

## Progettazione integrata di interventi per il miglioramento delle prestazioni sismiche e termiche di edifici esistenti in c.a.

Angelo Masi<sup>1</sup>, Vincenzo Manfredi<sup>1</sup>, Giuseppe Ventura<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Scuola di Ingegneria, Università della Basilicata, Potenza

<sup>(2)</sup> Libero professionista, Potenza

*Keywords: edifici esistenti in c.a., progettazione integrata, adeguamento sismico, isolamento termico, tamponature*

### ABSTRACT

La maggior parte degli edifici italiani ad uso residenziale (77% circa) è stato realizzato prima del 1981, quando solo il 25% circa del territorio era classificato sismico. In aggiunta al deficit di protezione sismica, il patrimonio edilizio esistente è caratterizzato anche da un elevato deficit di protezione termica, essenzialmente derivante dal ritardo legislativo nell'adozione di opportuni criteri di progettazione dell'isolamento termico dell'involucro edilizio. L'importanza sociale derivante dalla grande quantità di edifici aventi ridotta protezione sia termica che sismica impone, pertanto, la necessità di definire criteri e tecniche di intervento che mirino alla riduzione della vulnerabilità sismica ed all'incremento dell'efficienza energetica nell'ambito di un approccio integrato. A tal fine, nel presente lavoro è stata valutata l'influenza sulle prestazioni sismiche di edifici esistenti in c.a. a seguito del miglioramento termico operato variando la tipologia dei pannelli di tamponatura in modo da soddisfare i requisiti previsti dalle attuali norme in materia di efficienza energetica. In considerazione delle migliori caratteristiche meccaniche associate generalmente alle tamponature aventi maggiori capacità isolamenti, l'intervento di miglioramento termico ha determinato anche un incremento della capacità sismica. Vanno tuttavia ulteriormente approfonditi alcuni aspetti relativi agli effetti locali causati dall'inserimento di pannelli di tamponatura più rigidi e resistenti.

### 1 INTRODUZIONE

La maggior parte degli edifici italiani ad uso residenziale (77% circa) è stato realizzato prima del 1981, quando solo il 25% circa del territorio era classificato sismico. Oltre quelli in muratura storica, gli edifici non protetti sismicamente sono strutture in c.a. realizzate negli anni successivi al dopoguerra che costituiscono una quota significativa del volume del patrimonio edilizio italiano. Come mostrato dagli ultimi eventi sismici, tali edifici sono frequentemente caratterizzati da una elevata vulnerabilità degli elementi strutturali e non strutturali che, in considerazione anche dei rilevanti livelli di esposizione, richiedono un diffuso piano di interventi per la mitigazione del rischio sismico.

In aggiunta al deficit di protezione sismica, il patrimonio edilizio esistente italiano è caratterizzato da un elevato deficit di protezione termica, derivante essenzialmente dal ritardo legislativo nell'adozione di opportuni criteri di progettazione dell'isolamento termico

dell'involucro edilizio. Infatti, la prima legge che, in modo organico, introdusse il tema del risparmio energetico nella progettazione edilizia risale al 1991 (Legge 10/1991), quando era stato già realizzato circa l'88% dell'attuale patrimonio edilizio residenziale. Successivamente, la normativa è stata aggiornata introducendo criteri di progettazione finalizzati a contenere le dispersioni termiche degli edifici e, in genere, ad aumentare l'efficienza energetica degli edifici.

In letteratura tecnica sono fornite un'ampia gamma di tecniche di intervento per la riduzione del deficit di protezione sismica (e.g. Fardis, 2009) e termica (e.g. Marino e Grieco, 2006) ma operando in modo disgiunto sui componenti dell'edificio che maggiormente ne influenzano le relative prestazioni. Tuttavia, considerazioni di carattere sociale ed economico legate alla grande quantità di edifici aventi prestazioni inadeguate sia termiche che sismiche richiedono fortemente che vengano definiti criteri e tecniche di intervento integrati in grado di conseguire, contemporaneamente, sia la riduzione della vulnerabilità sismica che l'incremento dell'efficienza energetica. La progettazione

integrata degli interventi di rafforzamento sismico/termico è un tema nuovo, poco investigato nel passato sia in Italia sia in altre parti del mondo. Di conseguenza, nel presente lavoro, con l'obiettivo di definire primi criteri di analisi e di intervento, dopo una breve descrizione dell'evoluzione delle prescrizioni finalizzate all'efficienza energetica degli edifici, sono state valutate le prestazioni termiche di alcuni componenti dell'involucro edilizio maggiormente disperdenti. Successivamente, nell'ambito di un approccio integrato alla progettazione degli interventi, sono state svolte alcune analisi tese a valutare l'influenza sulle prestazioni sismiche di alcune tecniche utilizzate per il miglioramento delle prestazioni termiche.

## 2 EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA SULL'EFFICIENZA ENERGETICA

In Italia, criteri per il dimensionamento dell'isolamento termico e, in genere, per l'efficienza energetica degli edifici sono stati introdotti per la prima volta con la Legge n. 373 del 1976, emanata sulla scia della prima grande crisi energetica del 1973. Attraverso tale norma, furono fissati i requisiti in termini di isolamento termico dell'involucro, con l'obiettivo di limitare la potenza termica installata dell'impianto di riscaldamento e, di conseguenza, i consumi.

Sull'onda del forte impatto derivante dai risultati dei primi studi sull'*effetto serra* e in conseguenza delle condizioni di conflitto ed instabilità nelle aree con la maggiore produzione di petrolio (es. Medio-oriente), nel 1991 fu emanata la Legge n. 10, attuativa del Piano Energetico Nazionale, prima legge quadro che regolava, e in parte regola ancora oggi, le modalità progettuali e la gestione del sistema edificio/impianto. Con essa fu introdotta la *prestazione energetica* degli edifici al fine di unire ai limiti sulla potenza anche quelli relativi al consumo energetico durante l'esercizio della climatizzazione invernale. In attuazione della Legge 10, nel 1993 fu emanato il DPR 412 (1993), attraverso il quale il territorio italiano fu suddiviso in 6 diverse zone climatiche (Fig. 1), in funzione del *numero di gradi giorno*, somma delle differenze tra la temperatura media giornaliera attesa durante l'anno e quella ambiente.

