

# Miglioramento e adeguamento sismico di edifici contemporanei mediante approccio integrato energetico, architettonico e strutturale con soluzioni a doppio involucro a minimo impatto ambientale

Sustainable seismic retrofit of modern RC buildings through an integrated structural, energetic and architectural approach adopting external engineered double skin façades

Francesca Feroldi<sup>1</sup>, Alessandra Marini<sup>2</sup>, Andrea Belleri<sup>3</sup>, Chiara Passoni<sup>4</sup>, Paolo Riva<sup>4</sup>, Marco Preti<sup>5</sup>, Ezio Giuriani<sup>5</sup>, Giovanni Plizzari<sup>5</sup> ■

## Sommario

Le costruzioni in cemento armato rappresentano circa il 50% del patrimonio edilizio esistente, realizzato soprattutto durante la seconda metà del ventesimo secolo. Tali edifici hanno esaurito la loro vita utile (50-60 anni secondo gli attuali standard normativi) e presentano carenze sia dal punto di vista strutturale che energetico, inoltre la loro gestione in termini di impiego di risorse energetiche risulta essere poco sostenibile. L'articolo in oggetto rappresenta un tentativo di risposta al recupero di questo patrimonio edilizio mediante soluzioni integrate a doppio involucro finalizzate alla riqualificazione strutturale, energetica ed architettonica degli edifici e alla valorizzazione dei relativi contesti urbani. La tecnica di intervento è proposta come soluzione per un caso studio di riferimento, applicabile a tutti gli edifici di scarsa qualità architettonica appartenenti alle tipologie edilizie tipiche del secondo dopoguerra, e modulabile in funzione del contesto geografico, urbanistico e climatico, nonché in base alla pericolosità sismica. La soluzione si pone come alternativa ai tradizionali interventi di demolizione e ricostruzione, o alla riqualificazione solo architettonica ed energetica.

**Parole chiave:** Riqualificazione sostenibile edifici esistenti, doppio involucro strutturale-tecnologico, edifici in c.a. del secondo dopoguerra, miglioramento e adeguamento sismico, approccio integrato struttura - energia.

## Abstract

*The buildings built in Italy after the II world-war represent about 50% of the existing building stock; the typical structural layout is constituted by RC frames with masonry infills. After a service life of approximately 50-60 years, these buildings show structural and energy deficiencies compared to current standards and their maintenance is considered not sustainable. The aim of the research is promoting sustainable renewal and requalification of the aforementioned residential buildings by adopting double skin façade solutions for structural strengthening, energy efficiency upgrade and architectural renewal. The investigated technique can be considered as a paradigmatic solution which can be referred to for the rehabilitation of degraded RC building, easily adaptable to comply with different geographical, climatic and urban contexts, and with different seismic intensity levels. The proposed solution represents a sustainable alternative to the traditional demolition-reconstruction interventions and provides an holistic energy, architectural and structural rehabilitation.*

**Keywords:** Sustainable requalification of modern R.C. buildings, structural-technological double skin façades, modern R.C. buildings, seismic retrofit, Integrated structural and energetic retrofit approach.

<sup>1</sup> Dip. di Ing. Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica - Università degli Studi di Brescia - ✉ [f.feroldi002@unibs.it](mailto:f.feroldi002@unibs.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Bergamo - ✉ [alessandra.marini@unibg.it](mailto:alessandra.marini@unibg.it)

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Bergamo - ✉ [andrea.belleri@unibg.it](mailto:andrea.belleri@unibg.it)

<sup>4</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Bergamo

<sup>5</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica - Università degli Studi di Brescia

## 1. Introduzione

Il recupero degli edifici in calcestruzzo armato (c.a.) è un tema di grande attualità, poiché interessa un vasto patrimonio edilizio costruito negli anni del II dopoguerra (Figura 1; Agenzia del Territorio, 2011).

In particolare, gli edifici in c.a. del II dopoguerra sono stati costruiti nella maggior parte con caratteristiche architettoniche e costruttive di scarsa qualità per far fronte alla grande domanda immobiliare dell'epoca; tipicamente si tratta di edifici multipiano, caratterizzati da deficit energetici e scarsi livelli di comfort, principalmente dovuti ad involucri fortemente disperdenti e all'obsolescenza della dotazione impiantistica e delle finiture (PRIN 2009). Tali edifici sono frequentemente ubicati in contesti urbani degradati e hanno numerose carenze anche dal punto di vista strutturale (Vona e Masi, 2004a; Vona e Masi, 2004b; Ricci, 2010; Vona, 2002; Fisciano, 2007; Calvi et al., 2001; Kunnath et al., 2005), tanto che spesso non soddisfano i requisiti di sicurezza nei confronti dei carichi verticali, non sono stati concepiti per resistere ad azioni sismiche ed hanno inoltre esaurito la loro vita utile (50 anni) secondo le prescrizioni di norma (NTC2008). Attualmente, in Europa, il problema dell'elevata vulnerabilità sismica è molto sentito nelle aree del Mediterraneo, in particolare in Italia, Grecia e Turchia, sebbene le aree interessate siano destinate ad aumentare sia per la nuova zonazione sismica in corso di pubblicazione che inasprisce la pericolosità dell'intero continente (Solomos et al., 2008), sia per il fenomeno del fracking associato alle attività estrattive.

In tale scenario emerge chiaramente la necessità di intervenire per fare fronte alle carenze prestazionali e strutturali degli edifici del secondo dopoguerra e per ridurre gli attuali insostenibili sprechi energetici attraverso operazioni di riqualificazione.

Interventi di demolizione e ricostruzione non

sono percorribili, almeno su larga scala, per problemi di sostenibilità legati prevalentemente allo smaltimento di macerie e rifiuti e al consumo di materie prime. A tal riguardo è interessante osservare che, se è ormai riconosciuto come il settore dell'edilizia impatti in modo significativo sull'ambiente in ogni fase del ciclo di vita (dalla progettazione iniziale, al reperimento di materie prime, alla costruzione, al funzionamento e manutenzione fino alla dismissione, demolizione e smaltimento), le fasi che producono i più alti quantitativi di rifiuti siano proprio la demolizione - ricostruzione (Eurostat, 2013; JRC, 2013). I rifiuti generati dalla costruzione e demolizione o decostruzione di edifici e altre infrastrutture rappresentano circa un terzo dei rifiuti prodotti all'interno dell'Unione Europea (si stima, per la sola fase di costruzione, la produzione media di circa 15-20 m<sup>3</sup> di rifiuti per 100 m<sup>2</sup> di superficie - circa 100-150 kg/m<sup>2</sup> (Marini et al., 2014)). Questi dati evidenziano chiaramente la necessità di studiare soluzioni alternative alla demolizione e ricostruzione per il recupero degli edifici esistenti.

Negli ultimi decenni si è assistito a una crescente sensibilità rispetto al tema della riqualificazione sostenibile, quasi sempre però associata a strategie di riduzione del consumo energetico, soprattutto grazie all'uso di energie rinnovabili e di materiali ecocompatibili. In tale contesto le problematiche legate alle carenze strutturali degli edifici vengono spesso trascurate o poste in secondo piano, sebbene in taluni casi siano gravi ed evidenti. La necessità del rinforzo strutturale è tanto importante da rendere inadeguato ogni intervento rivolto alla sola riqualificazione energetica e architettonica. Inevitabile il riferimento ai danni provocati dai recenti terremoti che hanno enfatizzato questo concetto: il terremoto del 2012 in Emilia Romagna, per esempio, ha mostrato numerosi edifici crollati o molto danneggiati sui

Figura 1  
a) Suddivisione del patrimonio edilizio italiano e dell'edificato in c.a. per data di costruzione: di circa 9 milioni di edifici non progettati per resistere ai carichi orizzontali, circa 1,8 milioni sono in c.a.;  
b) Tipico comparto edilizio realizzato nel secondo dopoguerra (l'immagine raffigura il quartiere Casazza a nord della periferia di Brescia).

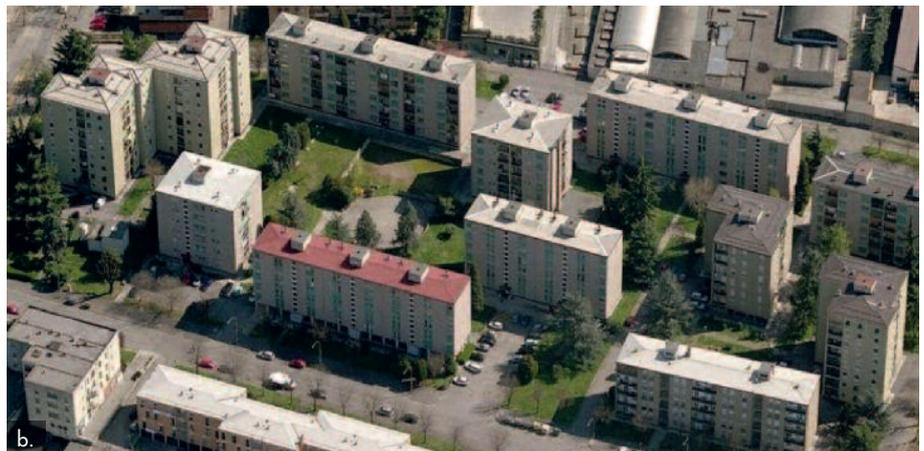
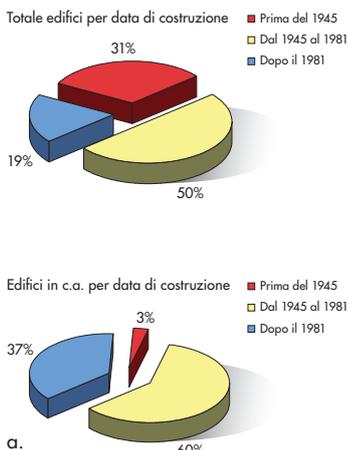




Figura 2  
 Rischi di un approccio alla riqualificazione che trascuri le carenze strutturali degli edifici:  
 (a) Crollo di un capannone industriale con installati pannelli fotovoltaici a seguito del terremoto in Emilia-Romagna (2012);  
 (b) Esempio di un intervento volto al solo rinforzo sismico mediante fasciatura dei nodi con fibre di carbonio e resina.

quali erano stati installati pannelli fotovoltaici (Figura 2a), o vetrate a ridotta trasmittanza. I danni riscontrati in tali eventi pongono l'accento sul modesto significato e la poca lungimiranza di investire importanti risorse economiche pubbliche nella sola riqualificazione energetica di edifici strutturalmente vulnerabili e poco sicuri.

