



## Stima della vulnerabilità sismica dei centri urbani: il caso di Forlì

Antonio Sandoli<sup>a</sup>, Gaetana Pacella<sup>a</sup>, Bruno Calderoni<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Via Claudio 21, 80125 Napoli, Italy*

*Keywords: Vulnerabilità sismica; scala territoriale; tipologie strutturali; mappe di vulnerabilità; curve di fragilità*

### ABSTRACT

La stima della vulnerabilità sismica dei centri urbani rappresenta certamente uno dei temi di maggiore interesse nell'ambito della prevenzione sismica, soprattutto nell'ottica di delineare possibili scenari di danno, definire strategie e priorità di intervento sugli edifici e di organizzazione dell'emergenza nell'immediato post-evento.

Nella presente memoria viene presentata l'analisi della vulnerabilità sismica del centro storico del Comune di Forlì, basandosi su una classificazione tipologico-strutturale degli edifici in muratura ed in c.a. sviluppata da alcuni degli autori in precedenti lavori, valida per modelli previsionali su scala territoriale. Essa individua 5 classi di edifici in muratura e 4 per quelli in c.a., definite in funzione dell'epoca di costruzione e delle relative norme, delle tecniche costruttive e del comportamento strutturale osservato sul campo a seguito dei terremoti Italiani avvenuti negli ultimi decenni. Per ciascuna classe è stato definito un range di vulnerabilità sismica utilizzando come misura di intensità sismica la massima PGA al suolo.

A partire da indagini visive in situ e dai dati ISTAT, sono state redatte mappe di vulnerabilità sismica e definite curve di fragilità specifiche in modo da delineare un quadro sinottico complessivo del livello di vulnerabilità dell'intero Comune.

### 1 INTRODUZIONE

La valutazione del rischio sismico dei centri urbani rappresenta un tema di grande attualità in Italia, soprattutto a seguito delle disastrose conseguenze verificatesi nei centri urbani, ed in particolare in quelli storici, a seguito degli eventi sismici degli ultimi anni.

La definizione - a priori - di mappe di rischio sismico relative a determinate porzioni di territorio consente di individuare aree strategiche utili per l'organizzazione e la gestione dell'emergenza in caso di terremoti. Infatti, non solo la gestione dell'emergenza, ma soprattutto l'individuazione di aree fortemente esposte a rischio è particolarmente utile per la riduzione del rischio stesso.

Nel caso di analisi di rischio a larga scala la vulnerabilità, che insieme alla pericolosità ed alla esposizione concorrono nel definire il rischio, non è da intendersi come strettamente legata alla capacità sismica della singola costruzione, ma piuttosto relativa ad un'area più o meno ampia del territorio, all'interno quale possono ricadere tipologie di edifici con caratteristiche costruttive anche molto diverse tra di loro.

I metodi per la valutazione della vulnerabilità su larga scala possono essere di tipo *empirico*, *analitico* o del tipo "*expert-judgement based*" (Calvi et al., 2006). La combinazione, poi, di due di questi metodi dà luogo a metodi *ibridi* (Kappos et al., 2006).

L'approccio più utilizzato per la stima della vulnerabilità sismica è quello empirico, che a partire da dati di rilievo del danno post-sisma su un numero significativo di edifici, risale a indici globali di vulnerabilità e a curve di fragilità suddivise per classi tipologiche. La definizione di tali classi tipologiche è quindi conseguenza di analisi statistiche svolte su un campione significativo di edifici (Jaiswal et al., 2011; Zuccaro e Cacace, 2015; Brando et al., 2017; Zuccaro et al., 2017; Del Gaudio et al., 2018).

Nel presente lavoro viene presentata una metodologia per lo svolgimento di l'analisi di vulnerabilità sismica su larga scala basata su un approccio ibrido, dato dalla combinazione del metodo meccanico e dell'*expert-judgement based*.

E' parere degli scriventi che, contrariamente a quanto avviene per metodi empirici, la classificazione tipologico-strutturale degli edifici esistenti (in muratura ed in c.a.) rappresenta il

punto di partenza per analisi di vulnerabilità su larga scala e che mappe di vulnerabilità e curve di fragilità siano diretta conseguenza delle classi tipologiche presenti in una determinata area del territorio.

A tal proposito, alcuni degli autori in precedenti memorie hanno messo a punto una classificazione tipologico-strutturale - relativamente alle principali tipologie edilizie Italiane - finalizzata all'analisi di vulnerabilità su scala territoriale. La classificazione proposta è stata utilizzata per svolgere l'analisi di vulnerabilità del Comune di Forlì, con particolare riferimento alla zona del centro storico ed a quella circostante. Sono state elaborate mappe di vulnerabilità e curve di fragilità, che rappresentano un valido strumento in fase di pianificazione urbanistica (definizione di aree maggiormente a rischio, definizione di vie di fuga, programmazione e strategie di interventi di miglioramento sugli edifici) e programmazione degli interventi ai fini delle attività della Protezione Civile immediatamente dopo l'emergenza sismica.

## 2 LA CLASSIFICAZIONE DEGLI EDIFICI

Di seguito si riporta un breve sunto della classificazione tipologica-strutturale, relativa a tipologie esistenti sul territorio Italiano, che verrà utilizzata per determinare la vulnerabilità sismica del Comune esaminato.

Tale classificazione, presentata in maniera esaustiva in Calderoni et al., 2017 e successivamente approfondita in Sandoli e Calderoni, 2018, è frutto di: (i) risultati di analisi numeriche svolte dagli autori e/o reperite in letteratura su differenti tipologie di edifici in muratura e c.a.; (ii) dall'analisi del comportamento sismico e dei danni osservati direttamente sul campo a seguito degli eventi sismici avvenuti in Italia negli ultimi quarant'anni. Analogamente ad altre classificazioni proposte da altri autori (Gruntal, 1998; Di Pasquale et al., 2005; Rota et al., 2008), essa tiene conto dei principali aspetti che condizionano il comportamento sismico degli edifici, come il periodo di costruzione, il tipo di strutture portanti verticali e orizzontali etc. Ma a differenza delle altre è basata su una stretta correlazione tra *epoca costruttiva*, *tipologia costruttiva* e *danni osservati*; questi tre parametri hanno consentito di definire differenti tipologie costruttive in funzione del comportamento globale.