Successivamente, furono emanate alcune direttive europee e, in particolare, la direttiva 2002/91/CE (2002). Essa introdusse il *Certificato energetico degli edifici*, il quale doveva essere redatto

portando in conto, oltre al riscaldamento, i diversi usi energetici delle abitazioni (es. climatizzazione estiva, ventilazione, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria).



Figura 1. Zone climatiche individuate dal DPR 412/93.

In Italia tale direttiva fu recepita con il D.Lgs. 192/2005 e con il successivo D.Lgs. 311/2006. Tali provvedimenti stabilirono i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica. In particolare, il D.Lgs. 192 definì l'*Indice di prestazione energetica* (EP) e fissò i limiti della trasmittanza termica da rispettare nei tre anni successivi. Il D.Lgs. 311 definì l'*Attestato di qualificazione energetica* (AQE), documento riportante il fabbisogno energetico dell'abitazione e la verifica dei valori di trasmittanza disponibili rispetto ai limiti previsti.

In attuazione dei D.Lgs. sopra riportati, nel 2009 furono emanati il DPR 59 (2009) e il DM 26 giugno 2009. In quest'ultimo, in particolare, sono indicati i metodi e le procedure per la *certificazione energetica* degli edifici, effettuata in funzione dell'*indice di prestazione energetica globale* (EPgl) e classificata secondo sette intervalli (*classi prestazionali*). Secondo il D.Lgs. 28/2011, tali informazioni vanno messe a disposizione obbligatoriamente in sede di compravendita e locazione di abitazioni.

La Direttiva Europea 2010/31/EU (2010) fu introdotta in Italia con il DL n. 63 del 4.6.2013, il quale definì i criteri per la redazione dell'*Attestato di Prestazione Energetica* (APE), documento che

riporta il livello di efficienza energetica che caratterizza ciascuna nuova abitazione.

Attualmente, il quadro normativo esistente è stato integrato con altri tre decreti attuativi (DM 26 giugno 2015a, b, c) che definiscono le nuove modalità di calcolo delle prestazioni energetiche, i nuovi requisiti minimi di efficienza (sia per i nuovi edifici sia per quelli sottoposti a ristrutturazione, Tab. 1) e le nuove regole per la redazione dell'APE. Una novità importante è rappresentata dal *database nazionale dei certificati energetici* (SIAPE) che offrirà al cittadino, alle Amministrazioni e agli operatori immobiliari informazioni sull'efficienza degli edifici e degli impianti.

Tabella 1. Valori limite della trasmittanza termica utile U (espressa in  $[W/m^2K]$ ) previste dal DM del 26 giugno 2015 per ogni componente dell'involucro edilizio

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Finestre comprensive di infissi
		Coperture	Pavimenti	
A	0.45	0.38	0.46	3.20
B	0.45	0.38	0.46	3.20
C	0.38	0.36	0.40	2.40
D	0.34	0.30	0.32	2.00
E	0.30	0.25	0.30	1.80
F	0.28	0.23	0.28	1.50

Confrontando l'evoluzione del quadro normativo con l'età del patrimonio edilizio, appare evidente che la maggior parte degli edifici è caratterizzato da un significativo deficit di protezione termica. A tal proposito, in Fig. 2 si riporta la percentuale degli edifici italiani ad uso residenziale censiti dall'ISTAT (2001) suddivisi in tre periodi coerenti con l'ambito di applicazione temporale delle principali leggi sul risparmio energetico.

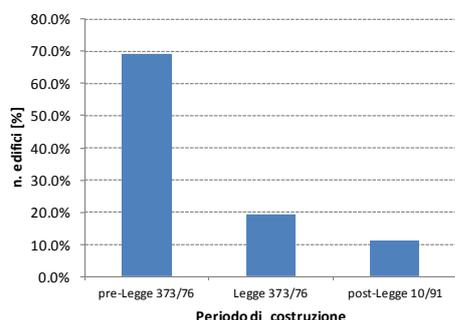


Figura 2. Distribuzione degli edifici residenziali in funzione delle principali norme sull'efficienza termica (elaborazione su dati ISTAT2001)

Dalla Fig. 2 risulta che il 70% del patrimonio edilizio nazionale è stato realizzato in epoca antecedente la prima legge sull'efficienza energetica in edilizia (Legge 373/76). Tale aliquota sale all'88% includendo gli edifici

costruiti prima della più recente Legge 10/91. Di conseguenza, solo una limitata percentuale (12% circa) è stata progettata seguendo moderni criteri per l'efficienza energetica.

### 3 PRESTAZIONI TERMICHE DI ALCUNE TIPOLOGIE DI TAMPONATURA

Tra i componenti degli edifici con struttura intelaiata le tamponature svolgono un ruolo fondamentale. Infatti, oltre ai ben noti effetti sulla risposta sismica (Fardis et al., 2000; Dolšek and Fajfar, 2001; Masi 2003), le tamponature, in considerazione della loro estensione e dei materiali generalmente utilizzati nella pratica edilizia, rappresentano uno dei componenti maggiormente disperdenti dell'involucro edilizio. Con l'evoluzione del quadro normativo italiano, nel corso degli anni le tamponature sono state realizzate adottando tipologie differenti (Masi et al., 2010). In particolare, al fine di ridurre la deformabilità delle strutture intelaiate, le strutture degli anni '30-'40 furono realizzate con pareti "monostrato" di mattoni o blocchi di pietra naturale o artificiale con spessore generalmente compreso tra 30 e 60cm (Fig. 3a). Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, la resistenza a compressione  $f_m$  varia tra 2.4 e 4.0N/mm<sup>2</sup>, il modulo di elasticità (E) tra 1200-1800N/mm<sup>2</sup>, mentre il peso di volume è generalmente 16kN/mc (Circolare 617, 2009). In termini di capacità isolante, per la tipologia di mattoni pieni a due teste (spessore 30cm) il valore medio della trasmittanza U è di 1.880W/m<sup>2</sup>K (Campioli et al., 2006a).

