



Il ruolo dell'estensione del danno nella stima delle perdite economiche dirette di edifici esistenti in c.a.

Vincenzo Manfredi ^a, Angelo Masi ^a, Giuseppe Nicodemo ^a, Andrea Digrisolo ^a, Giuseppe Santarsiero ^a, Giuseppe Ventura ^a

^a Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, Potenza, Italia

Keywords: estensione del danno, edifici esistenti in c.a., analisi dinamiche non lineari, perdite economiche

Modelli affidabili per la stima delle perdite attese a causa di eventi sismici sono strumenti fondamentali sia in fase di gestione dell'emergenza che per la mitigazione del rischio sismico. Tali modelli sono in genere correlazioni tra il massimo danno fisico causato dallo scuotimento sismico e le conseguenze attese, ad esempio in termini di costo di riparazione/ricostruzione (perdite economiche dirette) o vittime/feriti (effetti sulle persone). Nel presente lavoro viene innanzitutto riportata una ricognizione di alcuni modelli di perdite disponibili nella letteratura, particolarmente rilevanti per il patrimonio edilizio italiano. Successivamente, viene proposto un modello per la stima delle perdite economiche dirette che porta in conto sia la severità sia l'estensione del danno, dove le distribuzioni di danno atteso lungo tutto l'edificio sono determinate mediante analisi dinamiche non lineari. Il modello proposto è stato applicato ad un edificio prototipo rappresentativo delle tipologie edilizie in cemento armato di media altezza progettate solo per carichi verticali, la cui risposta sismica è stata calcolata considerando diversi set di accelerogrammi.

1 INTRODUZIONE

I risultati delle analisi di rischio di un'area sono espressi in termini di conseguenze (o perdite) sulle cose e sulle persone a seguito degli eventi sismici attesi in un intervallo di tempo. Le conseguenze sono intese, ad esempio, come numero di feriti o vittime (conseguenze sulle persone), numero di sfollati e senzatetto (conseguenze sociali), costi (diretti) per la riparazione/ricostruzione e costi (indiretti) per inutilizzo/inattività (perdite economiche). La corretta stima di tali valori è pertanto di fondamentale importanza per la pianificazione di sostenibili politiche di mitigazione del rischio e per l'efficace gestione dell'emergenza post-sisma.

Le perdite economiche, in particolare, sono diventate nel tempo uno dei parametri chiave per la definizione delle prestazioni attese da una costruzione in caso di eventi sismici (Miranda and Aslani, 2003). In tal senso, i moderni approcci (e.g. Performance-Based Engineering Earthquake, PBEE) (Porter, 2003; Haselton et al.,

2008; ATC 58, 2018) mirano a fornire la frequenza annua delle perdite come variabile decisionale in forza del quale definire il livello di prestazione da raggiungere. Similmente, in Italia le classi di rischio sismico delle costruzioni, finalizzate alle agevolazioni fiscali per i lavori di rafforzamento sismico, sono funzione delle perdite economiche annue attese a seguito di terremoti (PAM), oltre che ad un parametro che porta in conto la sicurezza strutturale finalizzata alla salvaguardia della vita (IS-V) (Calvi, 2013; D.M. 28/2/2017).

In genere, i modelli disponibili in letteratura per la previsione delle perdite sono funzioni che correlano il danno fisico atteso/osservato sulle costruzioni a seguito di sisma con le conseguenze. Come meglio descritto nel seguito, in tali modelli, il danno è generalmente inteso in termini macrosismici (es. EMS-98, Grünthal, 1998) riferito al livello massimo osservato sull'intero edificio, mentre le perdite sono valutate essenzialmente sulla base delle informazioni derivanti dagli eventi sismici reali (e.g. Del Vecchio et al., 2018).

Nella presente memoria sono innanzitutto esaminati i principali modelli per la previsione delle conseguenze sulle persone, sociali (inagibilità) e delle perdite economiche. Successivamente, con riferimento alle strutture in c.a. (sebbene il modello possa essere esteso anche ad altre tipologie), si descrive un modello per le perdite economiche dirette che porta in conto oltre al danno massimo atteso anche l'estensione degli altri livelli di danno ai diversi piani in elevazione. In tale ambito, la stima e la distribuzione del danno viene valutata attraverso analisi dinamiche non lineari, sebbene altre fonti (es. empirico/osservazionale) o metodi di analisi numerici possono essere utilizzate. Il modello proposto è stato infine applicato con riferimento ad una tipologia ricorrente di edificio esistente anni '70 in c.a. progettato per soli carichi verticali.

2 MODELLI DI PERDITE DISPONIBILI IN LETTERATURA

Nel presente paragrafo vengono sinteticamente descritti alcuni dei modelli per il calcolo delle perdite disponibili nella letteratura tecnica. In particolare, vengono riportati modelli per il calcolo delle conseguenze sulle persone, delle inagibilità e delle perdite economiche dirette relative al patrimonio edilizio italiano.