### 2.1 Gli edifici in muratura

Le costruzioni in muratura sono quelle che, in genere, subiscono i danni più gravi durante i terremoti ed alle quali sono ascrivibili il maggior numero di crolli globali o parziali, costituendo nell'immaginario collettivo la tipologia di edifici più pericolosa in caso di sisma.

In realtà, il termine generico di "edificio in muratura" rappresenta un insieme molto vasto di costruzioni di epoche diverse, che possono presentare caratteristiche costruttive anche molto diverse e, conseguentemente, comportamenti sismici molto differenti.

Esiste infatti una correlazione abbastanza stretta tra l'epoca della costruzione ed il comportamento strutturale, e ciò quasi indipendentemente dalle altre caratteristiche costruttive e dallo stato di conservazione, che contano, più che altro, come condizioni migliorative o peggiorative della situazione comportamentale di base (Calderoni et al., 2016).

In particolare, l'elemento fondamentale in relazione alla risposta sismica è costituito dal livello di connessione tra le diverse pareti murarie e tra le pareti stesse e gli impalcati. Pertanto, è possibile definire una prima tipologia di edifici in muratura, qui denominata "MUR-1 *edifici antichi*", che è caratterizzata da collegamenti tra le varie parti non sufficientemente affidabili (o comunque facilmente danneggiabili) tali da portare, in caso di sisma, alla separazione tra loro delle pareti murarie e/o dei singoli maschi murari, che risultano quindi fortemente esposti al pericolo del ribaltamento al di fuori del piano (Figg. 1a e 1b). Analisi numeriche di dettaglio svolte da molti autori hanno mostrato che edifici di questo tipo hanno capacità sismica molto bassa dell'ordine di qualche unità percentuale di  $g$ , rappresentando la tipologia di edifici in muratura di maggiore pericolosità. A parere degli scriventi le altre caratteristiche, quali ad esempio il tipo e la qualità della muratura o la tipologia di impalcati (piani o a volte), non modificano sostanzialmente il comportamento di base, ma possono unicamente ridurre o incrementare (in un intervallo non molto ampio) l'accelerazione sopportabile.

Se gli edifici di tale prima tipologia sono stati sottoposti (in periodi più o meno recenti) ad interventi di rinforzo, consistenti principalmente in efficaci collegamenti diffusi, viene garantito, anche se a volte in maniera non del tutto efficace, un comportamento scatolare della costruzione, con la sostanziale eliminazione, o quanto meno una sensibile riduzione, della possibilità di attivazione dei meccanismi fuori piano. Ciò porta ad un incremento significativo delle prestazioni sismiche

della costruzione, che saranno correlate quasi sempre al molto più efficiente comportamento delle pareti nel piano. E' possibile definire, quindi, una seconda tipologia di edifici in muratura, qui denominata "MUR-2 *edifici antichi migliorati*" (Fig. 2), la cui capacità sismica si incrementa in genere fino anche a valori dell'ordine di 1/10 di  $g$ , (per maggiori dettagli si veda in Sandoli e Calderoni, 2018).

La terza tipologia di base, denominata "MUR-3 *edifici moderni*", raggruppa gli edifici in muratura realizzati nel XX secolo nel rispetto nelle norme susseguite dal 1909 in poi per le zone sismiche e delle norme del 1937 (R.D. 22/11/1937 n.2105) anche per le zone non sismiche (Fig. 3). Tale tipologia è caratterizzata da un ottimo comportamento scatolare assicurato dalla intima connessione tra le pareti verticali murarie e gli impalcati, che quindi svolgono il compito di catene bidimensionali diffuse, impedendo di fatto l'attivazione dei meccanismi fuori dal piano. La vulnerabilità sismica di questi edifici risulta quindi molto ridotta, in quanto correlata sicuramente al comportamento delle pareti nel proprio piano, favorito anche da una significativa rigidezza nel piano orizzontale degli impalcati. In genere, le analisi sismiche svolte su edifici di questo tipo (con numero di piani variabile in genere tra 3 e 5) hanno evidenziato accelerazioni sopportabili significative, a volte anche più alte del 15% di  $g$ .

Si possono infine individuare altre due tipologie, che possono definirsi ibride, denominate come "MUR-4 *edifici semi-moderni*" (Fig. 4) e "MUR-5 *edifici moderni non a norma*" (Fig. 5). La prima raggruppa edifici, realizzati in zona sismica (ma a volte anche in zona non sismica, soprattutto per gli edifici pubblici) prima della emanazione delle norme del 1937, che presentano collegamenti continui delle pareti murarie a diverse quote (con cordoli in c.a. o cerchiature in acciaio) però non disposti al livello degli impalcati e quindi non direttamente connessi ad essi. Tale tipologia è simile alla MUR-2, anche se, essendo più moderna nella tecnologia realizzativa, presentando collegamenti continui su tutte le murature e non catene puntuali, è sicuramente più efficiente.

La seconda, invece, raggruppa gli edifici che, anche se costruiti dopo il 1937, non presentano i prescritti collegamenti di piano tra le pareti murarie e gli impalcati e quindi, ad esempio, sono privi cordoli di piano pur avendo solai in acciaio o in c.a.; sono edifici che non rispettano le norme in vigore all'epoca della costruzione (Fig. 5). Pertanto, il loro comportamento sismico è assimilabile a quello della tipologia MUR-1.



a) b)

Figura 1. Edifici in muratura "antichi" (MUR-1): a) Poggio Picenze (AQ); b) Amatrice (RI)



Figura 2. Edifici in muratura "antichi migliorati" (MUR-2) a L'Aquila



Figura 3. Edificio in muratura "moderno" (MUR-3) a L'Aquila



Figura 4. Edificio in muratura "semi-moderno" (MUR-4) a Napoli



Figura 5. Edificio in muratura "moderno non a norma" (MUR-5) a Mirandola (MO)

## 2.2 Gli edifici in c.a.

Le costruzioni in cemento armato sono apparse nel panorama edilizio nazionale nei primi anni del XX secolo come evoluzione dell'edificio in

muratura. Esse venivano realizzate secondo le indicazioni delle prime norme francesi ed italiane, che erano basate, ovviamente, sull'analisi elastica della struttura e sul metodo delle tensioni ammissibili.