Dagli anni '50 in poi, la tamponatura monostrato è caduta in disuso a vantaggio delle pareti a più strati o "composite", in grado di garantire un maggior isolamento termico. Il sistema maggiormente diffuso di tamponatura composita è la muratura doppia, detta anche "a cassa vuota", composta da una parete esterna più spessa e robusta ed una parete interna più sottile e leggera, separate da una camera d'aria, per uno spessore complessivo di 25-30cm. La fodera esterna veniva usualmente realizzata in laterizio pieno/semipieno (Figura 3b) ovvero forato con spessore 12cm, ma a volte venivano usati anche blocchi di calcestruzzo alleggerito o tufo. Per il paramento interno era largamente diffuso l'utilizzo di laterizi forati disposti a coltello, usualmente con spessore 8cm. L'intercapedine, di spessore 5-10cm, era generalmente vuota.

Rispetto alla tipologia monostrato, la presenza del paramento con mattoni forati determina una riduzione delle proprietà meccaniche rispetto alle tamponature in mattoni pieni ma migliori proprietà termiche. Infatti, la resistenza a compressione dei pannelli di mattoni forati (in direzione perpendicolare ai fori) è circa  $1.2-2.2\text{N/mm}^2$ , il modulo di elasticità  $800-1500\text{N/mm}^2$  e il peso di volume  $8-9\text{kN/m}^3$  (Biondi et al., 2000; Colangelo, 2004, Calvi e Bolognini, 2001, Beconcini 2004). Per quanto riguarda la capacità isolante, la trasmittanza per la tipologia con paramento esterno in mattoni pieni è di  $1.590\text{W/m}^2\text{K}$ , mentre per quella con doppia fodera di mattoni forati è  $1.31\text{W/m}^2\text{K}$  (Campioli et al., 2006a). Tali valori sono relativi alla tipologia con intercapedine vuota.

A partire dagli anni '70, a seguito delle prime leggi sul risparmio energetico, entro l'intercapedine veniva inserito un pannello di materiale isolante (es. lana di vetro, lana di roccia, Fig. 3c), ovvero essa veniva completamente riempita con vermiculite o poliuretano. In funzione della conducibilità termica dello strato isolante ( $\lambda$ , espressa in  $[\text{W/mK}]$ ), tali tipologie presentano una significativa riduzione della trasmittanza termica. Ad esempio, in presenza di un pannello di lana di vetro ( $\lambda = 0.04\text{W/mK}$ ) di spessore 4cm, la trasmittanza termica della tipologia con doppia fodera di forati scende a  $0.71\text{W/m}^2\text{K}$ .

In considerazione della minore manutenzione richiesta rispetto ai rivestimenti di intonaco e pittura che usualmente vengono applicate sulle superficie esterne, attualmente hanno ampia diffusione le tamponature "a faccia vista", dove il paramento esterno è costituito da mattoni semipieni ad una o due teste (Figura 3d). La minore percentuale di foratura dei mattoni semipieni, unita alle peculiarità dell'impasto, determinano un incremento sia delle proprietà meccaniche che delle prestazioni termiche. In particolare, la resistenza a compressione dei mattoni semipieni in laterizio è  $5-8\text{N/mm}^2$ , il modulo di elasticità variabile da  $3500$  a  $5600\text{N/mm}^2$ , e il peso di volume  $9-13\text{kN/m}^3$  (Albanesi et al. 2007, Circolare 617/2009). Per quanto riguarda la trasmittanza termica di tale tipologia, considerando un paramento esterno di spessore 12cm, strato isolante con conducibilità termica  $\lambda=0.03\text{W/mK}$ , paramento interno di mattoni forati di 20cm, il valore è  $0.294\text{W/m}^2\text{K}$  (Monticelli, 2009).

A causa della rapidità di esecuzione, attualmente sono di largo impiego le tamponature realizzate con pareti monostrato di blocchi alveolari ad alta capacità termo-isolante, il cui spessore, unitamente all'intonaco di rivestimento e all'eventuale isolamento esterno (sistema a "cappotto"), è in genere variabile tra 30 e 45cm. Per pannelli di spessore 30cm, la resistenza a compressione (in direzione parallela ai fori) varia da  $5$  a  $7\text{N/mm}^2$ , il modulo di elasticità da  $4400$  a  $5200\text{N/mm}^2$  (Guidi et al., 2013), il peso è  $9-12\text{kN/m}^3$ . Per la medesima tipologia la trasmittanza vale  $0.340$  e  $0.250\text{W/m}^2\text{K}$  (Campioli et al., 2006b), rispettivamente per murature senza e con pannello isolante ( $\lambda = 0.04\text{W/mK}$ , spessore 6cm).

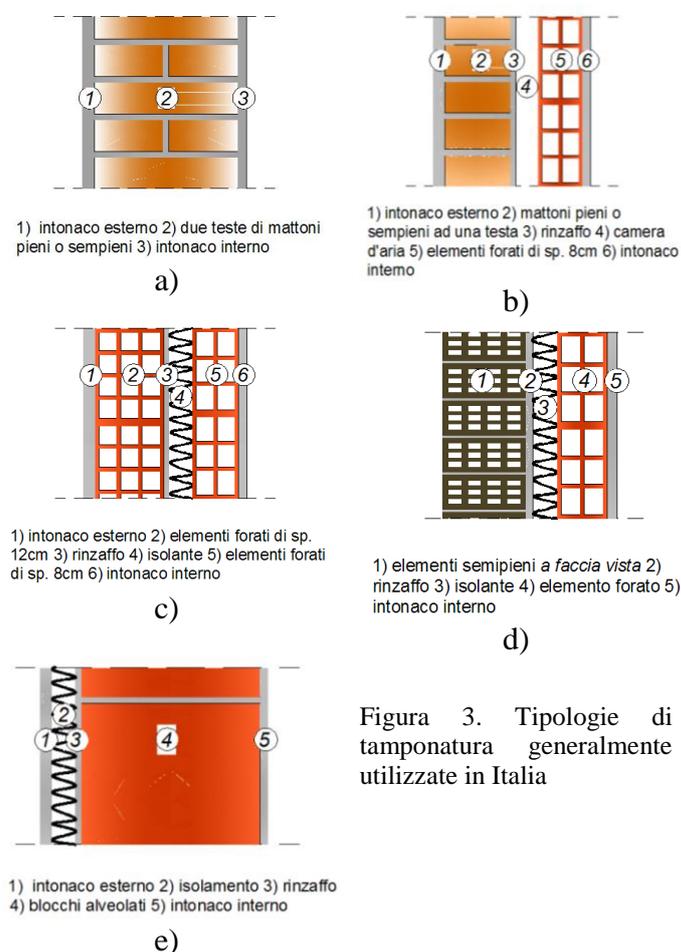


Figura 3. Tipologie di tamponatura generalmente utilizzate in Italia

Al fine di valutare le prestazioni termiche delle tipologie di tamponatura sopra descritte, nella Tabella 2 sono sintetizzati i valori della trasmittanza termica e il deficit di protezione termica valutato rispetto al valore limite previsto per strutture opache verticali dal DM 26.5.15 per zona climatica E ( $U=0.30\text{W/m}^2\text{K}$ ).