2.1 *Conseguenze sulle persone*

La valutazione delle conseguenze sulle persone rappresenta sicuramente uno dei problemi più complessi nella valutazione dell'impatto di un terremoto. Il numero di morti e feriti può variare significativamente tra terremoti di caratteristiche simili a causa dei numerosi fattori. La valutazione degli effetti sulle persone è sicuramente correlata al danno strutturale e non strutturale ma è necessario portare in conto anche altri fattori, quali la tipologia edilizia, la presenza di occupanti nelle diverse ore del giorno e stagioni dell'anno, l'efficacia delle operazioni di recupero, etc. In letteratura, sono stati proposti diversi modelli per la valutazione delle conseguenze sulle persone. Una delle prime proposte è quella di Coburn and Spence (1992; 2002) che stima il numero di morti o feriti in funzione di numerosi parametri (e.g. tipologia edilizia, tempi di soccorso, etc) con riferimento al solo livello di danno Ld5 (secondo la scala EMS-98, Grünthal, 1998). Un modello per il contesto italiano è stato sviluppato da Zuccaro and Cacace (2011). La percentuale di morti e feriti è valutata

come funzione del danno subito dall'edificio (considerando i livelli Ld4 e Ld5) e della tipologia edilizia. Nel report "National Risk Assessment" redatto dal Dipartimento di Protezione Civile (DPC, 2018), la probabilità di feriti o morti tra gli occupanti dell'edificio è valutata solo in funzione dei livelli di danno (Ld4 e Ld5), trascurando la tipologia edilizia.

2.2 *Inagibilità*

Un'ulteriore misura dell'impatto di un terremoto su una comunità è il numero di edifici inagibili. Queste quantità sono fondamentali per stimare i costi relativi alle soluzioni di ricovero temporaneo e rappresentano un fattore importante sull'impatto sociale. In tale ambito, secondo Lucantoni et al. (2001) sono considerati inagibili gli edifici con livello di danno 4 (e 5) e il 40% di quelli con danno 3.

A partire dall'approccio sviluppato da Di Pasquale e Goretti (2001), Masi et al. (2006) hanno proposto un modello per la stima del numero di edifici inagibili funzione del livello di danno (Ld) e della classe di vulnerabilità (per la classi C e D, le percentuali sono funzione anche della tipologia edilizia). Ad esempio, per la classe di vulnerabilità A, il numero di edifici inagibili è stimato come la somma delle seguenti percentuali: 10% per Ld=1, 30% per Ld = 2, 82% per Ld = 3 e 100% per Ld = 4 e 5.

Zuccaro and Cacace (2011) hanno proposto delle percentuali per gli edifici definiti "unsafe" funzione del solo livello di danno: 2% per Ld=0, 5% per Ld=1, 10% per Ld=2, 50% per Ld=3 e 100% per Ld=4-5.

Nel report "National Risk Assessment" (DPC, 2018), il numero di edifici inagibili è suddiviso in due sottocategorie: gli edifici inagibili nel breve periodo a causa di danni leggeri o moderati (40% per Ld=2; 40% per Ld=3), e gli edifici inagibili nel lungo termine a causa di danni più gravi (60% per Ld=3; 100% per Ld=4 e Ld=5).

2.3 *Perdite economiche dirette*

La maggior parte dei modelli per la valutazione delle perdite economiche dirette correla il livello di danno fisico degli edifici al *costo di riparazione*, definito come percentuale rispetto al costo di ricostruzione. Tale valore, definito anche *rapporto di costo*, può essere inteso come riduzione del valore dell'edificio a causa del danno prodotto dal sisma. Il modello descritto in Dolce et al. (2006) combina la probabilità di osservare i diversi livelli di danno

attraverso le Matrici di Probabilità di Danno (DPM, Dolce et al., 2003) con la probabilità del rapporto di costo ($C_{r,r}$) ad essi condizionata, secondo l'espressione 1:

$$\text{Prob}[C_{r,r} | I] = \sum_{Ld=1}^5 \sum_{V=A}^D \text{Prob}_{Ld}[C_{r,r} | Ld] \cdot \text{Prob}_V[Ld | V, I] \quad (1)$$

Il rapporto di costo $C_{r,r}$ deriva dal modello di Masi et al. (2002), calibrato sulla base dei dati raccolti a seguito dei terremoti Umbria-Marche 1997 e Pollino 1998 (Di Pasquale et al., 1998; Di Pasquale e Goretti, 2001).

Figura 1 riporta la funzione di densità cumulativa (CDF) dei valori $C_{r,r}$, funzione dei livelli di danno.

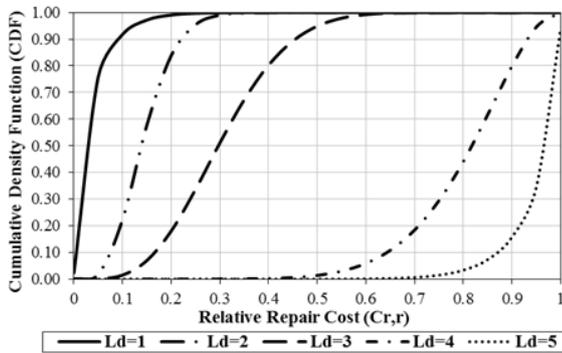


Figura 1. Funzione di densità cumulativa (CDF) di $C_{r,r}$ per i diversi livelli di danno

Nel report “National Risk Assessment” (DPC, 2018), le perdite economiche dirette sono valutate sulla base di parametri di perdita correlati alla riparazione del danno. Le perdite attese sono funzione del livello di danno e del costo di riparazione ad esso corrispondente, secondo l'espressione seguente:

$$L = CU \left(\sum_{j=1}^{np} \sum_{k=1}^5 A_{M,j} p_{M,k} c_k + \sum_{j=1}^{np} \sum_{k=1}^5 A_{RC,j} p_{RC,k} c_k \right) \quad (2)$$

dove:

- np è il numero di piani o classi di piano;
- CU è il costo di ricostruzione dell'edificio (Euro/m²) che include spese tecniche e IVA;
- $A_{M/RC,j}$ è l'area relativa alla tipologia edilizia (muratura “M” o cemento armato “RC”) con numero di piani pari a “j”;
- $p_{M/RC,k}$ è la probabilità di danno relativa alla tipologia edilizia (M o RC) che ha subito un livello di danno pari a “k”;

- c_k è la percentuale del costo di riparazione (rispetto a CU) per ogni livello di danno “k”, secondo la Tabella 1.

