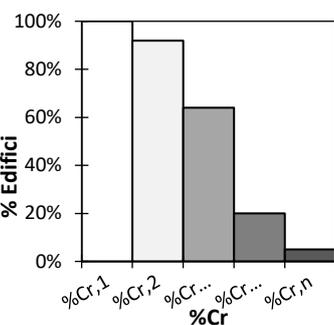




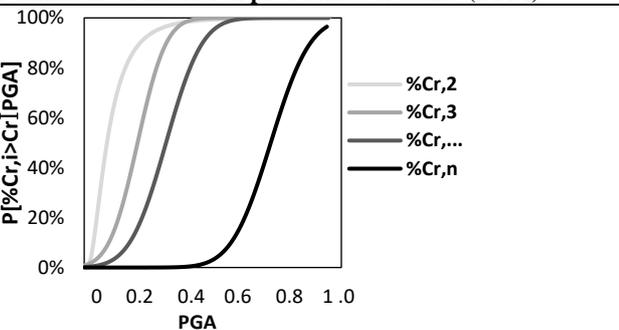
Analisi del danno mediante scheda AeDES sull'i-esimo edificio e valutazione del DF per l'i-esimo edificio (De Martino et al. 2017)



Utilizzo di relazioni DF-ARC (o DF-%Cr) per l'i-esimo edificio (De Martino et al. 2017)



Definizione di matrici di probabilità di danno (DPM)



Curve di fragilità per la definizione della probabilità di superare un certo valore del costo di ricostruzione, %Cr, per ciascun intervallo di input sismico

Figura 6. Metodologia per la definizione di curve di fragilità empiriche in termini di costi.

La messa a punto attraverso il processo illustrato in Figura 6 di specifiche curve di fragilità che mettano in relazione direttamente l'input sismico con il costo di riparazione può indurre, rispetto agli approcci precedentemente illustrati, diversi vantaggi quali: i) in caso di scenario non è necessario definire curve di fragilità che mettano in relazione input sismico ed esito di agibilità; ii) nel caso in cui si abbiano a disposizione gli esiti di

agibilità (prima fase post-sisma) il metodo adottato consente di superare le difficoltà connesse alla definizione di sottocategorie associate ad edifici con esito E; iii) rispetto all'adozione di curve di fragilità per diversi DS a cui sono associati opportune %Cr, il metodo in esame fa riferimento ad un parametro (DF) specificatamente messo a punto per pesare l'impatto economico del danno a tutte le componenti strutturali e non strutturali sia in termini di severità che di estensione; iv) rispetto all'adozione di curve di fragilità per diversi DS (tipicamente definiti come 5 valori, in accordo a 5 stati di danno così come definiti nelle EMS'98, Grunthal 1998), il metodo in esame può consentire la definizione di un numero di curve molto maggiore e per piccoli intervalli di %Cr.

6 CONCLUSIONI

Nella presente memoria, sulla base dei dati relativi alla ricostruzione di un campione di 2243 edifici residenziali in cemento armato, c.a., danneggiati dal sisma che ha colpito L'Aquila nel 2009, sono state fornite indicazioni utili alla definizione delle perdite economiche connesse ad un evento sismico. Dopo aver introdotto lo stato della conoscenza attuale della ricostruzione post sisma, la memoria ha focalizzato l'attenzione sui costi diretti intesi come costi di riparazione analizzati in relazione all'esito di agibilità o a diversi livelli di danno definiti in funzione di tre differenti approcci di conversione tra danno empirico rilevato sulle componenti strutturali e non strutturali degli edifici e danno globale, DS.

Per quanto concerne l'analisi del campione in termini di esito di agibilità- costi è emerso che:

- il campione di 2243 edifici in c.a. è costituito da 1402 edifici con esito di agibilità B-C e 841 con esito di agibilità E (di cui 182 E-B, 421 E e 238 E_{dem} secondo la sotto-catalogazione legata al processo di ricostruzione);
- il valore mediano della percentuale del costo di ricostruzione, %Cr, è risultato pari all'8% per gli edifici con esito B-C e 43% per gli edifici con esito E;
- il CoV per gli edifici con esito di agibilità B-C è risultato maggiore rispetto a quello degli edifici inagibili;
- suddividendo il campione di edifici inagibili in funzione delle classi di ricostruzione il valore mediano della %Cr è risultato pari al 26% per gli edifici E-B, 39% per gli edifici E e 88% per gli edifici E_{dem};

- per la definizione degli scenari di perdita è necessario definire anche funzioni di correlazione tra parametro sismico ed edifici con esito A; una valutazione preliminare porta ad assegnare ad un edificio con esito A, un %Cr variabile tra 0% - 7%;
- la stima delle perdite in termini di esito di agibilità consente di associare oltre ai costi diretti (costi di riparazione), anche i costi indiretti, una volta noti i flussi temporali di rientro della popolazione residente in edifici con diverso esito di agibilità ed i costi relativi alle diverse forme di assistenza.