All'epoca in cui furono realizzati i primi edifici in c.a. (inizio '900) la sensibilità sismica, come la intendiamo oggi, era poco sviluppata, ma si tendeva comunque a realizzare edifici con pareti esterne molto robuste e rigide, così come alcune pareti interne (ad esempio quelle della scala), tali da risultare sufficientemente resistenti anche in relazione alle azioni orizzontali.

Lo scoppio della guerra in Europa (1939) coincide peraltro con l'emanazione della seconda significativa norma italiana sul c.a. (R.D. 16/11/1939 n.2229); ma tale norma sarà applicata soprattutto dopo la fine della guerra ed in pratica, come si dirà meglio in seguito, fino agli inizi degli anni '70. Pertanto si può sicuramente definire come prima tipologia di base per le costruzioni in c.a. quella degli "CA-1 - edifici costruiti prima del 1939" ovvero prima della II guerra mondiale, (Fig. 6a). In pratica questi edifici presentano una struttura concepita per sostenere i soli carichi verticali, costituita da telai perimetrali ed interni disposti essenzialmente in un sola direzione, ovvero lungo gli allineamenti definiti dalle orditure dei solai. Le travi sono comunemente emergenti, mentre le tamponature sono di tipo pesante, ben incassate nei telai di bordo, dando luogo a un edificio significativamente rigido rispetto alla sua altezza.

Una criticità di questa tipologia è rappresentata dai nodi che, sotto l'azione di terremoti significativi, sono fortemente sollecitati dall'azione concentrata delle pesanti tamponature (che lavorano come diagonali compresse). Pertanto, pur presentando una buona resistenza al sisma, proprio dovuta alla presenza delle pareti rigide incassate nei telai, a volte possono subire danni gravi fino a crollo a causa della rottura di alcuni nodi d'angolo e perimetrali esterni (Fig. 6b).

Dopo la guerra, l'esigenza di ricostruire ed ampliare le città con rapidità ha portato ad un intensivo sviluppo delle costruzioni in c.a., con il contestuale abbandono delle costruzioni in muratura. La tecnologia del c.a. consentiva, infatti, la realizzazione di edifici a molti più piani (fino a 20 per quelli più alti) in tempi relativamente ridotti. In pratica in questo periodo sono scomparsi gli edifici misti (con pareti perimetrali integralmente in muratura o in muratura intelaiata), lasciando il passo all'edificio a struttura integralmente in c.a. - il tipico edificio di 10-12 piani a struttura intelaiata degli anni '50-'60.

Da un punto di vista strutturale tale tipo di edificio resta concepito per sostenere i soli carichi verticali. Pertanto la sua impostazione progettuale è, almeno in teoria, molto simile a quella degli edifici costruiti prima della guerra. Però, la richiesta di maggiore flessibilità architettonica porta a un uso via via maggiore delle travi a spessore nei telai interni che sostengono i solai. Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo (almeno teorico) consente l'incremento del numero di piani piuttosto che la riduzione delle sezioni trasversali dei pilastri, conducendo comunque a edifici globalmente più deformabili rispetto a quelli del passato.

In relazione alla deformabilità è importante osservare che, fino alla fine degli anni '50, ancora le tamponature sono di tipo pesante ben incassate nelle maglie dei telai. Invece, dalla metà degli anni '60 diviene comune l'utilizzo di pareti perimetrali di tipo leggero, in genere realizzate con laterizi forati a doppia fodera con camera d'aria interposta, la cui incassatura nei telai è sicuramente meno curata, anche in considerazione del fatto che spesso la fodera esterna risulta aggettante rispetto al filo esterno delle travi e dei pilastri.

Tali edifici si possono raggruppare in una nuova tipologia, definita "CA-2 - edifici costruiti tra il 1939 ed il 1970" (Fig. 7).

In effetti, il 1971 rappresenta un anno di svolta, in quanto viene emanata la Legge n.1086 del 5/11/1971. Questa legge riorganizza dal punto di vista tecnico-amministrativo le costruzioni in c.a., in c.a.p. e in acciaio. In particolare, stabiliva che, da quel momento, tutti i progetti strutturali dovevano essere depositati presso gli Uffici del Genio Civile. Ciò significa che, almeno in teoria, oggi è possibile rintracciare negli archivi pubblici il progetto strutturale di qualsiasi opera in c.a. realizzata dopo il 1971, potendo acquisire informazioni dettagliate sulla costruzione, molto utili ai fini sia della valutazione della vulnerabilità.

Da un punto di vista dell'impostazione strutturale, gli edifici costruiti dopo l'emanazione della L.1086 non sono molto dissimili da quelli precedenti al 1971, nel caso in cui siano stati concepiti per sostenere essenzialmente i soli carichi verticali. Si diffonde però maggiormente l'uso di travi a spessore, le tamponature sono, praticamente sempre, di tipo leggero a doppia fodera e aumentano le irregolarità, sia in pianta che in elevazione, in relazione allo sviluppo di un architettura più "libera" rispetto agli schemi tradizionali.

Differenze rilevanti, tali da poter influenzare anche la capacità sismica dell'edificio, si ritrovano, invece, nei materiali. In particolare, le barre d'acciaio sono ormai quasi esclusivamente

ad aderenza migliorata, con una maggiore resistenza a trazione rispetto al passato, e il calcestruzzo, con l'affermarsi delle centrali di betonaggio esterne al cantiere e l'intensificarsi dei controlli, dovrebbe presentare migliori caratteristiche meccaniche.

E' utile allora definire una specifica diversa tipologia, la "CA-3 - edifici costruiti tra il 1971 e l'entrata in vigore delle norme sismiche" (Fig. 8).

In relazione alla capacità sismica, le prime tre tipologie si possono considerare abbastanza simili tra loro. Più in dettaglio, gli edifici più "vecchi" risultano piuttosto rigidi (a causa sia dei telai con travi emergenti che, soprattutto, per la presenza delle tamponature pesanti nelle maglie strutturali). Viceversa, il maggior cemento sismico, connesso alla significativa rigidità globale, è compensato da un numero di piani ridotto.