Le percentuali del costo di riparazione sono state calibrate sui dati derivanti dai recenti terremoti italiani (Dolce and Manfredi, 2015; Dolce and Goretti, 2015; Di Ludovico et al. 2017a, b).

Tabella 1. Percentuali del costo di riparazione adottate in “National Risk Assessment” (DPC, 2018)

CU [Euro/m ²]	c_k [%]	Ld1	Ld2	Ld3	Ld4	Ld5
1350	Min	2	10	30	60	100
	Max	5	20	45	80	100

3 PROPOSTA DI UN NUOVO MODELLO DI PERDITE ECONOMICHE

Come illustrato in precedenza, i modelli per la previsione delle perdite economiche dirette sono funzione del livello di danno fisico massimo (in genere secondo la scala EMS-98) esteso all'intero edificio, al variare della tipologia edilizia (ovvero della classe di vulnerabilità). In essi l'estensione del danno viene implicitamente portata in conto nel valore assunto come costo di riparazione per il livello di danno massimo. Pertanto, al fine di fornire una stima più realistica e affidabile delle perdite appare utile definire un modello che porti esplicitamente in conto la distribuzione del danno inteso sia come severità (cioè massimo livello di danno fisico) sia come estensione degli altri livelli di danno lungo l'intero sviluppo in elevazione. In tale ambito, il modello di perdite potrebbe meglio evidenziare le differenze relative al diverso comportamento esibito in genere dagli edifici al variare del materiale (es. muratura e c.a.) e della tipologia (es. numero di piani in elevazione, regolarità in pianta ed in elevazione).

In genere, per le strutture in c.a., il danno massimo osservabile a seguito di un evento sismico si concentra ai piani più bassi e si riduce con l'altezza. Tuttavia, il danno ai diversi piani non è facilmente ed univocamente determinabile poiché dipende da diversi fattori che coinvolgono sia le caratteristiche dinamiche della struttura (e l'interazione con le componenti non strutturali) sia le caratteristiche relative all'input sismico (e.g. Goulet et al., 2007). Pertanto, per la finalità del lavoro in descrizione, appare innanzitutto utile evidenziare che per un dato edificio con un numero di piani np , fissato un certo livello di danno fisico massimo atteso (Ld_{max}), il numero massimo delle combinazioni (N_{comb}) aventi livelli

di danno (Ld) minori o uguale a Ld_{max} ai diversi piani è valutabile tramite la seguente espressione:

$$N_{comb} = (Ld_{max} + 1)^{np} - (Ld_{max})^{np} \quad (3)$$

La Figura 2 riporta una possibile combinazione di danno avente danno massimo $Ld_{max}=3$ per un edificio con 4 piani.

Le diverse combinazioni non sono equiprobabili poiché, come già detto, fissando le caratteristiche della struttura, dipendono dall'incertezza relativa all'input sismico.

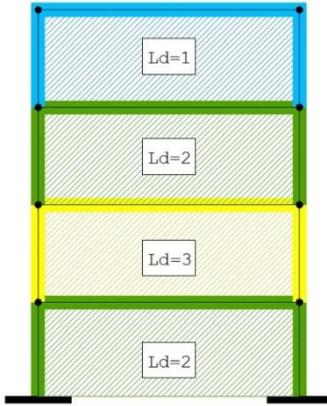


Figura 2. Esempio di una combinazione di livelli di danno per un edificio avente numero di piani $np=4$ e livello di danno massimo $Ld_{max} = 3$

A tal proposito, definita una funzione in grado di associare il livello di danno (es. in termini macrosismici) ad un dato valore del parametro di risposta (es. *drift* interpiano) (e.g. Masi et al., 2015), la frequenza di occorrenza di una certa combinazione di danno fra i diversi piani può essere definita per una data struttura attraverso analisi dinamiche non lineari, condotte con un idoneo set di accelerogrammi in grado di portare in conto le incertezze dell'input e di attingere i diversi livelli massimi di danno fisico. Una applicazione in tal senso è illustrata nel paragrafo 4.

L'ultimo passo per la stima del danno economico diretto è la definizione dei costi di riparazione di ciascuna combinazione di danno fisico, valutata come somma del costo di riparazione associato al livello di danno per ciascun piano in elevazione. Con le premesse sopra riportate, l'indice di danno economico I_{ED} (espresso in €/m²) determinato dal modello proposto, funzione del livello di danno massimo atteso e della frequenza di occorrenza di tutte le altre combinazioni di danno agli altri piani, si ottiene attraverso la seguente espressione:

$$I_{ED}(Ld_{max}) = CU \cdot \frac{1}{np} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{comb}} \sum_{j=1}^{np} F_i \cdot C(Ld)_{i,j} \right] \quad (4)$$

dove:

- CU è il costo di ricostruzione dell'edificio (es. in €/m²);
- N_{comb} è il numero delle possibili combinazioni ottenute dall'equazione 3, funzione di Ld_{max} ;
- np è il numero di piani dell'edificio;
- F_i è la frequenza di occorrenza (o *peso*) della i -esima combinazione di danno;
- $C(Ld)_{i,j}$ è il costo di riparazione associato al livello di danno Ld (espresso in rapporto al costo di ricostruzione) relativo alla combinazione i -esima per il j -esimo piano.