A fronte di evidenti carenze strutturali, energetiche ed architettoniche, la tendenza è quella di risolvere le singole problematiche operando in modo settoriale e senza coordinamento tra le diverse discipline, trascurando spesso il contesto urbano. Le soluzioni proposte hanno quindi un carattere episodico e, per quanto alcune di esse siano tecnologicamente avanzate, esse restano limitate alla risoluzione di problematiche isolate e contingenti (Figura 2b), senza una concezione complessiva dell'intervento. In questo quadro fanno eccezione, per il tentativo di un approccio integrato energetico architettonico, le operazioni di riqualificazione dell'edilizia residenziale tramite interventi in "doppia pelle", applicati con successo soprattutto in Europa, che prevedono la formazione di un secondo strato tecnologico, addossato all'esistente ma strutturalmente indipendente, concepito per migliorarne la sola efficienza energetica e per consentire il restyling architettonico (il nuovo involucro può ospitare, per esempio, serre solari, giardini d'inverno o logge fruibili dagli abitanti, Figura 3a, b). Dagli interventi restano tuttavia esclusi gli aspetti strutturali (statico e sismico), non ancora abbinati agli interventi di recupero energetico e funzionale.

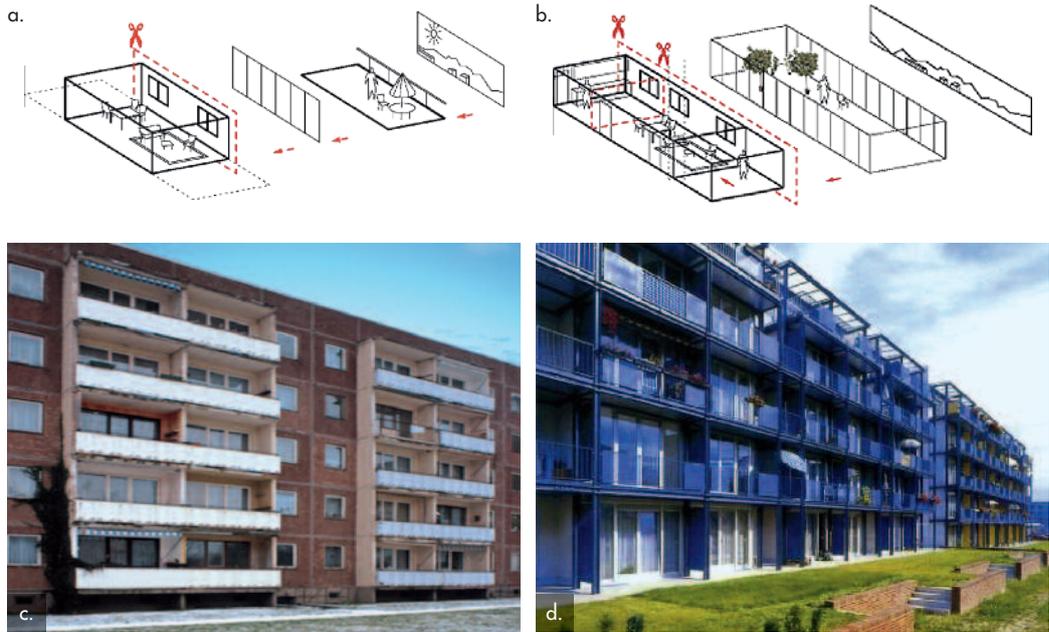
La ristrutturazione degli edifici, intesa come somma di interventi isolati e contingenti, ha però fallito da diversi punti di vista. Da un punto di vista economico, per esempio, poiché gli interventi isolati possono essere molto più costosi di una soluzione integrata. Inoltre, le soluzioni tecniche e tecnologiche innovative sono spesso adottate indipendentemente

dal loro livello di impatto ambientale, che potrebbe essere superiore a quello associato a una soluzione tradizionale. In un approccio olistico non sono inoltre da sottovalutare gli ingenti costi sociali ed economici legati alle operazioni di gestione dell'emergenza e di ricostruzione a valle di un evento sismico. Secondo un rapporto sul rischio sismico redatto dal Dipartimento della Protezione Civile nel settembre 2010<sup>6</sup>, dal terremoto del Belice del 1968 al 2010 lo Stato ha speso circa 147 miliardi di euro (per un valore medio annuo pari a 3.6 miliardi di euro) per la gestione delle emergenze post-sisma. Investimenti tanto ingenti nella messa in sicurezza degli edifici vulnerabili, anziché nelle fasi di riparazione e ricostruzione, porterebbero a scenari molto diversi in caso di futuri terremoti. A ciò si devono aggiungere le conseguenze non traducibili in valore economico sul patrimonio storico, artistico, monumentale e, ovviamente, va considerata anche la perdita in termini di vite umane, non quantificabile economicamente, ma che rappresenta l'aspetto più dolente delle valutazioni a valle di un sisma e denuncia una vulnerabilità inaccettabile del patrimonio edilizio.

A fronte di uno scenario in cui appare evidente l'assenza di momenti di sintesi e di integrazione delle conoscenze in ambito strutturale, energetico e funzionale, che si traduce nella mancanza di proposte di interventi coordinati, la valutazione del rischio sismico e la messa in sicurezza del patrimonio edilizio esistente devono diventare prioritari nelle politiche di riqualificazione. Nuovo impulso all'applicazione di interventi sul costruito può essere dato proprio dall'elaborazione di soluzioni di intervento integrate in grado di coniugare il risparmio energetico e il miglioramento delle prestazioni strutturali (con riferimento sia ai carichi statici che sismici), nel rispetto dei principi di sostenibilità ambientale ed economica (Figura 4).

<sup>6</sup> "Il giornale della Protezione Civile", Rassegna stampa del 01/06/2012 pag. 188 [http://www.ilgiornaledellaprotezionecivile.it/bf/filesupload/Rassegna\\_stampa\\_protezione\\_civile\\_1\\_giugno\\_2012\\_NAZIONALE\\_52861.pdf](http://www.ilgiornaledellaprotezionecivile.it/bf/filesupload/Rassegna_stampa_protezione_civile_1_giugno_2012_NAZIONALE_52861.pdf)

Figura 3 Soluzioni di retrofit energetico e architettonico proposte da Frédéric Druot, Anne Lacaton e Jean - Philippe Vassal (Francia, 2004), (Druot et al., 2004), che si basano sui principi di "ampliamento", "apertura" e "trasparenza" tramite l'aggiunta di nuovi volumi; gli esplosi assonometrici raffigurano l'aggiunta in facciata di nuovi spazi, come balconi (a) o giardini d'inverno (b). Intervento di riqualificazione tramite "doppia pelle" energetica a Leinefelde (Germania): l'edificio prima della riqualificazione (c), e l'edificio dopo l'aggiunta di una nuova struttura in facciata, indipendente da quella esistente, nella quale sono state realizzate serre solari per il miglioramento delle prestazioni energetiche (d).



## 2. Il doppio involucro ingegnerizzato

Il lavoro qui presentato mostra solo alcuni dei risultati ottenuti all'interno di un filone di ricerca tuttora aperto che riguarda lo studio di una soluzione integrata di riqualificazione strutturale-energetica architettonica e urbana del vasto patrimonio edilizio costruito nel II dopoguerra (Figura 5). È indagata una soluzione a doppio

involucro esterno alla struttura esistente in grado di migliorare non solo le prestazioni energetiche, ma anche la sicurezza strutturale, oltre che la qualità architettonica e del contesto urbano, contribuendo ad accrescere la qualità di vita e il benessere degli abitanti.

Dal punto di vista strutturale, l'involucro esterno svolge una funzione di esoscheletro dimensiono-

Figura 4 Principali deficit degli edifici esistenti realizzati nel II dopoguerra con struttura in calcestruzzo armato riferiti a tre ambiti fondamentali: struttura, energia e formale-tipologico (a sinistra); azioni necessarie in ogni ambito per la riqualificazione (a destra).

### ASPETTI ENERGETICI

- Involucro tipicamente non coibentato;
- Presenza di ponti termici significativi;
- Impianti tecnologici vetusti.

### ASPETTI FORMALI

- Edifici spesso privi di pregio architettonico;
- Distribuzione interna alloggi non più rispondente agli attuali standard abitativi;
- Degrado urbano.

### ASPETTI STRUTTURALI

- Edifici spesso non verificati ai carichi VERTICALI (NTC 2008);
- Struttura non organizzata per resistere ai carichi ORIZZONTALI;
- Vita Utile (50 anni): esaurita.