Gli edifici più "moderni", dotati di un numero di piani maggiore, risultano più deformabili (pochi telai rigidi con travi emergenti e pilastri di ridotte dimensioni) e, per questo, soggetti ad azioni sismiche relativamente ridotte. La loro capacità di sopportare i terremoti è però condizionata fortemente dalla scarsa resistenza dei nodi e dalla presenza di pilastri tozzi, soggetti a rotture fragili a taglio. Spesso però il contributo non trascurabile delle tamponature aumenta la resistenza globale della struttura. In definitiva, a meno di difetti specifici non rinvenibili con facilità anche con indagini accurate, la capacità sismica delle prime tre categorie di edifici in c.a. si può considerare sostanzialmente analoga, valutabile nel range 0.1 - 0.15g.

Diverse considerazioni si possono fare, invece, per gli edifici costruiti dopo l'entrata in vigore delle norme sismiche per la specifica zona geografica. Tali edifici presentano strutture a telai abbastanza rigidi disposte in entrambe le direzioni principali della pianta e, in genere, una discreta regolarità strutturale sia in pianta che in elevazione.

Per gli edifici esistenti (cioè realizzati fino alla fine del XX secolo, ovvero prima dell'entrata in vigore dell'Ordinanza 3274/3431 e poi delle NTC/08) e ragionando su ampia scala, la loro capacità sismica può, per quanto detto, considerarsi abbastanza verosimilmente pari a quella di progetto, anche se i danni attesi sono sempre di notevole entità.

Pertanto si può definire come ulteriore categoria di edifici in c.a. la "CA4 - edifici costruiti dopo l'entrata in vigore delle norme sismiche" (Figg. 9a e 9b). Per tale tipologia la capacità sismica si può ritenere effettivamente corrispondente al livello di accelerazione sismica utilizzata nel progetto. Queste costruzioni sono

state tutte progettate utilizzando le norme di vecchia generazione, nelle quali le azioni orizzontali di calcolo venivano convenzionalmente valutate con coefficienti di 0.04, 0.07 e 0.10 applicati alle masse, a seconda della zona sismica vigente all'epoca di costruzione. Da tali coefficienti, procedendo a ritroso secondo i principi dell'ingegneria sismica, si ottengono i valori di capacità corrispondenti a PGA (valutata su suola A) rispettivamente di circa 0.15g, 0.25g e 0.35g.

Però tenendo conto degli errori di progettazione e di realizzazione nonché dei dettagli costruttivi spesso carenti, purtroppo spesso riscontrati per gli edifici di quell'epoca quando analizzati in dettaglio, appare opportuno ridurre i valori prima indicati con un coefficiente variabile tra il 20% e il 30%, ottenendo valori di capacità sismica di riferimento per valutazioni su ampia scala pari rispettivamente a 0.11g, 0.19g e di 0.25g.

E' quasi superfluo ricordare che tali indicazioni non sono valide per gli edifici più recenti (successivi al 1 luglio 2009), che sono stati progettati rispettando le nuove norme sismiche.

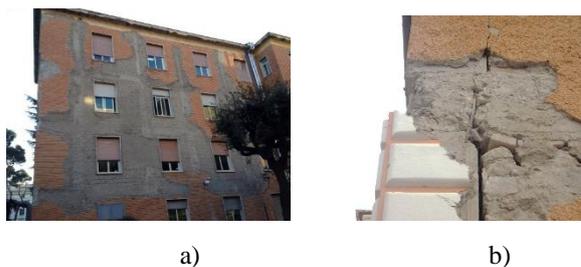


Figura 6. Edifici in c.a. costruiti prima del 1939: a) Napoli; b) Amatrice (RI), edificio anni '30 con rottura del nodo d'angolo per azione concentrata della tamponatura



Figura 7. Edifici costruiti tra il 1939 ed il 1970 (CA-2) a Napoli



Figura 8. Edificio costruito tra il 1971 e l'entrata in vigore delle norme sismiche (CA-3) a Paternopoli (AV)



Figura 9. Edifici costruiti dopo l'entrata in vigore delle norme sismiche: a) edifici in costruzione a San Gregorio Magno (SA), b) Amatrice (RI)

### 3 DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE STRUTTURALI PER IL COMUNE DI FORLÌ

#### 3.1 Inquadramento del Comune

La città di Forlì si trova a ridosso dell'Appennino tosco-emiliano-romagnolo ed è stata spesso interessata da eventi sismici, anche di non trascurabile intensità nel corso della storia. Tra i terremoti storici più forti si annoverano quelli del 1584 e del 1918 per i quali furono riportati danni del IX e del VIII grado della scala Mercalli rispettivamente (per quest'ultimo fu stimata una magnitudo intorno a 5.8). Gli annali mostrano come sequenze sismiche hanno sempre interessato l'area geografica in esame: importanti terremoti si sono verificati anche nel corso del 1600 e 1800. Secondo l'INGV la zona è considerata di medio-alta pericolosità sismica e l'attuale pick ground acceleration prevista dalla normativa italiana, allo SLV, per il Comune di Forlì è pari a 0.205g.

La struttura morfologica di Forlì è quella tipica delle città storiche Italiane e pertanto esso può essere considerato come prototipo dei centri storici Italiani.

La città è costituita da un ampio centro storico, circoscritto dalle antiche mura della città, caratterizzato dalla prevalenza di edifici in muratura "antichi" e "antichi migliorati" costruiti prima della seconda guerra mondiale (Fig. 10a) e da una minima percentuale di edifici in muratura "moderni" ed in c.a. nelle zone a ridosso al nucleo storico. Le aree più periferiche, di recente costruzione, sono costituite invece da edifici in muratura "moderni" e da edifici in c.a. realizzati prevalentemente negli anni '60 e '70 progettati per i solo carichi verticali (Fig. 10b).



a) b)

Figura 10. Tipologie di edifici nel Comune di Forlì: a) edifici in muratura nel centro storico, b) edifici in c.a. nelle zone periferiche

#### 3.2 Individuazione delle tipologie di edifici

Il primo passo per la definizione della vulnerabilità sismica consiste nell'individuazione delle classi tipologiche degli edifici presenti sul territorio. Ciò è stato fatto in accordo alla classificazione presentata nel par. 2.