Nella espressione 4, le sommatorie sono estese a tutte le combinazioni di danno fisico (il cui numero massimo è ricavato dalla espressione 3, avendo fissato Ld_{max}) e a tutti i piani in elevazione dell'edificio.

L'indice di danno economico dell'espressione 4 può essere espresso anche in forma matriciale attraverso la seguente equazione:

$$I_{ED}(Ld_{max}) = CU \cdot [V_F^T \cdot V_C(M_{comb})] \quad (5)$$

In essa, il vettore V_F (espressione 6) raccoglie le frequenze di occorrenza (F_i) delle diverse combinazioni e ha dimensioni pari al numero delle combinazioni N_{comb} generate attraverso la 3.

$$V_F = \begin{pmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_i \\ \dots \\ F_{N_{comb}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$V_C(M_{comb}) = \frac{1}{np} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{np} C(M_{comb_{1,j}}) \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{np} C(M_{comb_{i,j}}) \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{np} C(M_{comb_{N_{comb},j}}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$M_{comb} = \begin{pmatrix} Ld_{1,1} & \dots & Ld_{1,j} & \dots & Ld_{1,np} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Ld_{i,1} & \dots & Ld_{i,j} & \dots & Ld_{i,np} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Ld_{N_{comb},1} & \dots & Ld_{N_{comb},j} & \dots & Ld_{N_{comb},np} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Il vettore V_C (espressione 7) raccoglie invece i costi associati alla singola combinazione di danno (e normalizzati rispetto al numero di piani totali). In particolare, ciascuna riga di V_C è riferita ad una singola combinazione di danno ed è ottenuta come sommatoria dei costi associati ai singoli livelli di danno per i diversi piani. In altri termini, il vettore V_C è funzione della matrice delle combinazioni (avente un numero di righe pari alle combinazioni e un numero di colonne pari al

numero di piani, vedi espressione 8) e del costo di riparazione associato a ciascun valore della matrice delle combinazioni.

Anche per il vettore dei costi V_C , il numero di righe è pari al numero delle combinazioni.

Nel paragrafo seguente, il modello sopra descritto viene applicato ad un edificio esistente in c.a. degli anni '70 con quattro piani in elevazione, rappresentativo della tipologia di media altezza non antisismica (i.e. progettato a soli carichi verticali). Le frequenze di occorrenza delle diverse combinazioni di danno fisico (fissato il livello massimo Ld_{max}) sono valutate attraverso analisi dinamiche non lineari condotte con diversi set di accelerogrammi.

4 APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

4.1 Descrizione e modellazione dell'edificio

L'edificio analizzato appartiene ad una classica tipologia esistente non antisismica degli anni '70, con forma in pianta rettangolare (dimensioni 21.4x11.8m) e quattro piani in elevazione (altezza interpiano 3.05m) (Figura 3).

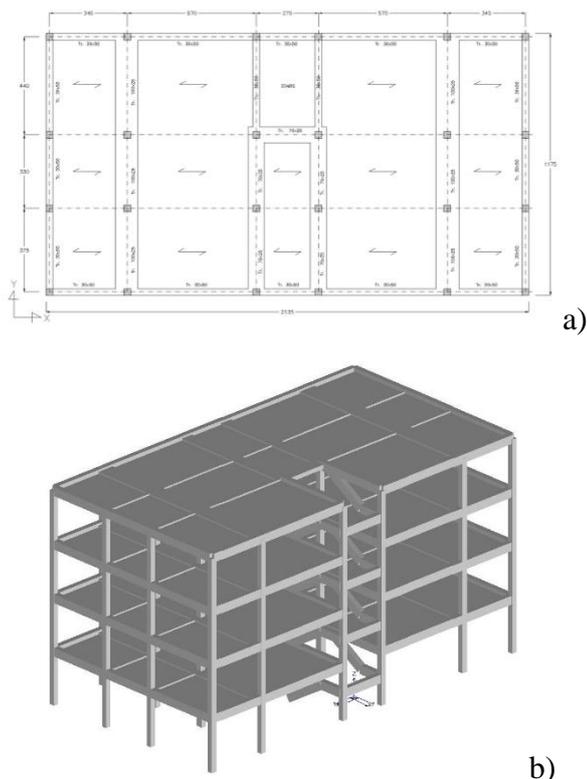


Figura 3. Schema strutturale in pianta (a) dell'edificio e vista 3D (b)

Coerentemente con il progetto a soli carichi verticali, la struttura resistente è composta da telai piani portanti i solai (appartenenti alla tipologia mista calcestruzzo-laterizio di altezza 20+5cm)

orditi ortogonalmente alla dimensione minore dell'edificio. I telai interni hanno travi a spessore di solaio (dimensioni 100x25cm), mentre vi sono travi emergenti (dimensioni 30x50cm) per quelli perimetrali. La scala è posta in posizione centrale, simmetrica rispetto alla dimensione maggiore dell'edificio, realizzata con travi a ginocchio e gradini a sbalzo.