Dal confronto si riconosce che le tipologie realizzate nel passato presentano un elevato

deficit di protezione termica che varia da -527% per le tipologie in mattoni pieni a -136% per le prime tipologie "a cassa vuota" degli anni '70. Di contro, le tipologie d) e e) di più recente impiego rispettano i valori limite previsti dalle norme.

Tabella 2. Trasmittanza termica (U) e variazioni ( $\Delta U$ ) rispetto ai valori previsti per strutture opache verticali dal DM 26.6.15 per zona E ( $U_{Zona E} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) delle tipologie di tamponatura riportate in Fig. 3.

Tipologia	Trasmittanza termica U [W/m <sup>2</sup> K]	$U_{Zona E}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$\Delta U$ [%]
a	1.880	0.30	-527
b	1.590		-430
c	0.710		-136
d	0.294		+2
e	0.250		+16

#### 4 ANALISI DELLE PRESTAZIONI TERMICHE E SISMICHE ANTE- E POST-INTERVENTO

In considerazione della loro significativa superficie disperdente e del ruolo rilevante sulla risposta sismica locale/globale delle strutture intelaiate in c.a., e nell'ottica di un approccio integrato alla progettazione degli interventi, le tamponature appaiono i primi componenti degli edifici per i quali esaminare la mutua influenza sulle prestazioni sia termiche che sismiche.

A tal proposito, nel seguito sono state valutate le prestazioni (sismiche e termiche) di una tipologia edilizia, rappresentativa di edifici esistenti in c.a. ad uso residenziale, nella quale si prevede la sostituzione, parziale o totale, dei pannelli di tamponatura presenti con elementi aventi una minore trasmittanza al fine di conseguire il miglioramento delle prestazioni termiche.

##### 4.1 Descrizione dell'edificio

L'edificio analizzato appartiene ad una tipica tipologia residenziale realizzata in Italia negli anni '70. Esso ha forma in pianta rettangolare di dimensione 22.5 x 10.0m (direzione X e Y, rispettivamente, Fig. 4) e 4 livelli in elevazione.

Lo schema resistente è caratterizzato dalla presenza di telai portanti in c.a. solo lungo la direzione X, ortogonale all'orditura dei solai (direzione Y). Ciascun telaio ha 4 campate di 5m e una di 2.5m in corrispondenza del vano scala. Le travi dei telai portanti sono emergenti, con sezione 30x50cm. La sezione trasversale dei pilastri ha dimensione minima di 30cm mentre quella maggiore è variabile sia con la posizione in

pianta sia con la quota dell'impalcato. La scala è del tipo con trave a ginocchio (sezione 30x50cm) e gradini a sbalzo.

In direzione ortogonale (direzione Y), la struttura ha 2 campate di 5m ciascuna, con travi emergenti (sezione 30x50cm) solo in corrispondenza dei telai di testata. I solai sono del tipo misto calcestruzzo-laterizio di altezza totale di 22cm, di cui 4cm costituiscono la soletta di ripartizione.

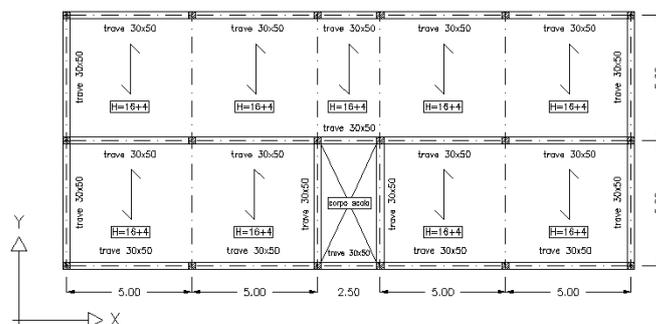


Figura 4. Schema strutturale tipo delle tipologie analizzate

La chiusura perimetrale dell'edificio è realizzata con pannelli di tamponatura composti da due paramenti di laterizi forati, uno esterno di spessore 12cm e uno interno di spessore 8cm, con camera d'aria interposta di 10cm. Lo spessore complessivo è 30cm. Le caratteristiche termiche e meccaniche della tamponatura considerate sono coerenti con quanto descritto nel paragrafo 4 per la tipologia c).

Al fine di conseguire un miglioramento delle prestazioni termiche dell'edificio, il pannello esterno (spessore 12cm) è stato sostituito con uno di spessore 20cm avente una minore trasmittanza termica. La seconda modalità di intervento prevede la sostituzione completa della tamponatura esistente (fodera esterna ed interna, 12+8cm) con un pannello "monostrato" di spessore 30cm con elevate proprietà isolanti.

##### 4.2 Modellazione e criteri di analisi

Le analisi sismiche sono state eseguite con il codice SAP2000 (2014). Gli elementi in c.a. sono stati modellati con elementi finiti tipo *beam* definiti attraverso le dimensioni delle sezioni trasversali e dei parametri meccanici del calcestruzzo (modulo di elasticità E, coefficiente di Poisson  $\nu$ , modulo di elasticità tangenziale G). I pannelli di tamponatura sono stati modellati attraverso una coppia di bielle congiungenti i nodi lungo la diagonale del reticolo strutturale (modello "a puntone equivalente"), le cui sezioni hanno dimensioni pari allo spessore (t) e

larghezza ( $w$ ) della tamponatura, quest'ultimo valore valutato in funzione delle proprietà meccaniche delle tamponature considerate e delle caratteristiche inerziali degli elementi resistenti del telaio secondo l'espressione di Mainstone (1971). In considerazione della presenza di numerose ed ampie aperture nella direzione longitudinale, solo le tamponature disposte in direzione trasversale (dir. Y, Fig. 4) sono state portate in conto nel modello di calcolo.