Le percentuali di classi tipologiche sono state individuate effettuando una distinzione tra differenti intervalli temporali, definiti in funzione di particolari eventi che hanno interessato l'intero territorio nazionale oppure eventi specifici per il Comune esaminato. Inoltre sono state utilizzate cartografie fornite direttamente dalla sede Comunale e dati ISTAT relativi al 2011.

Nelle Tabb. 1 e 2 sono riportate le percentuali delle tipologie di edifici individuate per ciascun intervallo temporale, rispettivamente per gli edifici in muratura e per quelli in c.a.

Per quanto riguarda gli edifici in muratura, l'80% di quelli costruiti prima del 1918 (data di un forte terremoto con epicentro tra Forlì e Cesena) appartiene alla tipologia MUR-1, mentre la restante parte appartiene alla tipologia MUR-2.

A ridosso degli anni '30 compaiono i primi esempi edifici di concezione moderna (MUR-3); questo perché nel 1929 la zona fu interessata da terremoto significativo (di magnitudo 5.3) in occasione del quale furono emanate specifiche prescrizioni locali riguardanti le tecniche costruttive da utilizzare. In particolare, poi, il 1931 è stata considerata come data fondamentale nell'indagine svolta perché in questo anno fu emanato il primo piano regolatore della città (di cui abbiamo disposto delle cartografie storiche).

Sul finire degli anni '30 gli edifici di tipologia MUR-1 e MUR-2 lasciano definitivamente il passo ai MUR-3, pur restando, con una piccola percentuale quasi fisiologica, edifici del tipo MUR-5. Questo è stato anche accentuato dal fatto che nel 1937 fu emanato il Regio Decreto n. 2105 il quale vietava definitivamente la costruzione di edifici "antichi" sull'intero territorio Nazionale. Si noti, infine, che per il Comune in esame non sono state riscontrate tipologie assimilabili alla MUR-4.

Tabella 1. Percentuali tipologiche di edifici in muratura

Epoca	MUR1	MUR2	MUR3	MUR4	MUR5
< 1918	80 %	20%	-	-	-
1918-1931	60%	10%	20%	-	10%
1932-1945	10%	-	80%	-	10%
1946-1980	-	-	90%	-	10%
1981-1990	-	-	95%	-	5%
1991-oggi	-	-	100%	-	-

Tabella 2. Percentuale tipologiche di edifici in c.a.

Epoca	CA1	CA2	CA3	CA4
< 1918	100%	-	-	-
1918-1931	100%	-	-	-
1932-1945	50%	50%	-	-
1946-1980	-	70%	30%	-
1981-1990	-	-	10%	90%
1991-oggi	-	-	-	100%

Per gli edifici in c.a., invece, fino a prima del 1932 la tipologia prevalente è la CA-1; a partire da questa data in poi la loro presenza sul territorio diventa sempre più trascurabile fino a raggiungere, ad oggi, il 100% della tipologia CA-4. In particolare, tra il 1932 ed il 1945 compaiono i primi edifici della tipologia CA-2 realizzati in accordo alle indicazioni fornite dal Regio Decreto del 1939, sebbene concepiti essenzialmente per sostenere i soli carichi verticali.

A ciascuna classe tipologica è stata associata un range di PGA sopportabile allo SLV (su suolo A) specifici per il Comune di Forlì (Tabb. 3 e 4), così come previsto nella classificazione presentata in Calderoni et al., 2017. Tali intervalli, inoltre, sono utili alla definizione delle mappe di vulnerabilità e curve di fragilità (Sandoli e Calderoni, 2018).

I valori di PGA qui proposti derivano da dati relativi ad analisi numeriche svolte dagli autori e/o da valori reperiti in lavori di letteratura su edifici in muratura ed in c.a.. Ovviamente, l'intervallo tiene conto della variabilità dei risultati numerici in relazione ad errori di calcolo, incertezze sulle proprietà dei materiali, affidabilità dei software utilizzati per lo svolgimento delle analisi, etc. ed è valido per edifici di altezza compresa tra 2 e 4 piani (come nel caso di Forlì). Per edifici con un numero di piani inferiori o superiore i valori dell'intervallo possono essere rispettivamente incrementati o ridotti fino al 50%.

E' da sottolineare che gli intervalli delle epoche costruttive sono stati particolarizzati al Comune esaminato, per tener conto delle specificità connesse alle tecniche costruttive della zona e degli aggiornamenti riguardanti la classificazione sismica del Comune.

A tal proposito, fermo restando le date del 1937 e del 1939 che sdoganano definitivamente le più moderne tipologie costruttive, è stato introdotto l'anno 1983 come data specifica per il Comune di Forlì. Nel 1983 il Comune viene per la prima volta classificato come sismico di seconda categoria; da questo momento in poi gli edifici sono stati progettati quantomeno considerando la presenza di azioni sismiche (anche se nessuna attenzione è stata riposta nella cura dettagli costruttivi). Pertanto agli edifici appartenenti alla tipologia CA-4 è stato assegnato un valore unico di PGA sopportabile pari a 0.19g, coerentemente a quanto detto al par. 2.

Inoltre per le tipologie CA-1, CA-2 e CA-3 sono stati considerati i medesimi intervalli di PGA, questo in virtù del fatto che sono accomunati dagli stessi difetti che condizionano negativamente il loro comportamento sismico.

Tabella 3. Range di PGA per gli edifici in muratura

Epoca	tipologia	PGA <sub>min</sub> /g	PGA <sub>max</sub> /g
<1937	MUR-1	0	0.05
1937-1983	MUR-2	0.05	0.10
>1983	MUR-3	0.10	0.15
-	MUR-4	Tipologia	Non -
>1937	MUR-5	0.03	0.05

Tabella 4. Range di PGA per gli edifici in c.a.