Le tamponature, disposte in modo regolare lungo l'altezza, sono del tipo "a doppia fodera" in laterizio forato, costituite da un pannello esterno di 12cm, uno interno di 8cm e una camera d'aria di 10cm.

La geometria resistente e i dettagli di armatura sono stati definiti attraverso il progetto simulato (Masi, 2003) condotto secondo le prescrizioni del D.M. 30/05/72 e le pratiche costruttive tipiche dell'epoca. Per quanto riguarda i materiali della struttura in c.a., sono stati considerati calcestruzzo Rbk250 e acciaio FeB32 aventi, rispettivamente, tensione ammissibile di 85kg/cm² e 1600kg/cm², tenendo conto che le regole del periodo prevedevano che le verifiche di resistenza venissero effettuate adottando il metodo delle tensioni ammissibili.

L'edificio è stato analizzato con l'analisi dinamica non lineare (ADNL) considerando tre set di 160 accelerogrammi. A tale scopo è stato definito un modello a plasticità concentrata in ambiente Opensees (McKenna F., 2011). In particolare, alle estremità di ciascun elemento resistente è stato definito un legame flessionale M- θ secondo il modello di Ibarra, Medina e Krawinkler (2005), utilizzando le espressioni predittive di Haselton e Derelein (2007).

I pannelli di tamponatura sono stati modellati con un "singolo puntone equivalente" collegante i nodi opposti, secondo il modello di Bertoldi et al. (1993). Ulteriori dettagli sulla modellazione sono riportati in Ricci et al. (2019).

Le analisi dinamiche non lineari sono state condotte con 160 accelerogrammi selezionati nell'ambito del progetto di ricerca DPC-ReLUI "RINTC" (Iervolino et al., 2018, 2019) per i siti de L'Aquila, sottosuoli tipo A e C (AQ_A e AQ_C), e Catania, sottosuolo C (CT_C). Gli accelerogrammi di ciascun sito sono raggruppati in 8 gruppi (ciascuno di 20 accelerogrammi) con pericolosità crescente, relativi ad eventi con periodo di ritorno (T_R) da 10 a 5000 anni. La scelta degli accelerogrammi considerati è in grado di attingere tutti i livelli di danno per l'edificio in esame portando debitamente in conto la variabilità delle caratteristiche dell'input sismico, anche al variare dei siti e delle categorie di sottosuolo.

Per esigenza di sintesi, la Figura 4 riporta i valori di PGA relativi agli accelerogrammi AQ_A.

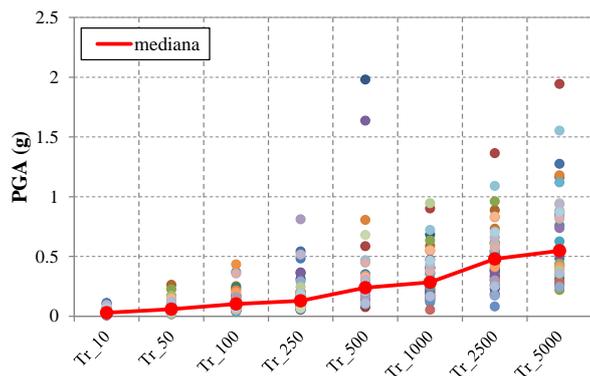


Figura 4. Valori di PGA (in g) per gli accelerogrammi AQ_A considerati al variare del periodo di ritorno (da 10 a 5000 anni). In rosso, il valore mediano.

4.2 Determinazione della frequenza di occorrenza delle combinazioni di danno

Per ciascuna analisi ADNL è stato determinato il valore massimo del *drift* interpiano (inteso come rapporto tra lo spostamento, Δ , e l'altezza interpiano, L) di ogni piano. Il danno (in termini di scala macrosismica EMS-98) è stato associato in funzione del valore Δ/L di ciascun piano secondo la funzione definita in Masi et al. (2015) e riportata in Tabella 2.

Tabella 2. Definizione dei livelli di danno in funzione del *drift* interpiano (Δ/L) (Masi et al, 2015)

Ld	0	1	2	3	4	5
Δ/L	<0.1	0.1-	0.25-	0.5-	1.0-	>2.5
[%]		0.25	0.5	1.0	2.5	

Tale associazione ha permesso di valutare il danno atteso a ciascun piano e, di conseguenza, la frequenza di osservazione delle diverse combinazioni di danno ai piani.

A tal proposito, le combinazioni di danno (che complessivamente ammontano a 15, 65, 175, 369, rispettivamente per Ld_{max} da 1 a 4) e la loro frequenza relativa sono riportate nelle Tabelle da 3 a 6.

Dall'analisi dei risultati prodotti con gli accelerogrammi AQ_A risulta che, per Ld_{max} pari a 3 e 4 (Tabella 5 e 6, rispettivamente), la combinazione di danno con la frequenza maggiore (36%) presenta il danno massimo al secondo livello (combinazione 2).

Al contrario, per valori di Ld_{max} più bassi (i.e. $Ld_{max} = 1$ e 2), le combinazioni che presentano la frequenza più alta riportano il danno massimo ai primi tre livelli (combinazione 3 per $Ld_{max} = 1$ e combinazione 6 per $Ld_{max} = 2$).