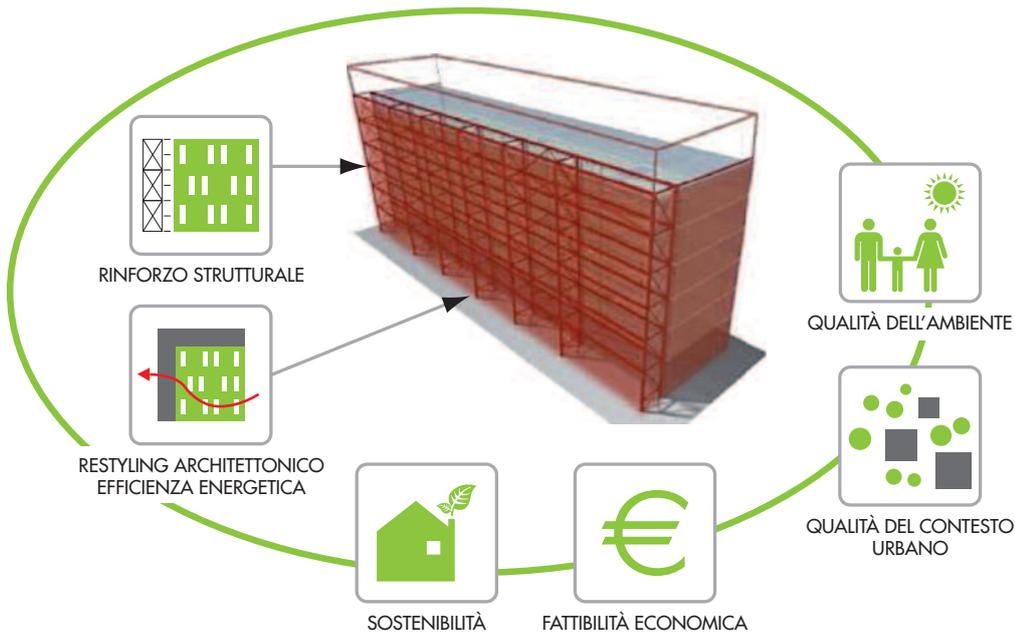


Figura 5  
Schematica rappresentazione del doppio involucro la soluzione proposta si concretizza nell'aggiunta di un nuovo involucro all'esistente capace di migliorare le prestazioni energetiche, di migliorare l'immagine dell'edificio e di conferire la necessaria resistenza alle azioni sismiche nel rispetto della minima invasività e minimo costo. L'intervento è altresì volto al miglioramento delle condizioni ambientali e di benessere degli abitanti e del contesto urbano anche attraverso l'utilizzo di nuovi materiali.

nato per risolvere le eventuali carenze statiche e fornire la necessaria resistenza ai carichi sismici; tali obiettivi sono perseguiti con attenzione ai principi di minimo impatto ambientale e di minimo costo. La soluzione proposta si configura come "doppia pelle adattiva" (PRIN, 2009), poiché essa è concepita per potersi adattare ad eventuali cambiamenti formali o tecnici nel

tempo, per adattarsi alle esigenze degli abitanti in un processo in continuo mutamento di bisogni e nuovi standard abitativi. Per questi motivi, vengono privilegiate soluzioni a secco, materiali eco-compatibili e dispositivi reversibili. Si deve anticipare che la doppia pelle può essere applicata dall'esterno senza il bisogno di rilocare gli abitanti durante i lavori (Feroldi et al., 2013).

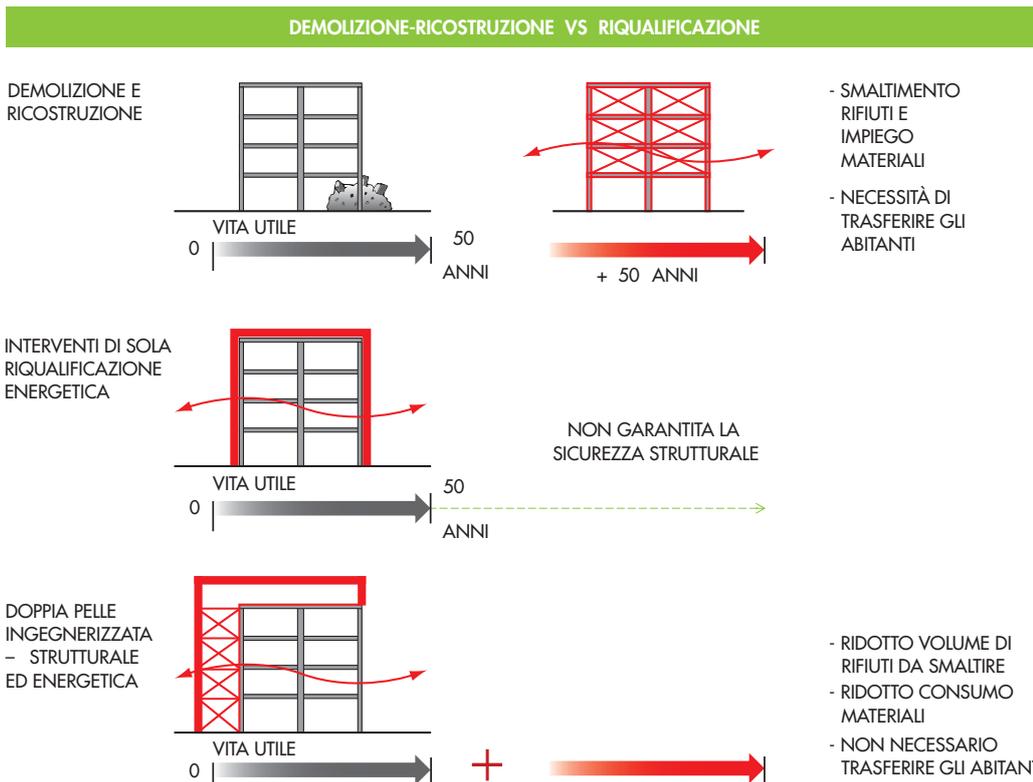


Figura 6  
Interventi di demolizione – ricostruzione, riqualificazione energetica e doppia pelle ingegnerizzata a confronto in termini di carico ambientale e incidenza sulla vita utile dell'edificio: lo schema evidenzia che solo tramite soluzioni integrate di riqualificazione strutturale ed energetica sull'esistente è possibile ridurre l'impatto ambientale in termini di produzione di nuovi materiali e smaltimento di rifiuti e rilanciare la vita utile degli edifici esistenti (ormai esaurita) di altri 50 anni.

Eventuali interventi di rifacimento delle finiture interne o di riconfigurazione architettonica per l'adeguamento alle nuove esigenze abitative possono essere lasciati come scelta facoltativa degli inquilini. Poiché la soluzione non è proposta sul singolo edificio, ma su interi comparti, il tema della riqualificazione viene ampliato ed esteso al tema della rigenerazione urbana.

La soluzione proposta, schematizzata in Figura 5, essendo volta innanzitutto alla riqualificazione strutturale dell'esistente, consente di allungare la vita utile dell'edificio, mentre gli interventi volti alla sola riqualificazione energetica ed architettonica non incidono sulla vita utile. Nell'ottica di riqualificazione integrata, si osserva una riduzione dell'impatto ambientale nel ciclo di vita dell'edificio, dovuta al fatto che il carico ambientale viene distribuito lungo un lasso di tempo più lungo (in questo caso, infatti, il Life Cycle Assessment è calcolato su 50 anni + 50 anni; Romano et al., 2014), altrimenti impossibile nei casi di demolizione e ricostruzione.

A seconda dei limiti imposti dai parametri urbanistici (riferiti, ad esempio, alle distanze minime da altri edifici, dal confine del lotto o da un'eventuale strada), il nuovo involucro può essere progettato in adesione alla struttura oppure in aggetto, potendo così accogliere nuovi spazi chiusi di pertinenza agli alloggi o spazi aperti come logge e serre solari, su uno o più lati, di larghezza variabile in base alle possibilità, così come suggerito dai tradizionali interventi in "doppia pelle" per il miglioramento energetico e la riqualificazione architettonica degli edifici esistenti. La tecnica può inoltre consentire la costruzione di nuovi piani in sommità all'edificio, grazie al miglioramento statico della struttura.

Nella soluzione proposta, il doppio involucro può essere ottimizzato e integrato con dispositivi strutturali (Feroldi, 2014; Salvetti et al., 2014; Laffranchi et al., 2014), o essere concepito come

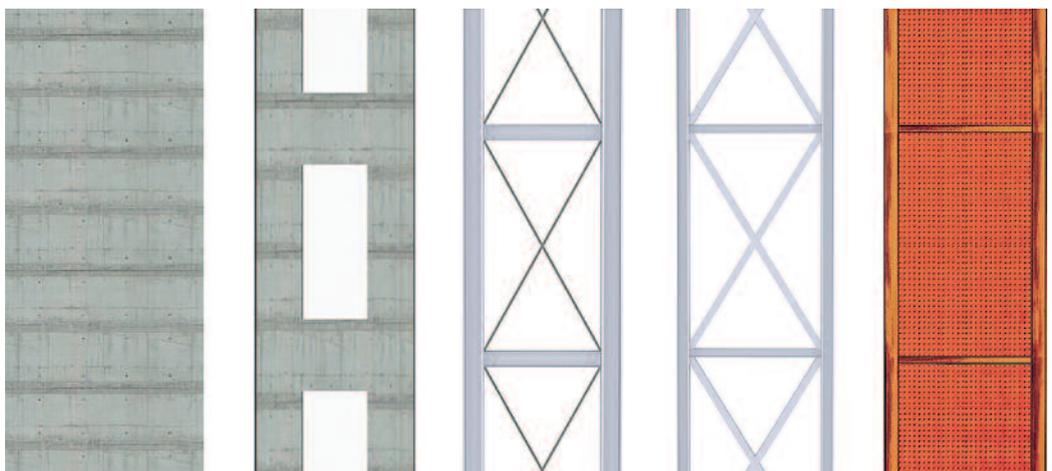
un sistema scatolare sismo-resistente (Passoni et al., 2014): la struttura esterna all'edificio assolve ai compiti di adeguamento statico e sismico, non grava sulla struttura esistente o sulle fondazioni, il suo montaggio a secco non necessita di fasi prolungate di cantiere. Nel primo caso, i setti di controventamento, integrati all'interno del nuovo "esoscheletro", possono essere di varie tipologie: dalle soluzioni tradizionali con reticolari in acciaio (Metelli et al., 2013) o setti in calcestruzzo pieno o calastrellati, a soluzioni meno convenzionali, come ad esempio setti in acciaio con pannelli microforati in acciaio corten, o setti rocking (Schoettler et al., 2009; Belleri et al., 2012; Preti e Meda, 2013).