Epoca	tipologia	PGA <sub>min</sub> /g	PGA <sub>max</sub> /g
<1939	CA-1	0.10g	0.15g
1939-1971	CA-2	0.10g	0.15g
1971-1983	CA-3	0.10g	0.15g
>1983	CA-4	0.19g	0.19g

## 4 STIMA DELLA VULNERABILITÀ

### 4.1 Le mappe di vulnerabilità

La conoscenza della percentuale di edifici per ciascuna epoca costruttiva e conseguentemente il loro livello di vulnerabilità (Tabb. 3 e 4) ha permesso di redigere le mappe di vulnerabilità in funzione dell'epoca costruttiva, separatamente per gli edifici in muratura (Fig. 11) ed in c.a. (Fig. 12). Sebbene tali mappe siano limitate alle sole epoche costruttive, possono comunque assimilarsi mappe di PGA sopportabili, essendo le epoche costruttive strettamente legate al livello di vulnerabilità sismica.

Tale mappatura delinea, in maniera abbastanza speditiva, un quadro di vulnerabilità di insieme dell'intero Comune e permette di cogliere, almeno qualitativamente, le zone potenzialmente esposte al rischio sismico e di prevedere il loro livello di danno.

Come era da attendersi, gli edifici in muratura "antichi" definiscono la quasi totalità delle costruzioni del centro storico (Fig. 11). Mentre le zone che contornano il centro storico sono caratterizzate perlopiù dalla presenza di edifici in muratura "moderni" (MUR-3), costruiti dopo gli anni '30.

Per quanto riguarda gli edifici in c.a. (Fig. 12), invece, pochi casi sporadici di edifici costruiti prima del 1918 (CA-1) sono presenti sia nella zona del centro storico che in quella più periferica. Mentre edifici di classe CA-2 e CA-3 sono diffusi in maniera più significativa nella zone esterne al nucleo storico; così come una non trascurabile quantità di edifici di classe CA-4 sono presenti nelle zone più periferiche.

La distribuzione sul territorio delle classi tipologiche mostra un significativo livello di vulnerabilità per la zona del nucleo storico della città. Qui si concentrano prevalentemente edifici della tipologia MUR-1 il cui comportamento sismico sotto azioni sismiche risulta particolarmente critico, essendo caratterizzato da crolli fuori piano delle pareti che conducono a crolli locali e/o globali delle costruzioni anche per modesti valori di scuotimento sismico (Calderoni et al., 2016). A ciò si aggiunge anche la presenza di edifici in c.a. progettate per i soli carichi verticali, prevalentemente negli anni '60 e '70, il cui comportamento sismico è pesantemente influenzato dalle criticità insite di queste costruzioni (non idonea armatura nei nodi, pilastri tozzi, scarsa presenza di staffe nei pilastri etc.) che conducono spesso a crolli rovinosi (Calderoni et al., 2015).

Meno critica risulta, invece, la situazione per la zona esterna al centro storico. Qui si concentrano la maggior parte degli edifici in muratura "moderni" ed in c.a. progettati a seguito degli anni '80 (quindi contemplando la presenza di azioni sismiche) e a seguito della prima metà degli anni '90, quando vengono introdotte in Italia le prime normative sismiche di moderna generazione (basate sulle regole del capacity design).

Un aspetto positivo che emerge da questa mappatura - e che può essere esteso a gran parte dei centri storici Italiani - è che la presenza di edifici del tipo MUR-1 può essere potenzialmente sfruttata per ridurre la vulnerabilità sismica globale. Infatti, per tali edifici piccoli interventi leggeri localizzati (catene metalliche aderenti o scorrevoli, cordoli sommitali etc.) possono trasformare la tipologia strutturale da quella "antica" (MUR-1) a quella "antica migliorata" (MUR-2) con conseguente miglioramento della risposta sismica in termini di incremento della capacità e riduzione del danno (Calderoni et al., 2017). Tale strategia, tra l'altro, è quella che si cela dietro al documento cosiddetto del "Sisma Bonus" recentemente emanato dal Ministero per incentivare la riduzione della vulnerabilità sismica del territorio Nazionale.

### 4.2 Curve di fragilità

Le curve di fragilità sono uno strumento particolarmente utile per effettuare valutazioni di vulnerabilità sismica su scala territoriale (Calvi et al., 2006; Zuccaro e Cacace, 2015). Esse consentono di definire un quadro complessivo del possibile scenario di danno e della relativa vulnerabilità sismica.

Con riferimento all'inventario delle tipologie individuate per il Comune di Forlì, sono state elaborate le corrispondenti curve di fragilità. Esse sono state definite adottando un approccio del tipo ibrido basato sulla combinazione del metodo meccanico e del "giudizio dell'esperto" (expert judgement), come più dettagliatamente riportato in Sandoli e Calderoni, 2018.

Le curve sono state ottenute adottando una distribuzione log-normale del parametro di intensità sismica (intensity measure, IM):

$$\text{pdf(IM)} = \frac{1}{\text{IM} \sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log(\text{IM}) - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

dove  $\sigma_x$  e  $\mu_x$  rappresentano rispettivamente la varianza ed il valore medio della distribuzione.