Tabella 3. Combinazioni ottenute dalle ADNL e relativa frequenza considerando $Ld_{max}=1$

ID Combinazione	Livelli di danno con $Ld_{max} = 1$				F_i (%)
	piano in elevazione				
	1	2	3	4	
Comb 1	1	1	0	0	21
Comb 2	0	0	1	0	4
Comb 3	1	1	1	0	42
Comb 4	0	1	1	0	8
Comb 5	0	1	0	0	4
Comb 6	1	1	1	1	21

Tabella 4. Combinazioni ottenute dalle ADNL e relativa frequenza considerando $Ld_{max}=2$

ID Combinazione	Livelli di danno con $Ld_{max} = 2$				F_i (%)
	Livello di piano				
	1	2	3	4	
Comb 1	1	2	1	0	9
Comb 2	1	2	1	1	19
Comb 3	2	2	1	0	13
Comb 4	2	2	1	1	19
Comb 5	1	2	2	1	9
Comb 6	2	2	2	1	25
Comb 7	2	2	2	2	3
Comb 8	1	1	2	1	3

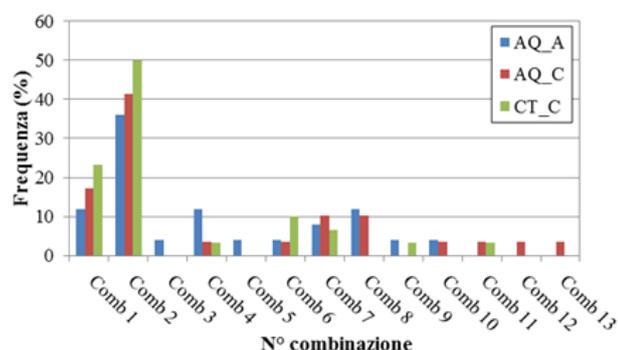
Tabella 5. Combinazioni ottenute dalle ADNL e relativa frequenza considerando $Ld_{max}=3$

ID Combinazione	Livelli di danno con $Ld_{max} = 3$				F_i (%)
	Livello di piano				
	1	2	3	4	
Comb 1	3	3	2	1	12
Comb 2	2	3	2	1	36
Comb 3	3	3	2	0	4
Comb 4	3	3	3	1	12
Comb 5	2	2	3	2	4
Comb 6	3	3	3	2	4
Comb 7	2	3	3	2	8
Comb 8	2	3	3	1	12
Comb 9	3	3	2	2	4
Comb 10	2	3	2	0	4

Tabella 6. Combinazioni ottenute dalle ADNL e relativa frequenza considerando $Ld_{max}=4$

ID Combinazione	Livelli di danno con $Ld_{max} = 4$				F_i (%)
	Livello di piano				
	1	2	3	4	
Comb 1	4	4	2	1	16
Comb 2	3	4	3	1	36
Comb 3	3	4	2	1	12
Comb 4	3	4	3	2	4
Comb 5	3	4	4	2	4
Comb 6	4	4	3	1	4
Comb 7	4	4	4	1	4
Comb 8	4	4	3	2	8
Comb 9	3	4	4	3	4
Comb 10	4	4	4	2	4
Comb 11	3	4	4	1	4

Sebbene con valori diversi, le combinazioni con le frequenze maggiori sono le medesime anche con gli altri set di accelerogrammi (i.e. AQ_C e CT_C). A tal proposito, la Figura 5 riporta il confronto fra i risultati ottenuti con i tre set di accelerogrammi considerati per il danno massimo 3. Le frequenze della combinazione 2 sono comprese tra il 36% e il 50%.



Livelli di danno con $Ld_{max} = 3$				
ID Combinazione	Livello di piano			
	1	2	3	4
Comb 1	3	3	2	1
Comb 2	2	3	2	1
Comb 3	3	3	2	0
Comb 4	3	3	3	1
Comb 5	2	2	3	2
Comb 6	3	3	3	2
Comb 7	2	3	3	2
Comb 8	2	3	3	1
Comb 9	3	3	2	2
Comb 10	2	3	2	0
Comb 11	2	3	2	2
Comb 12	2	3	1	0
Comb 13	2	2	3	3

Figura 5. Confronto tra le frequenze delle combinazioni di danno generate per $Ld_{max}=3$ relative ai set di accelerogrammi AQ_A, AQ_C e CT_C

4.3 Stima dei costi

A partire dalle combinazioni di danno valutate in precedenza, è possibile determinare i costi di riparazione attesi. A tal proposito è necessario definire la percentuale del costo di riparazione (rispetto al costo di ricostruzione) e il costo di ricostruzione. Per le finalità della presente applicazione, si è ritenuto, in via preliminare, di adottare i valori riportati in Tabella 1. In particolare, per il costo di riparazione, è stata considerata la media tra i valori *min* e *max* dei diversi livelli di danno, che è stato assunto come costo di riparazione atteso da applicare ad un singolo piano interessato da un certo livello di danno.

L'applicazione dei costi di riparazione per i diversi livelli di danno, così come definiti dalle combinazioni generate attraverso le ADNL con i set di accelerogrammi considerati, sono riportate in Tabella 7. I risultati, relativi alle combinazioni con danno massimo Ld3, mostrano innanzitutto che il costo di riparazione determinato per la combinazione meno gravosa (*MIN*, intesa come la distribuzione di danno con il 100% della frequenza di occorrenza) è compreso tra 189 e 240 €/m² mentre il costo per la combinazione più gravosa (*MAX*) è costante (430 €/m²), poiché riferito alla medesima combinazione di danno. Nella Tabella 7 sono altresì riportati i costi di riparazione ottenuti applicando l'espressione 4 (ovvero la 5), cioè considerando tutte le combinazioni di danno generate attraverso le ADNL. I valori così ottenuti sono compresi tra 287 e 301 €/m². Tali limitate differenze (circa il 5%) possono essere assunte come indicazione di una sostanziale indipendenza, ai fini della determinazione del costo di riparazione, rispetto al set di accelerogrammi considerato.