Al fine di analizzare la risposta non-lineare delle strutture, alle estremità di ciascun elemento resistente è stata definita una cerniera plastica Momento-Rotazione  $M-\theta$ . I valori dei momenti e delle rotazioni sono stati calcolati assumendo un valore della resistenza media del calcestruzzo pari a  $18\text{N/mm}^2$ , valore ragionevolmente atteso nelle strutture degli anni '70. Analogamente, in considerazione della qualità dell'acciaio adottato all'epoca di costruzione, è stato assunto un valore della resistenza allo snervamento pari a  $400\text{N/mm}^2$ .

Il valore del fattore di confidenza FC è stato assunto pari ad uno (LC3, livello di conoscenza *accurato*).

Per il puntone di tamponatura è stato adottato un legame costitutivo monotonic sforzo normale-spostamento assiale (F-d, Fig. 5) definito a partire dal modello descritto in Masi e Vona (2004).

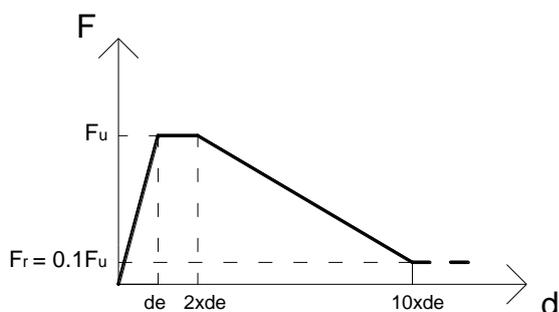


Figura 5. Legame costitutivo del puntone di tamponatura

Le grandezze caratteristiche del legame F-d adottato sono state di volta in volta valutate in funzione della tipologia di tamponatura adottata. A tal proposito, la Tab. 3 riporta la resistenza a compressione ( $f_w$ ) e il modulo di elasticità ( $E$ ) dei pannelli di tamponatura adottati nelle diverse configurazioni, valutati a partire dai valori riportati nel paragrafo 3. La Tab. 3 riporta, inoltre, lo spessore ( $t$ ) e la larghezza ( $w$ ) del puntone diagonale equivalente con il quale è stata modellata la tamponatura.

Tabella 3. Proprietà meccaniche e dimensioni della sezione del puntone equivalente della tamponatura

<i>Schema</i>	<i>t</i> [m]	<i>w</i> [m]	<i>f<sub>w</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>E</i> [N/mm <sup>2</sup> ]
<i>SF</i>	0.20	0.61	1.2	1800
<i>SP</i>	0.28	0.58	2.6	2700
<i>SC</i>	0.30	0.56	6.0	4300

Le prestazioni ante- e post-intervento di sostituzione delle tamponature sono state valutate con riferimento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV), secondo quanto prescritto dalla norma NTC2008 (DM 14/1/2008) e relativa circolare n. 617/09 (2009). In particolare, per gli elementi con comportamento *duttile* la verifica è stata condotta in termini di deformazione, mentre per gli elementi *fragili* in termini di sollecitazioni. La risposta sismica è stata valutata attraverso il metodo di analisi statica non lineare, secondo le indicazioni riportate nella circolare n.617/09 (§C7.3.4). A partire dalla curva push-over è stata definita la bilatera equivalente la cui costruzione, unitamente alla definizione dello spettro elastico in pseudo-accelerazione (assunto coerentemente con la forma definita dall'EC8 per sottosuolo di categoria A), ha permesso di determinare il punto di prestazione in corrispondenza del quale il primo elemento strutturale raggiunge lo SLV.

Per quanto riguarda le prestazioni termiche, per ogni configurazione analizzata è stata calcolata la trasmittanza termica ( $U$ ) con riferimento ai soli pannelli di tamponatura. In particolare, in condizioni stazionarie, tale valore è stato ottenuto attraverso la seguente espressione:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (1)$$

dove:

$\alpha_i$  è il coefficiente di adduzione interna;

$\alpha_e$  è il coefficiente di adduzione esterna;

$s_k$  è lo spessore del k-esimo strato della parete;

$\lambda_k$  è la conducibilità del materiale del k-esimo strato della parete.

I valori della conducibilità e gli altri parametri utili per la determinazione della trasmittanza delle tipologie di tamponature considerate sono stati valutati a partire da quanto riportato nel par. 3.

#### 4.3 Prestazioni termiche e sismiche

Con riferimento ai soli pannelli di tamponatura e trascurando ogni altro componente disperdente dell'edificio (finestre, ponti termici, ecc.), la

trasmissione termica relativa allo *stato di fatto* (SF) è  $1.31\text{W/m}^2\text{K}$ , valore significativamente superiore ai limiti previsti dal DM 26.6.2015, attualmente vigente, per ogni zona climatica (Tab. 4), con differenze comprese tra il 190 e il 370% circa. La sostituzione della sola foderina esterna (*sostituzione parziale* SP) con un blocco forato di 20cm avente una maggiore capacità isolante rispetto a quello presente nello stato di fatto, unitamente ad uno strato di 4cm posto sulla superficie esterna (sistema a cappotto) avente una conducibilità termica  $\lambda$  di  $0.04\text{W/mK}$ , determina una significativa riduzione (-69%) della trasmissione termica della tamponatura ( $U=0.398\text{W/m}^2\text{K}$ ) rispetto alla configurazione originaria. In tal modo, nella configurazione post-intervento si ottiene un valore della trasmissione accettabile, seppur di poco inferiore, per le zone termiche (A e B), ma superiore rispetto alle altre zone, con variazioni comprese tra il +5 e il +42%.