### 3. Fattibilità della soluzione proposta: sistemi a un grado di libertà

L'incidenza dell'aggiunta di controventi alla struttura da rinforzare va valutata attentamente, controllando gli effetti relativi all'aumento di sollecitazione conseguenti all'incremento di rigidità complessiva del sistema, con l'obiettivo di ridurre al minimo il danno sull'edificio. A tal fine lo studio di sensitività di seguito presentato ha fornito indicazioni sull'interazione tra edificio esistente e sistema di controventamento. L'obiettivo di tale studio consiste nell'individuare i parametri ottimali del sistema di controvento in grado di limitare il danno sulla struttura originaria. Nelle analisi parametriche è stato utilizzato il modello a un grado di libertà, mostrato schematicamente in Figura 8, rappresentativo di una struttura rinforzata con setti di controvento connessi alla struttura esistente tramite collegamenti (links) rigidi.

L'oscillatore a un grado di libertà è composto dalla struttura originaria ("os"), cui viene associato un sistema di controvento dissipativo ("b") connesso rigidamente all'edificio; entrambi i

Figura 7  
Diverse tipologie di controvento (setti in C.A., pareti accoppiate in C.A., telaio in acciaio con funi per controventamento, telaio in acciaio con profili per controventamento, setti con acciaio corten) concepiti per lasciare libertà compositiva in condizioni di diversa intensità sismica, condizioni climatiche e con diverse esigenze estetiche (Abelli et al., 2014).



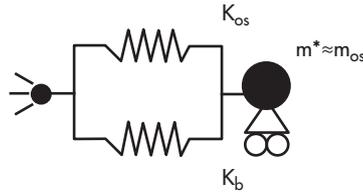


Figura 8  
Modello a un grado di libertà assunto nelle analisi parametriche con collegamento rigido.  $K_{0s}$  e  $K_b$  sono molle non lineari.

contributi della struttura originaria e del controvento dissipativo sono rappresentati da molle non lineari. Le proprietà elastiche dell'oscillatore-edificio (periodo proprio, massa e rigidezza elastica) sono fatte variare all'interno di intervalli rappresentativi di edifici in c.a. con caratteristiche tipologiche e geometriche tipiche del patrimonio edilizio del II dopoguerra (Marini et al., 2014). I valori del periodo proprio della struttura originaria variano da 0.55 s a 2.5 s. La rigidezza elastica del sistema di controvento è definita in relazione alla rigidezza della struttura originaria: il rapporto delle rigidezze tra il sistema di controventamento e la porzione di edificio esistente di pertinenza  $K_b/K_{0s}$  varia da 0 a 12. La massa del sistema è valutata, in via approssimativa, uguale a quella dell'edificio non controventato.

I parametri fondamentali per la definizione del sistema di controvento sono il rapporto ( $\delta$ ) tra gli spostamenti al limite elastico di controvento ed edificio, e la forza associata allo snervamento ( $F_{y,os}$ ) dell'edificio esistente, valutata come percentuale della domanda sismica elastica ad esso relativa [ $m \cdot S_a(T)$ ]:

$$\delta = d_{y,b}/d_{y,os} = 0.1; 0.25; 0.5; 1; \infty \quad (1)$$

$$F_{y,os} [\%] = \begin{cases} 0.3 \\ 0.6 \\ 0.85 \end{cases} [m \cdot S_a(T)] \quad (2)$$

Il parametro  $\delta$  può assumere valori nell'intervallo da 0.1 a 1, nell'ipotesi cioè che il controvento plasticizzi prima dell'edificio. Per  $\delta = 1$  controvento ed edificio entrano in campo non lineare in corrispondenza dello stesso spostamento. È stato inoltre preso in considerazione il caso di controvento sovra-resistente, che si mantiene quindi sempre in campo elastico ( $\delta = \infty$ ). La forza di snervamento dell'edificio è definita come una percentuale della forza cui l'edificio sarebbe soggetto se fosse elastico lineare. Poiché il rapporto tra la forza elastica e la forza di snervamento è pari al fattore di struttura  $q$  dell'edificio, a valori di  $F_{y,os} = (0.3; 0.6, 0.85) F_{el}$  corrispondono, rispettivamente, valori di  $q = 3, 1.7, 1.2$ ; ciò è vero solo nel caso in cui  $T_{os} > T_c$

(principio di uguaglianza degli spostamenti).

La forza di snervamento del controvento si ricava direttamente una volta definiti i valori di rigidezza e di spostamento al limite elastico. Al fine di studiare la risposta inelastica del sistema appena descritto, sono state condotte delle analisi dinamiche non lineari (time history) utilizzando cinque accelerogrammi artificiali spettrocompatibili generati con il software Simqke (2011) rappresentativi di un terreno di categoria B e classe topografica T1 con accelerazione massima al suolo  $a_g = 0.26$  g. I risultati delle analisi di seguito presentati si riferiscono alla media dei valori massimi ottenuti utilizzando ciascuno dei cinque accelerogrammi artificiali spettrocompatibili.

L'efficacia delle soluzioni proposte viene valutata in funzione della duttilità richiesta alla struttura esistente ( $\mu_{os}$ ), definita come rapporto tra lo spostamento massimo e lo spostamento al limite elastico associato alla bilinearizzazione della curva di capacità della struttura esistente:

$$\delta_{os} = \frac{d_{max}}{d_y} \quad (3)$$

A titolo d'esempio vengono di seguito proposti i principali risultati delle analisi per l'oscillatore-edificio con periodo proprio pari a  $T_{OS}=1.5$ s (Figure 9, 10, 11), corrispondente a un telaio di due campate e tre piani fuori terra. Il ciclo isteretico associato all'edificio originario e al sistema di controvento è del tipo Takeda (Takeda et al., 1970). Si osserva che risultati sostanzialmente analoghi sono ottenuti prescindere dal modello isteretico adottato nel sistema di controvento.

Le analisi condotte consentono di valutare l'incidenza del rapporto delle rigidezze ( $K_b/K_{0s}$ ) e del rapporto degli spostamenti al limite elastico tra controvento e edificio ( $\delta = d_{y,b}/d_{y,os}$ ) sulla richiesta in termini di duttilità di spostamento ( $\mu_{os}$ ) per la struttura originaria. In Figura 10 sono riportati i risultati per  $\delta = 0.5$ , in funzione del rapporto di rigidezza controvento - struttura originaria ( $K_b/K_{0s}$ ) e della forza di snervamento della struttura originaria ( $F_{y,os}$ ).

Come atteso, la duttilità in termini di spostamento ( $\mu_{os}$ ) richiesta alla struttura originaria

Figura 9  
Spettri elastici ( $\xi = 5\%$ ) degli accelerogrammi artificiali utilizzati nelle analisi time history. In rosso è riportato lo spettro target ed in nero tratteggiato è riportata la media degli spettri degli accelerogrammi utilizzati.

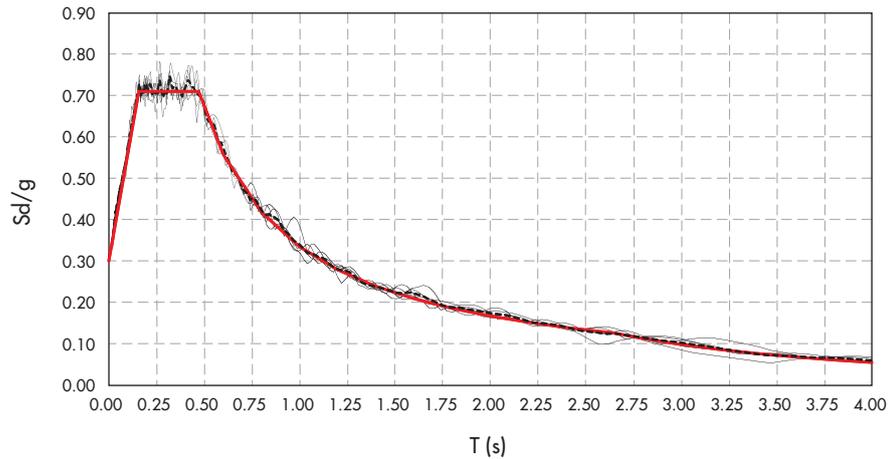
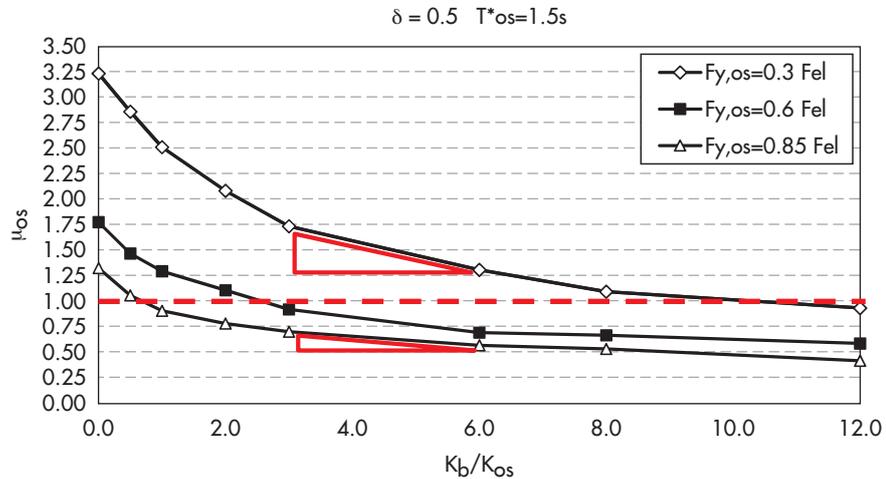


Figura 10  
Riduzione della richiesta di spostamento sulla struttura originaria,  $\mu$ , al variare del rapporto delle rigidezze tra controvento e struttura.



decrese al crescere del rapporto ( $K_b/K_{0s}$ ): fissato il rapporto degli spostamenti al limite elastico tra controvento e struttura, al crescere della rigidezza del controvento deve crescere necessariamente anche la sua resistenza riducendo così la richiesta di duttilità. Il gradiente delle curve mostra inoltre che il rapporto delle rigidezze incide di più su edifici caratterizzati da bassa resistenza rispetto alla forza elastica di progetto. Si osserva che nel caso di edifici con bassa resistenza rispetto alle sollecitazioni elastiche di progetto è possibile mantenere l'edificio in campo elastico solo con controventi di rigidezza molto elevata (con rigidezza maggiore di dieci volte quella dell'edificio).