Tabella 7. Confronto dei valori dell'Indice di danno economico I_{ED} relativi alla combinazione più gravosa (*MAX*) e meno gravosa (*MIN*) secondo i valori forniti in Tab. 1, e quelli ottenuti attraverso il modello proposto (espr. 4)

	MIN (€/m ²)	MAX (€/m ²)	modello proposto (€/m ²)
AQ_A	228	430	301
AQ_C	189	430	287
CT_C	240	430	294

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Le perdite economiche (dirette) a seguito di un evento sismico rappresentano uno dei parametri prestazionali più importanti sui quali si basano i moderni approcci alla progettazione e valutazione sismica. I modelli disponibili in letteratura sono in genere funzioni che correlano il danno fisico massimo (stimato sull'intero edificio) con il costo di riparazione, quest'ultimo valutato in percentuale rispetto al costo di ricostruzione. Nella presente memoria è stato proposto un modello di stima delle perdite economiche che porta in conto sia il livello massimo di danno che la diffusione dei livelli di danno agli altri piani dell'intero edificio. Il modello proposto si basa sulla stima della frequenza di occorrenza delle diverse combinazioni di danno fra i piani dell'edificio in esame (per ora sono stati

esaminati edifici in c.a. ma il modello può essere esteso anche ad altre tipologie edilizie), i cui valori sono stati valutati attraverso analisi dinamiche non lineari. A tal proposito, è stato analizzato un edificio prototipo, rappresentativo dell'edilizia residenziale italiana anni '70 con quattro piani in elevazione, considerando tre set di 160 accelerogrammi, selezionati per i siti de L'Aquila (classi di suolo A e C) e Catania (suolo C). Adottando un opportuno funzionale di danno in grado di associare il livello di danno (secondo la EMS-98) ad un parametro di risposta dell'edificio (drift interpiano), è stato possibile osservare che le combinazioni di danno più frequenti prevedono generalmente il danno massimo ai piani più bassi, mentre i piani superiori subiscono un livello di danno minore. Sebbene con alcune differenze nei valori delle frequenze di occorrenza calcolate, emerge che le combinazioni di danno più frequenti sono le medesime considerando i tre diversi set di accelerogrammi. Peraltro, tali differenze si attenuano ulteriormente in termini di perdite economiche attese. In particolare, adottando valori del costo di riparazione (rapportato al costo di ricostruzione) disponibili in letteratura, si ottiene una differenza di circa il 5% tra i costi calcolati considerando i tre set di analisi svolte.

In conclusione, si ritiene che il modello proposto possa consentire una previsione del danno economico più accurata poiché porta esplicitamente in conto anche l'estensione dei livelli di danno, prevedibilmente diversa (e minore) tra i diversi piani rispetto al livello massimo di danno (relativo al solo piano più danneggiato).

La procedura proposta richiede ulteriori sviluppi, anche al fine di consentirne un più agevole e diffuso impiego. Anzitutto, è necessario definire le frequenze di occorrenza delle diverse combinazioni di danno (ovvero un indice sintetico in grado di portare in conto gli effetti di tali distribuzioni) con riferimento alla tipologie edilizie più ricorrenti, sia in muratura che in c.a.. Un ulteriore approfondimento è richiesto per la definizione del costo di riparazione relativo al singolo piano per ciascun livello di danno, aspetto sul quale sono in corso elaborazioni a partire dalle informazioni relative ai costi di riparazione post-sisma degli eventi occorsi nel passato in Italia, integrati attraverso altre fonti (es. computi metrici virtuali).