Tabella 4. Differenze percentuali tra i valori della trasmissione termica delle diverse configurazioni analizzate rispetto ai limiti previsti per le diverse zone climatiche

Zona climatica	Differenze [%]		
	SF $U=1.310\text{W/m}^2\text{K}$	SP $U=0.398\text{W/m}^2\text{K}$	SC $U=0.258\text{W/m}^2\text{K}$
<b>A</b> $U=0.45\text{W/m}^2\text{K}$	+191.1	-11.6	-42.7
<b>B</b> $U=0.45\text{W/m}^2\text{K}$	+191.1	-11.6	-42.7
<b>C</b> $U=0.38\text{W/m}^2\text{K}$	+244.7	+4.7	-32.1
<b>D</b> $U=0.34\text{W/m}^2\text{K}$	+285.3	+17.1	-24.1
<b>E</b> $U=0.30\text{W/m}^2\text{K}$	+336.7	+32.7	-14.0
<b>F</b> $U=0.28\text{W/m}^2\text{K}$	+367.9	+42.1	-7.9

Nel caso di *sostituzione completa* (SC) della tamponatura esistente, il valore della trasmissione termica della tipologia "monostrato" di spessore 30cm con elevata capacità isolante, unitamente ad uno strato isolante "a cappotto" di spessore 4cm e conducibilità termica  $\lambda$  di  $0.04\text{W/mK}$ , è  $0.258\text{W/m}^2\text{K}$ , inferiore di circa l'80% rispetto alla configurazione originaria. In questa configurazione il valore della trasmissione è sempre inferiore rispetto al limite previsto dalla norma per ogni zona climatica con differenze comprese tra il -8 e il -43%.

Con riferimento alla direzione minore della struttura, dalle analisi sismiche svolte per la configurazione originaria è emerso che il periodo di vibrazione vale 0.81s, mentre il valore

massimo del taglio alla base è  $1090\text{kN}$  (Fig. 6). In tale configurazione, oltre alle non adeguate prestazioni termiche, l'edificio presenta un valore molto basso della accelerazione che produce lo SLV, ossia  $a_g=0.05\text{g}$ . In corrispondenza di tale valore, i pilastri della scala, a causa della loro notevole rigidità e in considerazione degli sforzi trasferiti dagli elementi inclinati della trave a ginocchio, sono sottoposti ad elevati valori del taglio agente maggiori di quelli resistenti, determinando una crisi fragile. Tale comportamento caratterizza anche le altre configurazioni ottenute sostituendo parzialmente o completamente la tamponatura. Pertanto, al fine di valutare gli effetti sulle prestazioni sismiche determinati dalla sostituzione delle tamponature, è stato necessario considerare l'esecuzione preventiva di un intervento di rafforzamento locale per evitare la crisi fragile dei pilastri della scala.

Con tale assunzione, nella configurazione originaria (SF), la crisi degli elementi duttili è raggiunta a partire da valori di  $a_g \geq 0.22\text{g}$ .

La sostituzione del solo pannello esterno (SP) determina una riduzione del periodo di vibrazione (0.71sec, -12%) ed un aumento del taglio massimo alla base ( $1340\text{kN}$ , +23%) rispetto alla configurazione originaria (SF). In termini di accelerazione al suolo che determina la prima crisi (duttile) della struttura, l'inserimento di pannelli di tamponatura più rigidi e resistenti determina un leggero incremento del valore di  $a_g$ , che sale a  $0.25\text{g}$  (+14%).

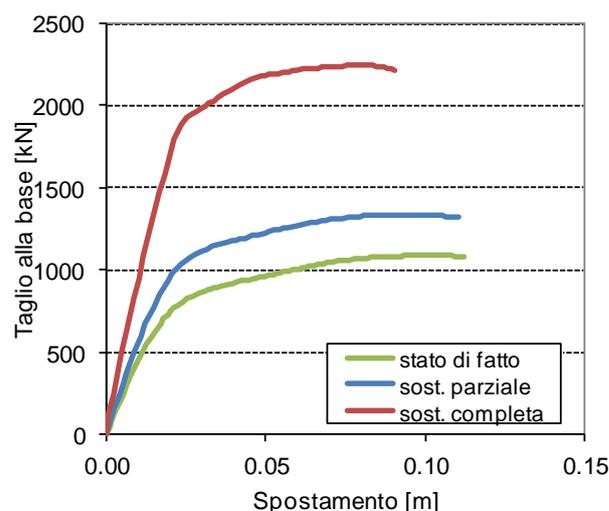


Figura 6. Curve push-over relative alle diverse configurazioni analizzate.

Una ulteriore riduzione del periodo ed un significativo incremento del taglio alla base si ottiene nel caso di sostituzione completa della

tamponatura (SC). In particolare, le migliori proprietà meccaniche del blocco di tamponatura adottato (spessore 30cm) in sostituzione delle due fodere esistenti (8+12cm) determinano un periodo di vibrazione di 0.51s, minore di circa il 32% rispetto alla configurazione originaria ( $T=0.81s$ ). Per la medesima configurazione, il taglio alla base è 2250kN (Fig. 6), maggiore di circa il 105% rispetto allo stato di fatto (1090kN). In termini di accelerazione al suolo corrispondente allo SLV, la sostituzione completa determina un incremento di circa il 32% del valore di  $a_g$ , che sale a 0.29g.

Al fine di valutare gli effetti dell'intervento proposto in termini di miglioramento dell'isolamento termico e di riduzione del deficit di protezione sismica, nel seguito i valori della trasmittanza  $U$  e della pseudo accelerazione  $a_g$  riferiti alle diverse configurazioni (SF, SP, SC) sono stati confrontati con i corrispondenti valori previsti per la città de L'Aquila. In particolare, per quanto riguarda i valori limite della trasmittanza  $U$ , secondo il DPR 412/1993, la città de L'Aquila ricade nella zona climatica E, a cui corrisponde un valore pari a  $0.30W/m^2K$ . Per quanto riguarda la pericolosità sismica, assumendo come riferimento il sito del municipio de L'Aquila con categoria di sottosuolo A e topografica T1, il valore di  $a_g$  previsto dalla OPCM3519 (2006) - riferito ad un periodo di ritorno ( $T_R$ ) di 475anni - è 0.261g.

La Tabella 4 riporta il valore del rapporto  $\beta_{termico}$  tra la trasmittanza richiesta per la città de L'Aquila ( $U_{richiesta}$ ) e quella valutata per le diverse configurazioni analizzate ( $U_{disponibile}$ ). Un valore di  $\beta_{termico}$  minore dell'unità rappresenta la condizione di deficit di isolamento termico, tanto maggiore quanto minore è il valore di  $\beta_{termico}$ ; di contro, un valore maggiore o uguale all'unità determina la condizione di "adeguamento termico", ossia il soddisfacimento dei requisiti previsti dalla norma in materia di riqualificazione energetica.