I risultati ottenuti in termini di rapporto di duttilità richiesta all'edificio con e senza controventi (Figura 11), per un valore prefissato di  $K_b/K_{0s}$ , mostrano che, fissato un valore di  $\delta$ , si ottiene una richiesta di duttilità minore (freccie rosse) per edifici caratterizzati da elevata resistenza ( $F_{y,os} = 0.85 F_{el}$ ). Inoltre si osserva che è necessario considerare valori di  $d_{y,b}/d_{y,os}$  maggiori

per strutture meno resistenti al fine di ottenere la stessa riduzione di duttilità richiesta su strutture caratterizzate da resistenze diverse (freccie verdi). Si nota inoltre che tutte le curve presentano un punto di minimo: per le strutture più resistenti si ha un punto di minimo per valori di  $\delta$  compresi tra 0.25 e 0.5, mentre per telai meno resistenti il punto di minimo si sposta in corrispondenza di valori di  $\delta$  maggiori, al limite pari a 1. Questo risultato consente di stimare un intervallo di valori ottimali per il parametro  $\delta$ . A conferma di tali osservazioni, si ritiene opportuno considerare anche i risultati ottenuti in termini di energia dissipata dal controvento (Figura 12), per un valore prefissato del rapporto delle rigidezze, al variare delle caratteristiche di resistenza dell'edificio. Il grafico mostra che per valori di  $\delta$  compresi tra 0.2 e 0.5 si registra la massima energia dissipata dal controvento rispetto all'energia in ingresso nel sistema, valutata come integrale nel tempo del taglio alla base per lo spostamento del terreno (Christopoulos & Filiatrault, 2006). Al massimo valore dell'energia

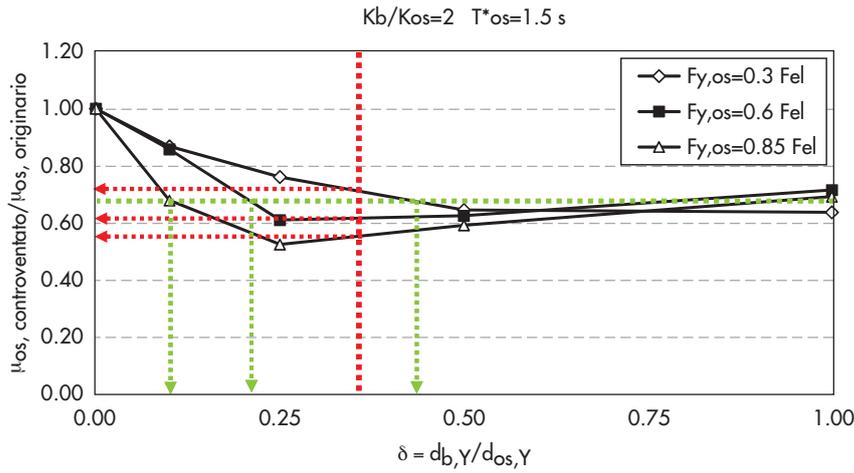


Figura 11  
Riduzione del danno sulla struttura originaria,  $\mu$ , al variare del rapporto degli spostamenti al limite elastico.

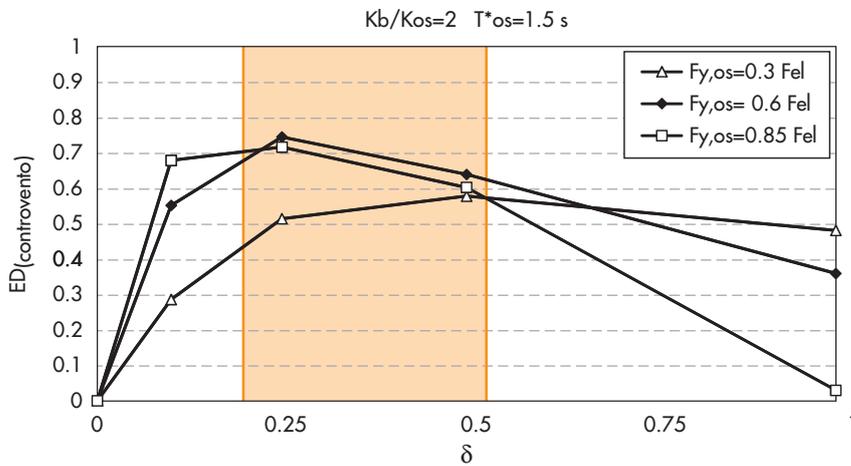


Figura 12  
Energia dissipata dal controvento, normalizzata all'energia in ingresso nel sistema, al variare del rapporto degli spostamenti al limite elastico  $\delta$ .

dissipata dal controvento corrisponde tendenzialmente il valore di  $\delta$  ottimale. Si osserva che, fissata la rigidità del sistema di controvento, la sua resistenza è proporzionale allo spostamento di snervamento. I risultati mostrano che il contributo di resistenza fornito dal controvento di rinforzo è maggiormente efficace per strutture esistenti deboli, caratterizzate da rapporti  $F_{y,os}/F_{el}$  molto minori dell'unità. Per strutture esistenti più robuste, un'eccessiva resistenza del controvento porta sollecitazioni elevate sulla struttura, con un bilancio non sempre favorevole in termini di riduzione della duttilità richiesta.

Oltre a controventi dissipativi collegati rigidamente alla struttura esistente, è possibile utilizzare soluzioni che concentrano la dissipazione di energia nei collegamenti tra l'edificio da rinforzare e la struttura esterna (Figura 13), mentre il sistema di controventamento rimane sostanzialmente elastico.

In linea con i criteri di sostenibilità, tali collegamenti sono concepiti come elementi dissipativi sostituibili nei quali concentrare l'eventuale danno prodotto dalle sollecitazioni sismiche, in modo che le operazioni di ripristino, a seguito di un terremoto, possano limitarsi alla sola sostitu-

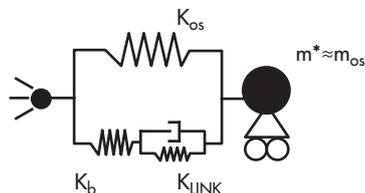


Figura 13  
Schematizzazione del sistema SDOF nell'ipotesi di collegamento dissipativo tra edificio e controvento.

zione di pochi elementi. I risultati ottenuti per questa soluzione (Feroldi, 2014) mostrano una tendenza simile a quanto mostrato prima, in particolare si osserva che è possibile raggiungere lo stesso livello prestazionale con link rigidi e con link dissipativi, ovvero la stessa richiesta di duttilità in termini di spostamento, per rigidità dei collegamenti dissipativi maggiore di due volte la rigidità dell'edificio. Inoltre si osserva che, se il collegamento entra presto in campo non-lineare, per spostamenti molto più piccoli rispetto allo snervamento della struttura, esso sarà in grado di dissipare maggior energia in virtù di una maggiore escursione in campo plastico. A parità di spostamento, l'energia dissipata aumenta con la forza di snervamento del collegamento, che è proporzionale alla sua rigidità.

**4. Fattibilità della soluzione proposta: sistemi a più gradi di libertà**

Una volta verificata la fattibilità dell'intervento mediante le analisi parametriche di sistemi a un grado di libertà precedentemente descritte, sono stati considerati sistemi a più gradi di libertà. A prescindere dalla scelta della tipologia di controvento, il sistema sismo-resistente adottato

dovrebbe essere in grado innanzitutto di linearizzare la distribuzione degli spostamenti richiesti alla struttura da rinforzare, in modo da evitare localizzazioni del danno. Si dimostra che esistono degli intervalli di rigidità e di forza di snervamento del sistema di rinforzo per cui la forma modale e gli spostamenti di piano risultano lineari (Feroldi, 2014; Salvetti et al., 2014; Laffranchi et al., 2014).

**4.1 Esempio di applicazione del doppio involucro ingegnerizzato a un edificio esistente**

Si consideri, ad esempio, un telaio bidimensionale in calcestruzzo armato caratterizzato da due campate di 6 m e quattro impalcati con interpiano di 3 m. Le caratteristiche non lineari degli elementi che compongono il telaio, così come i carichi applicati, sono riferite a un edificio campione scelto come caso studio a valle di un'estesa analisi sul territorio del comune di Brescia riguardante gli edifici costruiti nel II dopoguerra (Feroldi, 2014; Marini et al., 2014). Le analisi effettuate (dinamica lineare e statica non-lineare) mostrano che nel telaio non controventato la richiesta di spostamento massima si concentra alla base con conseguente formazione di piano debole (Tabella 1a), con uno spostamento

Tabella 1 - Confronto dei risultati ottenuti in termini di richiesta di rotazione massima delle cerniere plastiche (a, c), spostamento laterale normalizzato all'altezza dell'edificio (b) e drift di interpiano (d) nel telaio non controventato e nel telaio rinforzato con un setto di rigidità costante incastrato alla base e vincolato alla struttura con collegamenti rigidi.