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro riportato nel presente lavoro è stato eseguito nell'ambito del progetto DPC-ReLUI5 2019, WP4-MARS, MAPpe di Rischio e Scenari di danno sismico - TASK 4.4 – Rischio: calcolo delle conseguenze e delle perdite economiche.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ATC 58, 2018. FEMA P-58-1, Seismic Performance Assessment of Buildings: Volume 1 (Methodology). Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Bertoldi, S.H., Decanini, L.D., Gavarini, C., 1993. Telai tamponati soggetti ad azioni sismiche, un modello semplificato, confronto sperimentale e numerico, 6° *Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia*, Perugia, 13-15 Ottobre 1993, 2, 815-824
- Calvi, G.M., 2013. Choices and Criteria for Seismic Strengthening, *Journal of Earthquake Engineering*, 17:6, 769-802, DOI: 10.1080/13632469.2013.781556.
- Coburn, A., Spence, R., 1992. Earthquake Protection. *John Wiley and Sons Ltd.*, Chichester, 355 pages.
- Coburn, A., Spence, R. 2002. Earthquake Protection, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- D.M. 30 maggio 1972. Norme tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica. Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 190 del 22 luglio 1972.
- D.M. 28/02/2017, n. 58, integrato con il D.M. 07/03/2017, n. 65, Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni.
- Del Vecchio, C., Di Ludovico, M., Pampanin, S. and 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, 237–263. No. No. 1, pages 237–263. doi:10.1193/122916EQS257M.
- Di Ludovico, M., Prota, A., Moroni, C., Manfredi, G., Dolce, M., 2017a. Reconstruction process of damaged residential buildings outside the historical centres after L'Aquila earthquake-part I: "light damage" reconstruction. *Bull Earthquake Eng.* doi:10.1007/s10518-016-9877-8.
- Di Ludovico, M., Prota, A., Moroni, C., Manfredi, G., Dolce, M., 2017b. Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L'Aquila earthquake-part II: "heavy damage" reconstruction. *Bull Earthquake Eng.* doi:10.1007/s10518-016-9979-3.
- Di Pasquale, G., Orsini, G., Serra, C., 1998. Assessment of the economic losses from the GNDT-DPC-SSN safety evaluation forms. In: Proc. of the international workshop on measures of seismic damage to masonry buildings.
- Di Pasquale, G., Goretti, A., 2001. Vulnerabilità funzionale ed economica degli edifici residenziali colpiti dai recenti eventi sismici italiana. X Congresso Nazionale ANIDIS-2001-Potenza-Matera
- Dolce, M., Masi, A., Marino, M., Vona, M., 2003. Earthquake damage scenarios of Potenza town (Southern Italy) including site effects. *Bulletin of Earthquake Engineering* 1(1):115–140

- Dolce, M., Kappos, A.J., Masi, A., Penelis, G., Vona, M., 2006. Vulnerability assessment and earthquake scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using the Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures* 28:357–371
- Dolce, M., Manfredi, G., 2015. Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai centri storici nei comuni colpiti dal sisma dell’Abruzzo del 6 aprile 2009, Doppiavoce, Napoli, 153 pp.
- Dolce, M., Goretti, A., 2015. Building damage assessment after the 2009 Abruzzi earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(8), 2241-2264.
- DPC, 2018 National Civil Protection Department (ed), 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
- Goulet, C. A., Haselton, C. B., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., & Stewart, J. P., 2007. Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced concrete frame building from seismic hazard to collapse safety and economic losses. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2007; 36:1973–1997.
- Grünthal, G. (editor), 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). European Seismological Commission, sub commission on Engineering Seismology, working Group Macroseismic Scales. Conseil de l’Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, volume 15, Luxembourg
- Haselton, C.B., Deierlein, G.G. 2007. Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment frame buildings. Blume report n. 156, February 2007.
- Haselton, C. B., Goulet, C. A., Mitrani-Reiser J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., Stewart, J. P., and Taciroglu, E., 2008 An assessment to benchmark the seismic performance of a code-conforming reinforced concrete moment-frame building. Report 2007/12, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Richmond, California.
- Ibarra, L.F., Medina, R.A., Krawinkler, H., 2005. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2005, 34(12), 1489-1511.
- Iervolino, I., Spillatura, A., Bazzurro, P., 2018. Seismic Reliability of Code-Conforming Italian Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1080/13632469.2018.1540372.
- Iervolino, I., Spillatura, A., Bazzurro, P., 2019. RINTC-e Project: Towards the Assessment of the Seismic Risk of Existing Buildings In Italy, COMPDYN 201, 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.), Crete, Greece, 24–26 June 2019
- Lucantoni, A., Bosi, V., Brammerini, F., De Marco, R., Lo Presti, T., Naso, G., Sabetta, F., 2001. Il rischio sismico in Italia. SSN, Ingegneria Sismica, XVIII-N. 1.
- Masi, A., Dolce, M., Vona, M., 2002. A procedure to estimate economic losses due to damage at residential buildings. In: Proc. DiSGG, no. 5.
- Masi, A., 2003. Seismic vulnerability assessment of gravity load designed RC frames, *Bull. Earthq. Eng.*, 23 1(3), 371-395.
- Masi, A., Samela, C., Santarsiero, G., Vona, M., 2006. Scenari di danno sismico per l’esercitazione nazionale di Protezione civile “Terremoto Val d’Agri 2006”. Convegno Nazionale ANIDIS-2007-Pisa
- Masi, A., Digrisolo, A., Manfredi, V., 2015. Fragility curves of gravity-load designed RC buildings with regularity in plan. *Earthquake Struct.*, 9, 1-27
- McKenna, F., 2011. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 2011, Vol. 13, Issue 4, pp 58-66.
- Miranda, E., Aslani, H., 2003. Probabilistic response assessment for building-specific loss estimation. PEE Report 2003/03, University of California Berkeley.
- Porter, K.A., 2003. An overview of PEER’s performance-based earthquake engineering methodology. 9th International conference on applications of probability and statistics in engineering, San Francisco, CA.
- Ricci, P., Manfredi, V., Noto, F., Terrenzi, M., De Risi, M.T., Di Domenico, M., Camata, G., Franchin, P., Masi, A., Mollaioli, F., Spacone, E., Verderame, G.M., 2019. RINTC-e: Towards seismic risk assessment of existing residential reinforced concrete buildings in Italy, COMPDYN 2019, 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Crete, Greece, 24–26 June 2019
- Zuccaro, G., Cacace, F., 2011. Seismic Casualty Evaluation: The Italian Model, an Application to the L’Aquila 2009 Event. In R Spence, E So, & C Scawthorn, *Human Casualties in Earthquakes Progress in Modelling and Mitigation* (pp. 171-184), Springer.