Allo stesso modo, la Tabella 4 riporta il valore  $\alpha_{sismico}$ , definito come rapporto tra l'accelerazione spettrale corrispondente allo SLV ( $a_{g,SLV}$ ) valutato per le diverse configurazioni e quella attesa al sito con periodo di ritorno di 475 anni ( $a_{g,475anni}$ ). Un valore di  $\alpha_{sismico}$  minore dell'unità rappresenta la condizione di deficit di protezione sismico, tanto maggiore quanto minore è il valore di  $\alpha_{sismico}$ ; di contro, un valore maggiore o uguale all'unità determina la condizione di adeguamento sismico.

Tabella 4. Variazioni percentuali tra i valori della trasmittanza termica delle diverse configurazioni analizzate rispetto ai limiti previsti per le diverse zone climatiche

	SF	SP	SC
$U_{disponibile}$ [ $W/m^2K$ ]	1.310	0.398	0.258
$U_{richiesta}$ [ $W/m^2K$ ] (L'AQUILA-ZONA E)		0.300	
$\beta_{termico}$ ( $U_{rich}/U_{disp}$ )	<b>0.23</b>	<b>0.75</b>	<b>1.16</b>
$a_{g,SLV}$ [g]	0.220	0.250	0.290
$a_{g,475anni}$ [g] (L'AQUILA)		0.261	
$\alpha_{sismico}$ ( $a_{g,SLV}/a_{g,475anni}$ )	<b>0.84</b>	<b>0.96</b>	<b>1.11</b>

I risultati mostrano che, nel caso in esame, la struttura nella configurazione iniziale presenta un significativo deficit di isolamento termico ( $\beta_{termico}=0.23$ ). La sostituzione parziale delle tamponature (SP) migliora significativamente l'isolamento termico ( $\beta_{termico}=0.75$ ) fino a determinare una condizione di adeguamento ai valori attualmente previsti per la riqualificazione di edifici esistenti nel caso di sostituzione completa ( $\beta_{termico}=1.16$ ).

Un simile andamento, anche se con variazioni inferiori, è stato valutato anche in termini di prestazioni sismiche. Infatti, a partire dal valore di  $\alpha_{sismico}=0.84$  relativo alla configurazione originaria (SF), nella configurazione SP il valore di  $\alpha_{sismico}$  è 0.96 (miglioramento sismico) e raggiungere il valore di 1.11 (adeguamento sismico) in caso di sostituzione completa (SC).

## 5 CONCLUSIONI

In Italia, a causa del ritardo sia nella classificazione sismica del territorio che nell'introduzione di criteri di progettazione per l'efficienza energetica, la maggior parte del patrimonio edilizio presenta caratteristiche inadeguate per l'isolamento termico e una ridotta protezione nei confronti delle azioni sismiche. L'entità del deficit di protezione per entrambe le problematiche impone, di conseguenza, la necessità di definire tecniche di intervento integrato che riescano al contempo a migliorare le prestazioni sismiche e termiche.

A tal fine, nel presente lavoro sono stati illustrati i risultati di alcune analisi preliminari finalizzate a valutare le eventuali influenze sulle prestazioni sismiche derivanti dall'adozione di alcune tecniche per il miglioramento

dell'isolamento termico degli edifici. In particolare, per una tipologia edilizia in c.a. progettata a soli carichi verticali e tipica degli anni '70, è stato progettato un intervento di riqualificazione termica sostituendo parzialmente (SP) o completamente (SC) le tamponature con blocchi aventi migliori caratteristiche termiche.

A partire dal valore della trasmittanza delle tamponature di  $1.31 \text{ W/m}^2\text{K}$  relativa alla configurazione originaria, la sostituzione parziale (ossia solo la fodera esterna) e completa delle tamponature determina una riduzione del 69% e dell'80% della trasmittanza, rispettivamente.

Oltre a migliori proprietà termiche, i blocchi che generalmente vengono utilizzati nelle riqualificazioni energetiche degli edifici hanno anche migliori caratteristiche meccaniche. Di conseguenza, la maggiore rigidità e resistenza dei pannelli di tamponatura realizzati con i nuovi blocchi ha modificato la risposta sismica delle strutture rispetto alla configurazione originaria, determinando un aumento dell'accelerazione al suolo corrispondente allo SLV. In particolare, i valori  $a_{g,SLV}$  nelle configurazioni SP e SC sono  $0.25g$  e  $0.29g$ , rispettivamente maggiori del 13% e del 32% rispetto al valore della configurazione originaria ( $0.22g$ ). Appare utile evidenziare che tali valori sono riferiti alla crisi duttile degli elementi della struttura mentre la crisi degli elementi fragili (pilastri della scala) si sarebbe attinta per valori di  $a_g$  significativamente inferiori (circa  $0.05g$ ). Pertanto, al fine di valutare l'effetto sulle prestazioni sismiche derivante dalla sostituzione delle tamponature, le analisi sono state svolte assumendo la presenza di un intervento di rafforzamento locale che incrementa la capacità a taglio degli elementi della scala.

L'efficacia dell'intervento integrato proposto è stato valutato con riferimento alla città di L'Aquila. In particolare, confrontando i valori della trasmittanza  $U$  con i valori corrispondenti previsti dalle attuali norme è emerso che, a partire da un significativo deficit di isolamento termico relativo alla configurazione originaria ( $SF$ ,  $\beta_{termico}=0.23$ ), la sostituzione parziale delle tamponature determina un significativo miglioramento delle prestazioni termiche (SP,  $\beta_{termico}=0.75$ ), fino a raggiungere una condizione di "adeguamento termico" nel caso di sostituzione completa (SC,  $\beta_{termico}=1.16$ ). Un simile andamento, sebbene con variazioni più limitate, è stato valutato in termini di prestazioni sismiche. Infatti, a partire da un valore di  $\alpha_{sismico} = 0.84$

relativo allo stato di fatto, la sostituzione parziale determina un valore di  $\alpha_{sismico}=0.96$  mentre, nel caso di sostituzione completa,  $\alpha_{sismico}$  diventa maggiore di, ossia circa 1.11, dunque riconducibile ad una condizione di adeguamento sismico.