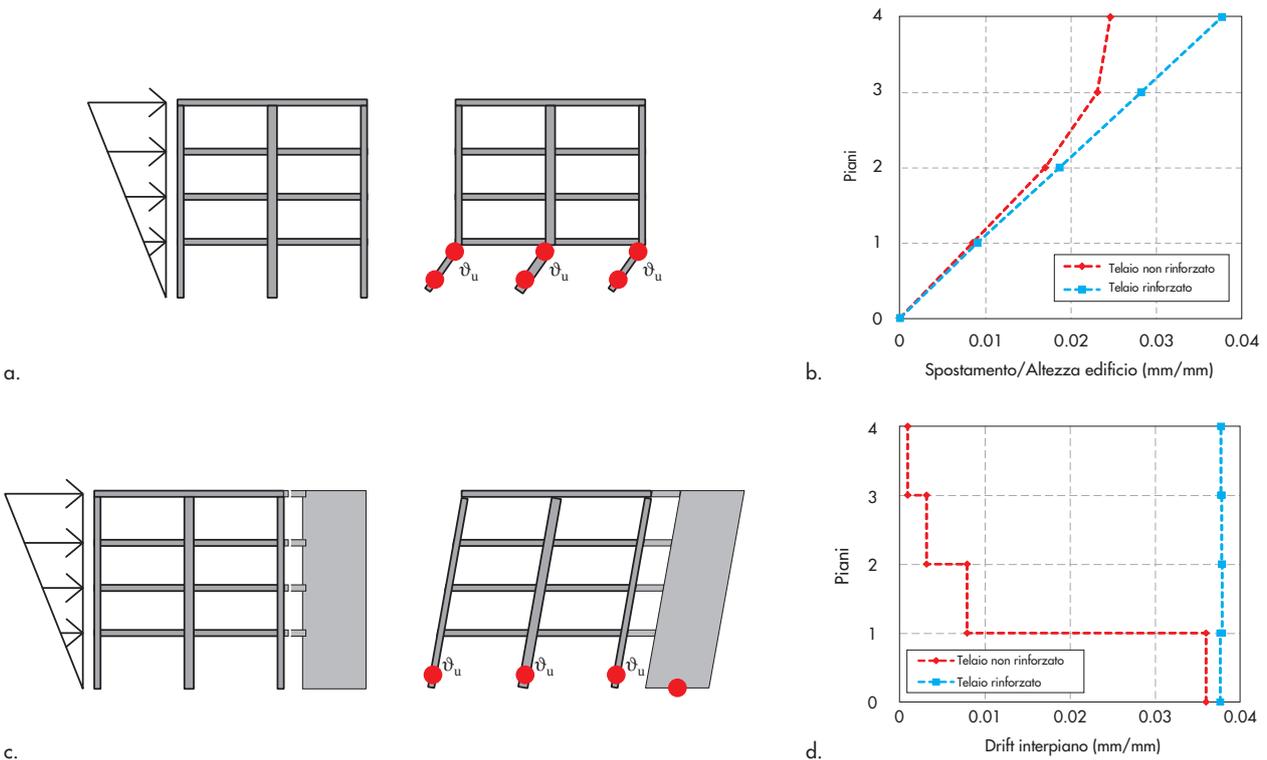




Figura 14  
Comparto edilizio sito nella  
periferia a nord di Brescia  
(a) in cui sorge l'edificio  
caso studio (b).

massimo in sommità, al raggiungimento della rotazione ultima alla base, pari al 2.5% dell'altezza dell'edificio. Aggiungendo un setto di controvento di rigidezza costante, vincolato con collegamenti di tipo biella rigida alla struttura, si osserva che è sufficiente una rigidezza del setto ( $K_b$ ) pari al 30% di quella del telaio ( $K_{os}$ ) perché lo spostamento laterale e il drift di interpiano del telaio vengano linearizzati; a ciò consegue una distribuzione del danno uniforme e una capacità di spostamento globale maggiore, come si osserva dai grafici b) e d) di Tabella 1. In questo caso si osserva che la rotazione ultima nelle cerniere alla base del telaio è raggiunta in corrispondenza di uno spostamento massimo in sommità pari al 3.8% rispetto all'altezza dell'edificio, capacità di spostamento maggiore di quella con edificio non controventato.

La soluzione proposta è stata infine applicata a un edificio scelto come caso studio, rappresentativo della tipologia edilizia in esame. L'edificio è sito in Brescia, nella periferia a nord della

città, e fa parte di un complesso di quattro fabbricati residenziali, realizzati nel 1972 (Figura 14).

Si tratta di un edificio residenziale costituito da tre piani fuori terra e da un piano seminterrato; lo schema strutturale è a telaio a vista in cemento armato ordito in una sola direzione, quella più lunga dell'edificio, con solai in laterocemento e tamponamenti in laterizio a doppia fodera (12+8 cm) con intercapedine. Il solaio costituisce, oltre ai telai d'estremità, l'unico collegamento tra i telai paralleli. Lo studio degli elaborati originali di progetto, delle normative e della manualistica dell'epoca (Marini et al., 2014), unitamente alle analisi numeriche condotte (Feroldi, 2014; Salvetti et al., 2014; Laffranchi et al., 2014), ha consentito di studiare la capacità della struttura in termini di resistenza e deformazione. L'analisi statica non-lineare ha evidenziato una ridotta capacità in termini di spostamento della struttura, legata principalmente all'instaurarsi del fenomeno di "pilastro

corto” per i pilastri tozzi posti alla base del primo piano sulla facciata principale dell’edificio (Figura 14b).

L’analisi delle stratigrafie dell’involucro edilizio, cui fanno parte le chiusure opache esterne e i serramenti, nonché della dotazione impiantistica, ha consentito di determinare le prestazioni dell’edificio a livello energetico. Il bilancio energetico, valutato sia in regime statico che dinamico (Zanardelli et al., 2014), ha messo in evidenza il netto deficit a livello energetico dell’edificio: le problematiche maggiori sono legate alle ingenti dispersioni termiche attraverso le chiusure verticali opache e trasparenti, cui consegue un’importante richiesta in termini di energia primaria per il riscaldamento.

Le analisi effettuate e le carenze evidenziate, sia in ambito strutturale che energetico, hanno motivato lo studio e la progettazione strutturale del doppio involucro. La larghezza di base dei setti di controvento è fissata a priori in base ai limiti imposti dai parametri urbanistici e costituisce il punto di partenza della progettazione; i setti devono rispettare la conformazione dell’edificio esistente e la loro disposizione in pianta deve

essere il più possibile regolare al fine di limitare gli effetti torsionali in caso di sisma. In particolare, i controventi sono integrati nel nuovo involucro e disposti in direzione trasversale e longitudinale sul fronte sud, dove sono predisposte le serre solari, mentre sul fronte nord essi sono disposti in aderenza alla struttura (Figura 15). In funzione della tipologia, ove necessario, si procede al rinforzo dei solai esistenti per formare efficaci diaframmi di piano in grado di trasferire i carichi orizzontali agli elementi verticali resistenti al sisma. Per evitare interventi invasivi è possibile valutare la realizzazione di un diaframma di piano intradossale.

Nel caso di collegamento rigido tra struttura esistente e setti di controvento esterni, gli spostamenti indotti dal sisma sono gli stessi per le due strutture. Sulla base dei risultati ottenuti dall’analisi statica non-lineare, il dimensionamento dei nuovi setti è effettuato imponendo come spostamento target lo spostamento al limite elastico (snervamento) per la struttura esistente ricavato sulla base dei risultati ottenuti dall’analisi statica non-lineare, corrispondente a un drift del 0.2%. La soluzione adottata consiste in un sistema di

Figura 15  
Pianta del piano tipo dell’edificio oggetto di studio: in evidenza il sistema di setti di controvento progettati e integrati nel doppio involucro strutturale (Abelli et al., 2014).

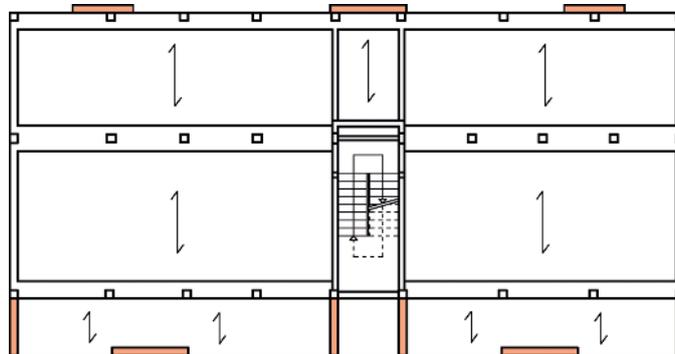
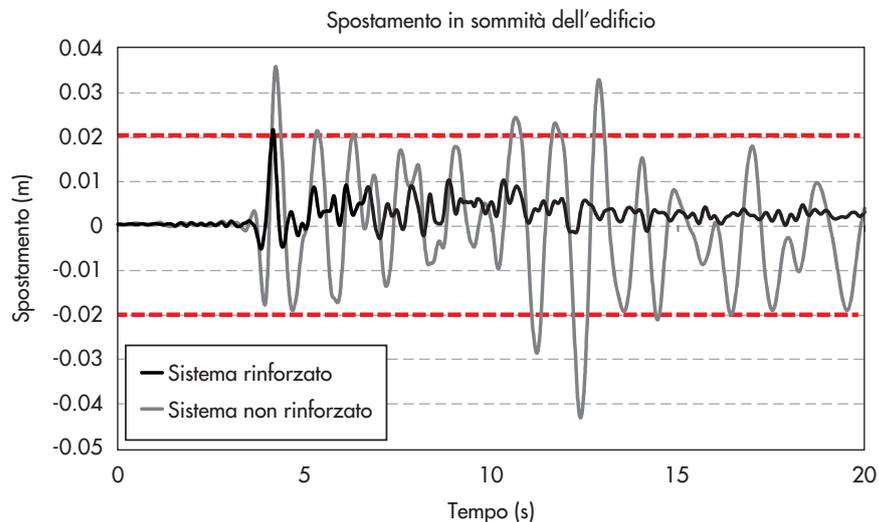


Figura 16  
Confronto tra lo spostamento massimo cui è soggetto l’edificio, prima e dopo l’inserimento di setti dissipativi, direzione perpendicolare allo sviluppo principale 2014 (Salveti et al., 2014).



setti di controvento concentrici in acciaio ed è stata verificata tramite analisi dinamiche non-lineari: i risultati in termini di spostamento massimo sull'edificio dimostrano che il sistema di controventamento è in grado di mantenere l'edificio entro lo spostamento massimo fissato in fase di progetto. A titolo d'esempio si riporta la storia di spostamento in sommità dell'edificio, nella sua direzione trasversale, ottenuta con analisi dinamica non-lineare per uno degli accelerogrammi di progetto selezionati (Figura 16).