Per quanto concerne l'analisi in termini di stato di danno, DS, degli edifici in relazione ai costi è emerso che:

- L'approccio di conversione tra danno empirico e danno globale dell'edificio è quello che tiene conto in maniera esplicita non solo del massimo danno alle componenti strutturali ma anche alle componenti non strutturali (tamponature/tramezzature) che influenzano fortemente i costi di riparazione;
- in accordo con tale approccio (Approccio III), il valore mediano della %Cr ha un andamento crescente al crescere della severità del DS e pari a 8% per DS0, 11% per DS1, 16% per DS2, 34% per DS3, 59% per DS4 e 81% per DS5;
- è necessario introdurre un coefficiente riduttivo per meglio calibrare i valori di %Cr da associare ai DS0 e DS1 per tener conto anche degli edifici con esito A o che non hanno richiesto il contributo (ovvero gli edifici che non sono inclusi nel campione di 2243 edifici in esame).
- la %Cr associata a ciascun livello di danno consente una stima delle perdite economiche passando attraverso l'utilizzo di curve di fragilità che mettano in relazione l'input sismico con la probabilità di attingimento di un determinato DS

Infine, sulla base delle analisi presentate è stata approntata una metodologia per la definizione di curve di fragilità che mettano direttamente in relazione l'input sismico con le perdite in termini di costi di riparazione.

BIBLIOGRAFIA

- Benson, Charlotte; Clay, Edward J., 2004. Understanding the Economic and Financial Impacts of Natural Disasters. Disaster Risk Management series; **4**. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/15025> License: CC BY 3.0 IGO.”
- 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). *37° Conferenza Nazionale GNGTS*. 19-21 Novembre, Bologna, Italia.
- Braga, F., Dolce, M., Liberatore, D., 1982. A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuing Review of the MSK-76 Scale. *Seventh European Conference on Earthquake Engineering*. September 20-25, Athens, Greece, 431-450.
- Calvi G.M., 1999. A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, **3**(03), 411-438.
- Cosenza E., Manfredi G., Polese M., Verderame G.M., 2005. A multi-level approach to the capacity assessment of existing RC buildings. *Journal of Earthquake Engineering* **9**(1), 1-22
- Crowley H., Pinho R., Bommer J.J., 2004. A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **2**(2), 173-219.
- D'Ayala, D., & Speranza, E., 2003. Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. *Earthquake Spectra*, **19**(3), 479-509.
- 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.
- Del Gaudio, C., De Martino G., Di Ludovico M., Manfredi G., Prota A., Ricci P., and Verderame G. M., 2017. Empirical fragility curves from damage data on RC buildings after the 2009 L'Aquila earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**(4), 1425-1450
- Del Gaudio, C., De Martino G., Di Ludovico M., Manfredi G., Prota A., Ricci P., and Verderame G. M. 2019. Empirical fragility curves for masonry buildings after the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering* doi: 10.1007/s10518-019-00683-4
- Del Vecchio C., Di Ludovico M., Pampanin S., Prota A., 2018. Repair costs of existing RC buildings damaged by the L'Aquila earthquake and comparison with FEMA P-58 predictions. *Earthquake Spectra*, **34**(1), 237-263.
- Delibera della Giunta Regionale n. 615 del 09/08/2010. Aggiornamento dei limiti di costo per gli interventi di edilizia residenziale sovvenzionata e agevolata “Determinazioni regionali”.
- De Martino, G., Di Ludovico M., Prota A., Moroni C., Manfredi G., Dolce M., 2017. Estimation of repair costs for RC and masonry by post-earthquake visual inspection. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**, 1681-1706.
- Di Ludovico, M., Prota A., Moroni C., Manfredi G., and Dolce M., 2017a. Reconstruction process of damaged residential buildings outside the historical centres after