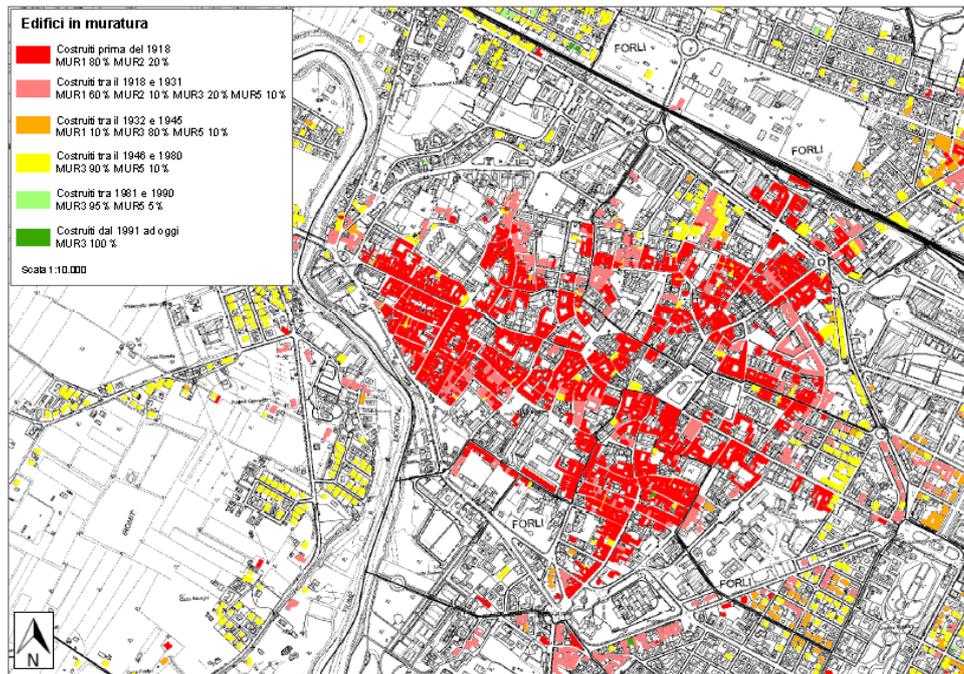


Figura 11. Mappa di vulnerabilità per epoche costruttive per gli edifici in muratura

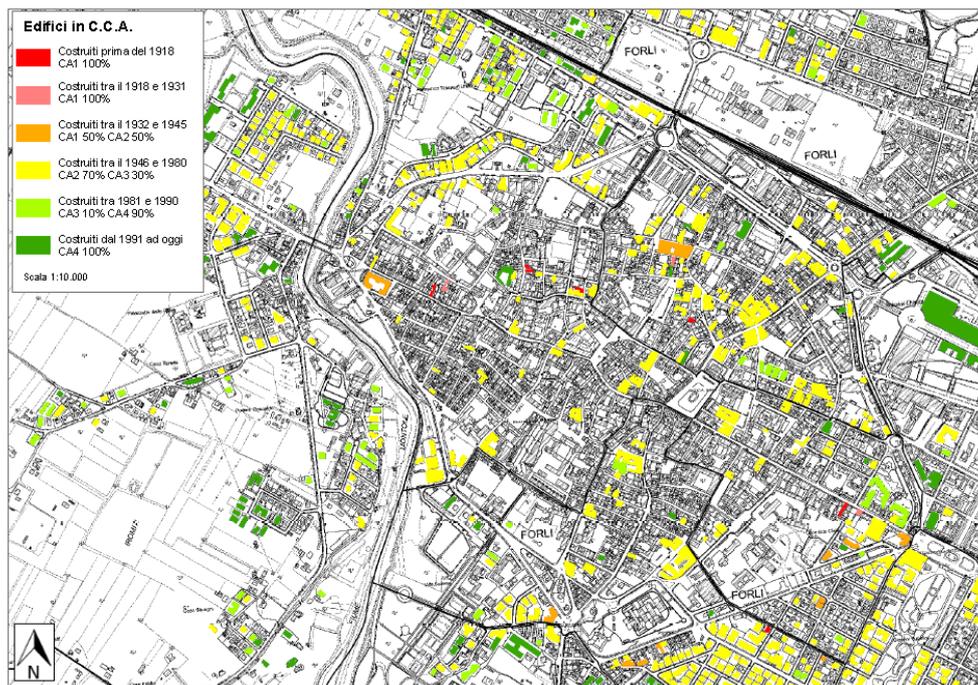


Figura 12. Mappa di vulnerabilità per epoche costruttive per gli edifici in c.a.

Come parametro IM è stato scelto il valore medio dell'intervallo delle PGA definite nelle Tab. 3 e 4 per ciascuna tipologia di edificio.

Nelle Figg. 13 e 14 sono riportate le curve di fragilità ottenute rispettivamente per le tipologie di edifici in muratura ed in c.a.

Poiché i valori di  $a_g$  forniti dalla norma sono relativi dello spettro di risposta medio per la zona in esame, si può ritenere che la capacità sismica (PGA) da utilizzare come valore di "resistenza"

possa essere quello corrispondente ad una probabilità di fallimento ( $P_f$ ) del 50%. Così facendo emerge, in maniera evidente, l'elevato grado vulnerabilità sismica del centro storico di Forlì: il 100% degli edifici possiedono una capacità sismica (PGA) inferiore alla pick ground acceleration ( $a_g = 0.205g$ ) prevista dalle attuali normative per il Comune stesso, confermando la situazione critica già delineata dalla mappe di vulnerabilità.

E' risultato che la quasi totalità degli edifici risulteranno pesantemente danneggiati e/o affetti da crolli nel caso in cui si verifichi un evento sismico di intensità uguale o superiore a quello atteso da norma.

Ovviamente, è da tener presente che il quadro di vulnerabilità delineato dalle curve di fragilità è da ritenersi del tutto teorico e che, almeno al momento, non è in grado di contemplare ulteriori fattori che possono influenzare il comportamento sismico delle costruzioni, quali la durata del sisma, la sua direzionalità, la duttilità reale e le effettive proprietà dinamiche delle costruzioni, etc.

Dato il carattere morfologico degli edifici presenti, il centro storico di Forlì può considerarsi come un prototipo dei centri storici Italiani e per i quali sono ben note le disastrose conseguenze verificatesi in occasione di eventi sismici (Irpinia 1980, L'Aquila 2009, Centro Italia 2016/17). Pertanto, ragionando per confronto, si può ritenere che il metodo proposto è un ottimo strumento previsionale del livello di vulnerabilità dei centri storici italiani in occasione eventi sismici.