In alternativa alla soluzione tradizionale di controventamento appena illustrata, è possibile ottenere risultati analoghi introducendo degli elementi dissipativi in corrispondenza dei collegamenti tra la struttura esistente e il nuovo involucro. Anche in questo caso il criterio utilizzato in fase di progetto si basa sulla scelta dello spostamento massimo cui l'edificio può essere sog-

getto: una volta nota la condizione limite tollerata nella struttura, si procede al predimensionamento del sistema dissipativo. In accordo con i risultati ottenuti dalle analisi parametriche sui sistemi a un grado di libertà illustrati precedentemente (Feroldi, 2014), è possibile ricavare i valori ottimali di progetto per i link dissipativi che consentono di mantenere l'edificio in campo elastico.

Il progetto di riqualificazione energetica è finalizzato alla risoluzione del problema delle dispersioni termiche attraverso l'installazione di un idoneo strato di coibentazione termica in grado di eliminare anche il problema dei numerosi ponti termici ad oggi presenti. Inoltre, poiché nel caso specifico i vincoli urbanistici consentono la progettazione del nuovo involucro con nuovi volumi fruibili dall'utenza su un lato dell'edificio, è proposta la realizzazione di serre solari e



Figura 17  
Esempio di una delle possibili soluzioni tramite doppio involucro strutturale applicata al caso studio: le immagini si riferiscono all'edificio nello stato attuale (a) unitamente ai foto inserimenti dell'edificio rinforzato con un sistema di setti di controvento esterni (b) opportunamente integrati nel nuovo involucro (c) che accoglie serre solari e spazi filtro per la riqualificazione energetica; il rivestimento esterno è realizzato tramite lastre in vetro serigrafate e regolabili in relazione alla radiazione solare alla Sauerbruch & Hutton (Abelli et al., 2014; Zanardelli et al., 2014).



ambienti di controllo sulla facciata a sud. Gli esiti della simulazione effettuata sull'edificio prima e dopo l'intervento, in regime semi-stazionario e dinamico, evidenziano una riduzione del consumo di energia primaria di circa il 70% e un notevole incremento degli apporti solari che dimezzano il fabbisogno necessario per le stagioni intermedie (Feroldi, 2014; Zanardelli et al., 2014). In Figura 17 si riportano le immagini dei foto-inserimenti dell'edificio caso studio che mostrano una delle possibili soluzioni per il doppio involucro strutturale.

## 5. Conclusioni

Il lavoro presenta i primi risultati ottenuti all'interno dell'attività di ricerca in corso finalizzata allo studio di una tecnica di intervento in grado di risolvere in modo integrato i ben noti deficit strutturali ed energetici degli edifici con struttura in calcestruzzo armato costruiti nel II dopoguerra. La soluzione mediante doppio involucro strutturale è l'evoluzione degli interventi in "doppia pelle" proposti soprattutto in Europa per il recupero energetico degli edifici, integrando i dispositivi per il consolidamento strutturale. È possibile operare il rinforzo strutturale con l'aggiunta di setti o controventi sismo-resistenti esterni all'edificio che, integrati al nuovo involucro, possono superare i problemi di compatibilità formale con il costruito, anche attraverso l'utilizzo di speciali collegamenti dissipativi tra struttura esistente e involucro esterno. Al fine di valutare la fattibilità della soluzione

proposta è stata eseguita una campagna di analisi parametriche su sistemi a un grado di libertà rappresentativi di una struttura rinforzata con sistemi di controvento connessi tramite link rigidi e link dissipativi. I risultati di tale indagine consentono di stimare i parametri progettuali del sistema dissipativo, per prefissati valori di danno sulla struttura da controventare. Sono stati considerati come parametri progettuali il rapporto degli spostamenti al limite elastico ( $\delta$ ) e il rapporto delle rigidezze tra sistema di controvento e struttura esistente. Al fine di rappresentare il maggior numero di edifici esistenti in c.a., le proprietà elastiche dell'oscillatore-edificio (periodo proprio, massa e rigidezza elastica) sono dedotte sulla base della caratterizzazione tipologica di edifici realizzati nel II dopoguerra. Una volta verificata la fattibilità dell'intervento mediante le analisi su sistemi semplici a un grado di libertà, la soluzione è stata applicata a un edificio caso studio. Previa analisi della capacità di resistenza e di spostamento dell'edificio, i setti di controvento sono progettati perché possano integrarsi nel nuovo involucro, consentendo di mantenere l'edificio in campo elastico. Lo studio delle prestazioni energetiche dell'edificio ha infine permesso di identificare i principali deficit e di orientare le scelte di riqualificazione. L'esempio applicativo mostra che solo una soluzione progettuale di riqualificazione strutturale congiunta a quella energetica consente di coordinare le operazioni e di ridurre al minimo il rischio di interferenze nei lavori che possono inficiare il risultato complessivo.

## Bibliografia

- Agenzia del Territorio (2011) - Gli immobili in Italia.
- Abelli S., Campana A., Feroldi F., Marini A., Montuori M., Giuriani E., Plizzari G. (2014) - Riqualficazione energetica, architettonica e strutturale del costruito esistente: aspetti strutturali, Technical Report, DICATAM, Università degli Studi di Brescia.
- Belleri A., Schoettler M.J., Restrepo J.I., Fleishman R.B. (2012) - Dynamic Behavior Of Rocking And Hybrid Cantilever Walls In A Precast Concrete Building. *ACI Structural Journal*, Vol. 111, n. 3, pp. 661-672.
- Calvi G.M., Magenes G., Pampanin S. (2001) - Studio sperimentale sulla risposta sismica di edifici a telaio in cemento armato progettati per soli carichi di gravità, Atti del X Congresso Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Potenza.
- Christopoulos C., Filiatrault A. (2006) - Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation, IUSS Press, Pavia.
- Druot F., Lacaton A., Vassal J.P. (2004) - Plus.Les grands ensembles de logements. territoire d'exception, Etude réalisée pour le ministère de la culture et de la communication direction de l'architecture et du patrimoine, Paris.
- Eurostat (2013) - Waste statistics - statistics explain.
- Feroldi F., Marini A., Badiani B., Plizzari G.A., Giuriani E., Riva P., Belleri A. (2013) - Energy efficiency upgrading, architectural restyling and structural retrofit of modern buildings by means of "engineered" double skin façade. Proceedings of the 2nd International Conference on Structures & Architecture (ICSA2013) 24-26 July 2013 (pp.1859-1866). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10446/29414>.
- Feroldi F. (2014) - Riqualficazione sostenibile del patrimonio edilizio del secondo dopoguerra mediante doppia pelle ingegnerizzata per il rinforzo strutturale, l'efficientamento energetico, la riqualficazione architettonica ed urbana, PhD. Thesis, DICATAM, Università degli Studi di Brescia.
- Fisciano R. (2007) - Valutazione della vulnerabilità statica di edifici in c.a. esistenti, Tesi di dottorato, Università di Napoli Federico II.
- Solomos G., Pinto A., Dimova S (2008) - A review of the seismic hazard zonation in national building codes in the context of eurocode 8: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. JRC report, [http://nadir-point.de/Eurocode/Eurocode\\_8\\_Sek.pdf](http://nadir-point.de/Eurocode/Eurocode_8_Sek.pdf)
- JRC (Joint Research Centre) (2012) - Reference Document on Best Environmental Management Practice in the Building and Construction Sector - Final Report (EMAS regulation Article 46.1). September.
- Kunnath K.S., Hoffmann G., Reinhorn A.M., Mander J.B. (1995) - Gravity load designed RC buildings - part I: seismic evaluation of existing constructions, *ACI Structural Journal*, May - June.
- Laffranchi M., Feroldi F., Belleri A., Marini A., Giuriani E. (2014) - Recupero di edifici in c.a. del secondo dopoguerra: doppio involucro strutturale-energetico con collegamenti dissipativi, Technical Report, DICATAM, Università degli Studi di Brescia, 2014.
- Marini A., Passoni C., Riva P., Negro P., Romano E., Taucer F. (2014) - Technology options for earthquake resistant, eco-efficient buildings in Europe: Research needs. Report EUR 26497 EN. JRC87425. ISBN 978-92-79-35424-3. ISSN.1831-9424. doi:10.2788/68902. Luxembourg: Publications Office of the European Union - 112 pp. © European Union, 2014 Agenzia, 2014.
- Marini A., Riva P., Feroldi F., Torquati M. (2014) - Schede di caratterizzazione del costruito esistente, Technical Report.
- Metelli G., Bregoli G., Marchina E. (2013) - Studio numerico e sperimentale del comportamento isteretico di controventi concentrici. Atti XV Convegno ANIDIS - L'Ingegneria Sismica in Italia, Padova 30 Giugno - 4 Luglio. Padova University Press.
- Passoni C., Belleri A., Marini A., Riva P. (2014) - Existing structures connected with dampers: state of the art and future developments. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.
- Preti M., Meda A. (2013) - Repair of RC rocking wall with high performance fiber reinforced concrete, *Materials and Structures*, Published on-line, DOI:10.1617/s11527-013-0180-8.
- PRIN 2009 (2009) - Nuove pratiche progettuali per la riqualficazione sostenibile di complessi di habitat sociale in Italia. Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Coordinatore Scientifico: M. Montuori. Con la collaborazione di: Lupo G., Muraca A., Longo O., Angi B., Botti M., Orsini F. del gruppo di Architettura del Dipartimento DICATAM dell'Università di Brescia.
- Ricci P. (2010) - Seismic vulnerability of existing RC buildings, PhD Thesis, University of Naples Federico II.
- Romano E., Negro P., Taucer F. (2014) - Seismic performance assessment addressing sustainability and energy efficiency, JRC Scientific and Policy Reports.
- Salveti F., Feroldi F., Belleri A., Marini A., Giuriani E. (2014) - Recupero di edifici in c.a. del secondo dopoguerra mediante doppio involucro strutturale-energetico: studio del comportamento strutturale in presenza di setti sovraresistenti o dissipativi, Technical Report, DICATAM, Università degli Studi di Brescia.
- Schoettler M.J., Belleri A., Zhang D., Restrepo J.I., Fleishman R.B (2009) - Preliminary results of the shake-table testing for the development of a diaphragm seismic design methodology. *PCI Journal*, V 54, No 1, pp. 100-124.
- SIMQKE Version 2.6 (2011) - Prof. Piero Gelfi, University of Brescia, Italy (<http://civserv.ing.unibs.it/utenti/gelfi/>).
- Takeda T., Sozen M.A., Nielsen N.N. (1970) - Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of Structural Division (ASCE)*.
- Vona M. (2002) - Caratterizzazione tipologica degli edifici in c.a. esistenti progettati a soli carichi verticali finalizzata alla valutazione della resistenza sismica in presenza di degrado ciclico, Tesi di dottorato, Università G. D'Annunzio, Chieti.
- Vona M., Masi A. (2004a) - Resistenza sismica di telai in c.a. progettati con il R.D. 2229/39, Atti del XI Congresso Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova 25-29 gennaio.
- Vona M., Masi A. (2004b) - Vulnerabilità sismica di edifici in c.a. realizzati negli anni '70, Atti del XI Congresso Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova 25-29 gennaio.
- Zanardelli M., Belardi M., Marini A., Feroldi F., Plizzari G.A. (2014) - Riqualficazione energetica, architettonica e strutturale del costruito esistente: aspetti energetici, Technical Report, DICATAM, Università degli Studi di Brescia.