- L'Aquila earthquake - part I: "light damage" reconstruction. *Bulletin of Earthquake Engineering* **15**, 667–692.
- Di Ludovico, M., Prota A., Moroni C., Manfredi G., and Dolce M., 2017b. Reconstruction process of damaged residential buildings outside the historical centres after L'Aquila earthquake - part II: "heavy damage" reconstruction. *Bulletin of Earthquake Engineering* **15**, 693–729.
- Dolce M., Speranza E., Bocchi F., Conte C., Giordano F., Borzi B., Faravelli M., Di Meo A., Pascale V., 2019. Observed damage database of past Italian earthquakes: the Da.D.O. WebGIS. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **60**(2), 141-164.
- Erberik, M. A., 2008. Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37**(3), 387-405.
- Fico R., Sabino A., Pipponzi G., di Pompeo I., Marra A., De Marino G., Mannella A., Di Ludovico M., Speranza E., Prota A., Dolce M., 2019. La gestione dell'emergenza e il processo di ricostruzione nei centri minori: il caso di Barisciano. *XVIII convegno ANIDIS L'Ingegneria sismica in Italia*, 15 - 19 Settembre, Ascoli Piceno, Italia.
- Grunthal, G., 1998. European Macroseismic Scale, *Chaiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **15** Luxembourg.
- Iervolino I., Manfredi G., Polese M., Verderame G.M., Fabbrocino G., 2007. Seismic risk of R.C. building classes. *Eng Struct* **29**(5), 813–820
- Indirizzi del 17 luglio 2009 per l'esecuzione degli interventi di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3779 del 6 giugno 2009.
- Indirizzi del 26 agosto 2009 per l'esecuzione degli interventi di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3790 del 9 luglio 2009.
- ISTAT 2011, Edifici ed abitazioni Censimento 2011. Rilasciato da ISTAT il 9 Ottobre 2011
- Italian Civil Protection Department, National risk assessment. Overview of the potential major disasters in Italy: seismic, volcanic, tsunamis, hydro-geological/hydraulic and extreme weather, droughts and forest fire risks, updated December 2018
- Lagamarsino G. and Giovinazzi S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **4**, 415–443
- Mannella A., Di Ludovico M., Sabino A., Prota A., Dolce M., Manfredi G., 2017. Analysis of the population assistance and returning home in the reconstruction process of the 2009 L'Aquila earthquake, *Sustainability*, **9** (8), 1395.
- O.P.C.M. n. 3778 del 6 giugno 2009. Ulteriori interventi urgenti diretti a fronteggiare gli eventi sismici verificatisi nella regione Abruzzo il giorno 6 aprile 2009 e altre disposizioni urgenti di protezione civile.
- O.P.C.M. n. 3779 del 6 giugno 2009. Ulteriori interventi urgenti diretti a fronteggiare gli eventi sismici verificatisi nella regione Abruzzo il giorno 6 aprile 2009 e altre disposizioni urgenti di protezione civile.
- O.P.C.M. n. 3790 del 9 luglio 2009 Ulteriori interventi urgenti diretti a fronteggiare gli eventi sismici verificatisi nella regione Abruzzo il giorno 6 aprile 2009 e altre disposizioni urgenti di protezione civile.
- O.P.C.M. n. 3881 del 11 giugno 2010 Ulteriori interventi urgenti diretti a fronteggiare gli eventi sismici verificatisi nella regione Abruzzo il giorno 6 aprile 2009 e altre disposizioni urgenti di protezione civile.
- Polese, M., Verderame, G. M., Mariniello, C., Iervolino, I., & Manfredi, G., 2008. Vulnerability analysis for gravity load designed RC buildings in Naples–Italy. *Journal of Earthquake Engineering*, **12**(S2), 234-245.
- 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
- Rota M., Penna A., and 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., & Magenes, G., 2010. A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic nonlinear analyses. *Engineering Structures*, **32**(5), 1312-1323.
- Sabetta F., Goretta A., Lucantoni A., 1998. Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion. *11th European Conference on earthquake Engineering*, September 6-11, Paris, France.
- Silva V., Pagani M., Schneider J., Henshaw P., 2019. Assessing Seismic Hazard and Risk Globally for an Earthquake Resilient World. Global Earthquake Model Foundation (GEM), <https://www.globalquakemodel.org/>.
- Zuccaro G., 2004. Progetto SAVE – Task1: inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio-economiche. INGV/GNDT.
- 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.
- Zucconi M., Ferlito R., Sorrentino L., 2018. Simplified survey form of unreinforced masonry buildings calibrated on data from the 2009 L'Aquila earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(7), 2877-2911.