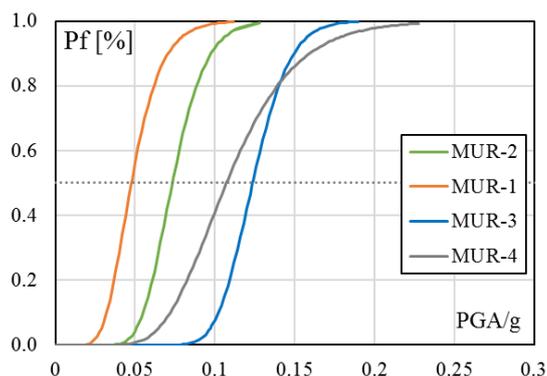


Figura 13. Curve di fragilità per gli edifici in muratura

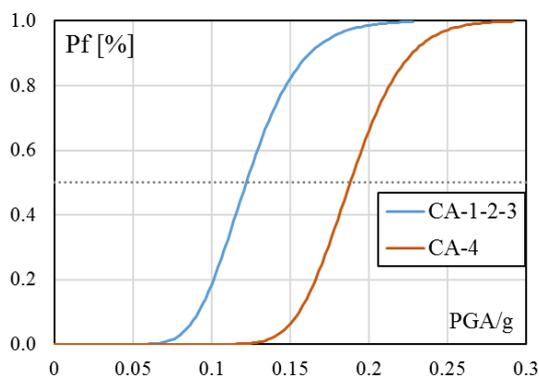


Figura 14. Curve di fragilità per gli edifici in c.a.

## 5 CONCLUSIONI

In questo articolo è stata presentata una metodologia per la stima della vulnerabilità a larga scala dei centri urbani, riferendosi al caso studio del Comune di Forlì.

L'analisi è stata svolta utilizzando un approccio ibrido (dato dalla combinazione del metodo meccanico e dell'expert judgement) che, partendo da classi tipologiche degli edifici, a priori definite dagli autori (in precedenti memorie), permette di definire un quadro di insieme circa il livello di vulnerabilità sismica della zona esaminata.

Utilizzando i dati a disposizione reperiti direttamente in loco (cartografie storiche, piani regolatori, dati Istat etc.) e la classificazione tipologico-strutturale degli edifici è stato possibile redigere mappe di vulnerabilità e curve di fragilità. Entrambe hanno permesso di delineare un quadro di vulnerabilità di insieme del Comune, dal quale è emerso che, in pratica, la quasi totalità degli edifici hanno capacità sismica inferiore alla domanda attualmente prevista dalla normativa. La presenza di edifici "antichi", però, può essere sfruttata come potenziale strumento di riduzione del rischio sismico della città. Infatti, come dimostrato anche dalle curve di fragilità, piccoli interventi locali finalizzati a trasformare la tipologia antica verso quella "antica migliorata" o "moderna" permettono di ridurre notevolmente la vulnerabilità delle costruzioni e quindi dell'intera area.

Le mappe di vulnerabilità elaborate, in particolare, appaiono un valido strumento da proporre in fase di pianificazione urbanistica a livello Comunale, poiché consente di programmare strategie di interventi di miglioramento per gli edifici, delineare vie di fuga e di organizzare le attività di gestione dell'emergenza post-sismica.

## BIBLIOGRAFIA

- Brando G., De Matteis, G., Spacone, E. 2017. Predictive model for the seismic vulnerability assessment of small historic centres: Application to the inner Abruzzi Region in Italy. *Engineering Structures* **153**; 81-96.
- Calderoni, B., Sandoli, A., Migliaccio, L. 2015. Valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in c.a. progettati per i soli carichi verticali mediante una procedura semplificata. *Progettazione Sismica* n. 2.
- Calderoni, B., Prota, A., Cordasco, E., A., Sandoli, A. 2016. Seismic vulnerability of "ancient" masonry buildings and strengthening intervention strategies. *16<sup>th</sup> Int. Brick and Block Masonry Conference (IB<sup>2</sup>MAC)*. Padova.

- Calderoni, B., Sandoli, A., Cordasco, E., A., Prota, A. 2017. The effectiveness of different retrofit solutions on the seismic performances of ancient URM buildings. *3<sup>rd</sup> Inter. Conf. on Protection of Historical Constructions (PROHITECH)*. Lisbona.
- Calderoni, B., Sandoli, A., Cordasco, E., A. 2017. Valutazione speditiva della vulnerabilità sismica dei centri urbani italiani: classificazione tipologica strutturale degli edifici esistenti in muratura ed in c.a. *Structural Magazine* 210 Marzo-Aprile.
- Calvi, M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J., J., Restrepo\_vezel, L., F., Crowley, H. 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, paper No 472 (43); pp. 75-104.
- Del Gaudio C., Ricci, P., Verderame, G., M. 2018. A class-oriented mechanical approach for seismic damage assessment of RC buildings subjected to the 2009 L'Aquila earthquake. *Bull of earth. Eng.* **16**; 4581-4605.
- Di Pasquale, G., Orsini, G., Romeo, W. 2005. New developments in seismic risk assessment in Italy. *Bull of earth Eng.* **3**; 101-128.
- Gruntal, G. 1998. Chaiers du centre europeen de geodynamique et de seismologie: vol. 15 – European Macroseismic Scale 1998. Luxemburg: Eur. Centr. For Geod. And Seismilogy.
- Jaiswal, K., Wald, D., D'Ayala D. 2011. Developing empirical collapse fragility functions for global buildings types. *Earthquake Spectra* **3**; 775-795.
- Kappos, A., J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos C., Penelis, G. 2006. A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bull of earth. Eng.* **4**; 391-413.
- Regio Decreto Legge Nov. 1937, n.2105. Norme tecniche di edilizia antisismica per i paesi colpiti da terremoti.
- Regio Decreto Legge Nov. 1939, n 2229. Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato.
- Rota, M., Penna, A., Strobbia, C., L. 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics and Earth. Engineering* **28**; 933-947.
- Sandoli, A., Calderoni, B. 2018. Assessment of the seismic vulnerability at territorial scale: a new structural-typological classification of existing buildings and definition of fragility curves. *10<sup>th</sup> International Masonry Conference (IMC)*. 9-11 Luglio, Milano.
- Sisma Bonus – Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni e i relativi allegati. D.M. 07/03/2017.
- Zuccaro, G., Dato F., Cacace, F., De Gregorio D., Sessa S. 2017. Seismic collapse mechanisms analyses and masonry structures typologies: a possible correlation. *Ingegneria sismica*.
- Zuccaro G., Cacace, F. 2015. Seismic vulnerability assessment based on typological characteristics. The first level procedure SAVE. *Soil Dynamics and Earth. Engineering* **69**; 262-269.