## Gli Autori

### Dr. Ing. Francesca Feroldi

Ha conseguito la laurea in Ingegneria Civile-Architettura nel 2010 ed il Dottorato in "Recupero di Edifici Storici e Contemporanei" nel 2014 presso l'Università degli Studi di Brescia.

Fra i temi di ricerca sviluppati, si segnala lo studio legato agli aspetti tecnologici e strutturali negli edifici a doppia pelle nel contesto del recupero di edifici esistenti in cemento armato.

### Dr. Ing. Alessandra Marini

Ha conseguito il Dottorato in "Progetto e conservazione delle strutture" presso l'Università di Trieste e da maggio 2013 è Professore Associato nel settore ICAR09 (Tecnica delle costruzioni) presso l'Università degli Studi di Bergamo. È stata Research Associate nella Graduate School presso il Civil Environmental and Structural Engineering Department della University of Colorado at Boulder, Colorado, USA (Tutor: Prof. E. Spacone). I principali temi di ricerca riguardano l'analisi di vulnerabilità e gli interventi di miglioramento sismico di edifici storici e di edifici esistenti in c.a. È socia dello spin-off accademico Di.Mo.Re. e svolge attività di consulenza specialistica strutturale nel settore della riabilitazione.

È Consigliere presso l'Ordine degli Ingegneri della provincia di Brescia; coordinatore della Commissione Aggiornamento della Competenza Professionale e membro delle Commissioni Innovazione e Trasferimento Tecnologico e Protezione Civile.

È referee per ASCE Journal of Structural Engineering, Journal of Historical Heritage e per ACI (American Concrete Institute) Journal.

### Dr. Ing. Andrea Belleri

Dopo aver conseguito la laurea con lode in Ingegneria Civile presso l'Università di Brescia nel 2004 e il Dottorato in "Structural Engineering – Modeling, Preservation and Control of Materials and Structures" nel 2009 presso l'Università di Trento, è attualmente ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Bergamo.

La sua attività scientifica ha finora riguardato principalmente lo studio di resine epossidiche finalizzato allo sviluppo di modelli reologici, la valutazione della risposta sismica di strutture prefabbricate, il progetto basato sugli spostamenti di strutture prefabbricate in c.a., lo studio di sistemi di rocking e sistemi stabilizzanti alternativi, lo sviluppo di dispositivi di dissipazione e smorzamento per strutture prefabbricate esistenti e di nuova progettazione. Relatore di corsi di aggiornamento per professionisti e relatore a convegni nazionali ed internazionali, è autore di articoli su rivista ed a congresso.

### Ing. Chiara Passoni

È assegnista presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Bergamo.

### Prof. Paolo Riva

È laureato in Ingegneria Civile (Politecnico di Milano, 1984) ed ha conseguito un Dottorato in Ingegneria

Civile presso l'Università di Waterloo, Ontario, Canada (1988). Dal 1991 al 2001 è stato ricercatore di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia. Dal 2001 al 2005 ha ricoperto il ruolo di Professore Associato di Tecnica delle Costruzioni nonché è Titolare, sin dal 1994, del Corso di "Costruzioni in Zona Sismica" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Brescia. Dal 2005 è Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Progettazione e Tecnologie della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bergamo, dove è titolare dei corsi di Progettazione di Strutture in c.a. e c.a.p. e di Costruzioni in Zona Sismica.

Da ottobre 2009 il Prof. Riva è Preside della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bergamo.

È autore o co-autore di oltre 130 articoli pubblicati su rivista internazionale o in atti di convegni internazionali e nazionali.

I principali temi di ricerca riguardano: 1. comportamento sismico delle strutture in c.a., con particolare riferimento alle pareti strutturali ed alle strutture prefabbricate; 2. adeguamento sismico degli edifici storici; 3. analisi non-lineare delle strutture in c.a.; 4. comportamento al fuoco delle strutture in c.a.

Il Prof. Riva è stato responsabile o coordinatore di diversi progetti di ricerca scientifici e tra industrie che operano nel settore delle Costruzioni e della Prefabbricazione ed il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia prima ed il Dipartimento di Progettazione e Tecnologie dell'Università di Bergamo poi.

### Dr. Ing. Marco Preti

Dal 2008 è Ricercatore (ICAR/09 - Tecnica delle Costruzioni) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e Matematica (DICA-TAM) dell'Università di Brescia.

Dopo aver conseguito il Dottorato in Modellazione, conservazione e controllo delle strutture presso l'Università di Trento, è stato visiting Ph.D. student presso la University of California, San Diego, per l'anno accademico 2003-04.

I temi di ricerca che ha sviluppato concernono principalmente il comportamento sismico e la modellazione non-lineare di strutture in calcestruzzo armato e in muratura, oltre al rinforzo e la riabilitazione strutturale di edifici esistenti. Agli studi teorici e analitici si affiancano sperimentazioni in laboratorio su elementi strutturali, in genere in scala reale.

È revisore scientifico per le riviste internazionali ACI Structural Journal, Materials and Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics.

### Prof. Ezio Giuriani

Laureato in Ingegneria Aeronautica (strutture) presso il Politecnico di Milano o nel 1971, Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica dell'Università di Brescia.

Principali campi di ricerca: restauro di edifici storici, ripristino di solai in legno, rinforzo di volte in muratura e solai in legno, fessurazione e deformabilità di strutture in c.a., legame di aderenza acciaio-calcestruzzo.

Esperienza di lavori professionali riguardanti il restauro di edifici storici: Convento di San Faustino (XV secolo), Convento di Santa Chiara (XVI secolo) e Palazzo della Loggia (XV-XVI secolo) di Brescia.

Componente del Consiglio Superiore del Ministero dei Lavori Pubblici dal 1990 al 1992, della Commissione CEB (VI-Task Group 1 - Bond) dal 1982 al 1995 e dell' American Society of Civil Engineers (ASCE).

**Prof. Giovanni Plizzari**

È Docente di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento DICATA dell'Università di Brescia. La sua attività di ricerca ha riguardato prevalentemente lo studio del comportamento delle strutture in calcestruzzo armato e dei materiali speciali per le applicazioni strutturali, con particolare riferimento ai problemi di corrosione delle armature.

Negli ultimi anni l'attività ha riguardato prevalentemente i calcestruzzi fibrorinforzati (FRC) per le applicazioni strutturali (pavimentazioni industriali e strutture prefabbricate) e la possibilità di utilizzo delle fibre nei rivestimenti di galleria. Le ricerche sono state prevalentemente indirizzate allo studio del comportamento strutturale complessivo, ma hanno affrontato frequentemente studi di base finalizzati ad approfondire le conoscenze sui comportamenti locali più importanti.

Il Prof. Plizzari è revisore di riviste scientifiche internazionali, tra le quali ASCE Journal of Structural Engineer-

ing, ASCE Journal of Engineering Mechanics; ASCE Materials Journal; Engineering Fracture Mechanics, Engineering Structures, ACI Structural Journal, ACI Journal of Materials, RILEM Materials and Structures.

Partecipa attivamente ai più importanti Convegni Internazionali dove è anche stato frequentemente membro del comitato scientifico, ha presieduto sessioni di lavoro o ha tenuto "Keynote lectures". È stato ed è attualmente coordinatore di numerosi progetti di ricerca, è inoltre autore di numerose pubblicazioni scientifiche su rivista internazionale o atti di convegni internazionali.

Partecipazione a Commissioni Normative: 1 Unicef, normativa UNI 11039 per la classificazione del calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio; 2 RILEM -Hybrid Fibre Reinforced Concrete; 3 WG 11 del TC 104 del CEN per la normativa Europea sulla classificazione delle fibre di acciaio e polimeriche per il calcestruzzo; 4 UNI Ingegneria Strutturale (UNICIS/SC4), normativa "Progettazione, Esecuzione e Controllo degli Elementi Strutturali in Calcestruzzo Rinforzato con Fibre di Acciaio", Progetto di norma UNI 11188; 5 TG7 del WG3 del TC 229 del CEN per la normativa su "Metallic Fibre Concrete"; 6 fib TG 8.3 - Fibre Reinforced Concrete; 7 CNR, "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato (CNR-DT 204).

È stato Presidente del Collegio dei Tecnici dell'Industrializzazione Edilizia (CTE).