Ulteriori analisi dovranno essere eseguite al fine di estendere il campione delle tipologie esaminate e per meglio mettere in luce eventuali criticità derivanti dalle soluzioni di intervento proposte. A tal proposito appare necessario valutare le prestazioni della struttura con riferimento ai nodi trave-pilastro, il cui stato di sollecitazione può essere modificato in modo rilevante in presenza di pannelli di tamponatura più rigidi e resistenti. Inoltre, si dovranno esplorare e dettagliare altre tecniche di intervento integrato ancor più in grado di operare prevalentemente dall'esterno. A tal proposito, la tecnica del "doppio involucro" (ovvero del *telaio ausiliario*) appare particolarmente promettente nell'ambito di un approccio integrato teso ad aumentare la protezione sismica e l'isolamento termico delle strutture esistenti in c.a..

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro riportato nel presente articolo è stato eseguito nell'ambito del progetto DPC-ReLUIS 2014-16, PR2 Costruzioni in c.a., WP4 Tecniche/Strategie di Intervento.

## REFERENCES

- Albanesi T., Bergami A. V., Nuti C., Biondi S., Candigliota E., 2007. Caratterizzazione teorico-sperimentale di tamponature in laterizio per telai in cemento armato, *atti del XII Convegno ANIDIS "L'Ingegneria sismica in Italia"*.
- Beconcini M. L., 2004. Resistenza a forze orizzontali di pareti in elementi forati di laterizio, *disponibile al sito internet [www.laterizio.it](http://www.laterizio.it)*.
- Biondi S., Colangelo F., Nuti C., (A cura di) 2000. La risposta sismica dei telai con tamponature murarie, *CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Roma, 2000, 179 pp.*
- Campioli A., Ferrari S., Lavagna M., 2006a. Il D.Lgs 192/2005 e le chiusure verticali opache. Come si cambia, *Costruire n. 277-giugno 2006*.
- Campioli A., Ferrari S., Lavagna M., Monticelli C., Morello E., 2006b. Involucro in laterizio. Ricette di chiusura, *Costruire n. 281-ottobre 2006*.
- Calvi G. M., Bolognini D., 2001. Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels, *Journal of Earthquake Engineering*, 5: 2, 153-185.
- Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le

- Costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009, Supplemento Ordinario n. 27*
- Colangelo F., 2004. Stima della resistenza a compressione delle tamponature, *Costruire in Laterizio n. 97/2004*.
- DPR n. 412 del 26 agosto 1993. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9.1.91, n. 10, *GU n.242 del 14-10-1993 – S.O. n. 96*.
- Decreto legislativo n. 192 del 19 agosto 2005. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia, *GU n.222 del 23-9-2005 - Suppl. Ordinario n. 158*.
- Decreto legislativo n. 311 del 29 dicembre 2006. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo n. 192 del 2005, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia, *G.U. 1 febbraio 2007, n. 26*.
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 59 del 2 aprile 2009. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, *GU n.132 del 10-6-2009*.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26 giugno 2009. Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, *G.U. n. 158 del 10 luglio 2009*.
- Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE, *GU n.71 del 28-3-2011 - Suppl. Ordinario n. 81*.
- Decreto Legge n. 63 del 4 giugno 2013. Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale, *GU n.130 del 5-6-2013*.
- Decreto interministeriale 26 giugno 2015a. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, *in stampa sulla GU, disponibile al sito <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/>*
- Decreto interministeriale 26 giugno 2015b. Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici, *in stampa sulla G.U., disponibile in <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/>*
- Decreto interministeriale 26 giugno 2015c. Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, *in stampa sulla GU, disponibile al sito <http://www.sviluppoeconomico.gov.it/>*
- Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia, *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea n. L1 del 04/01/2003*.
- Direttiva 2010/31/EU del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulle prestazioni energetiche nell'edilizia, *GU Unione Europea n. L53 del 18.6.2010*.
- Dolšek M., Fajfar P., 2001. Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames, *Journal of Earthquake Engineering*, 5, 1-12.
- Fardis, M.N., 2009. Seismic design, Assessment and Retrofitting of Concrete Building, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering 8, *Springer Science+Business Media B.V.*
- Fardis M. N., 2000. Design provisions for masonry-infilled RC frames, *12th WCEE*, paper n. 2553.
- Guidi G., da Porto F., Dalla Benetta M., Verlato N., Modena C., 2013. Comportamento sperimentale nel piano e fuori dal piano di tamponamenti in muratura armata e rinforzata, *atti del XV Convegno ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia", Padova*.
- Legge n. 10 del 9 gennaio 1991. Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, *GU n.13 del 16-1-1991 - Suppl. Ordinario n. 6*.
- Legge n. 373 del 30 marzo 1976. Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici, *GU n.148 del 7-6-1976*.
- Mainstone R.J., 1971. On the stiffness and strength of infilled frames, *proceedings of the Institution of Civil Engineers, Supplement (IV)*—London; 7360S: 57-89.
- Marino F. P. R., Grieco M., 2006. La certificazione energetica degli edifici e il D.Lgs 192 del 19/8/2005, *EPC Libri 2006*.
- Masi A., 2003. Seismic vulnerability assessment of gravity load designed R/C frames, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(3), 371-395.
- Masi A., Vona M., 2004. Vulnerabilità sismica di edifici in c.a. realizzati negli anni '70, *atti del 11° Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova*.
- Masi A., Manfredi V., Vona M., Braga F., Salvatori F., 2010. Prestazioni degli elementi non strutturali negli edifici in c.a.: implicazioni progettuali e costruttive alla luce dell'esperienza del terremoto dell'Abruzzo 2009, *Progettazione Sismica n. 3/2010, 51-66.2*.
- Monticelli C., 2009. Il comportamento energetico di pareti C.in laterizio a vista, *Costruire in Laterizio, n. 127 - gennaio/febbraio 2009*.
- NTC-08, 2008. Decreto ministeriale 14 gennaio 2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni NTC2008, *Supplemento ordinario n. 30 Gazzetta Ufficiale 4 febbraio 2008, n 29*.
- OPCM n.3519, 2006. Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone, *G.u. n. 108, 11 maggio 2006*.
- SAP2000 Ultimate 16.1.0, Structural Analysis Program, Copyright 1976-2014 Computer and Structures Inc.