

# Adeguamento sismico di edifici in c.a. progettati per soli carichi verticali mediante controventi metallici

F.M. Mazzolani<sup>1</sup> ■

## Sommario

Le costruzioni in cemento armato rappresentano la gran parte del patrimonio edilizio dell'area euro-mediterranea, in quanto esse ne caratterizzano il modo prevalente di costruire durante il ventesimo secolo. La spesso elevata vulnerabilità sismica di tali costruzioni è principalmente legata al fatto che, soprattutto nel caso di costruzioni realizzate da oltre vent'anni, generalmente si tratta di strutture progettate per resistere ai soli carichi gravitazionali. Da ciò discende che l'eventuale capacità di resistere ad azioni orizzontali, quali l'azione sismica, è essenzialmente legata all'effetto della sovraresistenza. Vista l'enorme diffusione delle costru-

zioni in cemento armato progettate per soli carichi verticali, negli ultimi anni si è andato sempre più diffondendo l'interesse per la concezione e lo sviluppo di sistemi di protezione sismica innovativi, in grado di migliorare il comportamento sismico di tali costruzioni e, al contempo, di mantenerne sostanzialmente inalterate le caratteristiche strutturali originarie. In questo lavoro si descrive l'uso di sistemi di controvento metallici per l'adeguamento sismico di edifici in c.a. progettati per soli carichi verticali e si illustrano i risultati degli studi sperimentali e numerici su tali sistemi condotti nell'ambito del progetto di ricerca italiano ILVA-IDEM e del progetto di ricerca europeo PROHITECH.

## 1. Introduzione

Le costruzioni in cemento armato rappresentano la tipologia costruttiva prevalente nell'area euro-mediterranea. In generale, nonostante sia assolutamente possibile realizzare costruzioni in cemento armato sismo-resistenti, gran parte delle costruzioni in cemento armato esistenti, almeno quelle costruite nella prima metà del secolo scorso, è stata progettata per resistere alle sole azioni gravitazionali. A peggiorarne la vulnerabilità sismica vanno aggiunti il degrado dei materiali per vetustà e la mancanza di adeguata manutenzione, come spesso viene riscontrato. Questo comporta che una cospicua parte del patrimonio edilizio presente nell'area euro-mediterranea sia fortemente esposta al rischio di subire ingenti danneggiamenti o addirittura collassi a causa dei terremoti che in tale zona possono verificarsi. Da ciò nasce l'esigenza di mettere a punto soluzioni tecnologiche innovative che rendano le strutture in cemento armato esistenti in grado di resistere ad eventuali azioni sismiche, preservandone le caratteristiche formali, ma modificando lo schema strutturale sismo-resistente. L'obiettivo primario consiste nel garantire a tali costruzioni le necessarie proprietà di rigidità, resistenza e

duttilità indispensabili per fronteggiare terremoti di ridotta intensità senza danneggiamenti apprezzabili ed, al contempo, per resistere a terremoti severi senza collassi (Cosenza & Manfredi, 1997; Cosenza, 2000; Cosenza et al., 2002; Cosenza et al., 2006). A tale scopo, è possibile utilizzare differenti tecniche di consolidamento, tutte miranti a dotare le costruzioni in c.a. di opportuni sistemi di controventamento, completamente dedicati ad irrigidire la struttura nei confronti delle azioni orizzontali, a fornirne adeguata resistenza laterale ed a garantirne la necessaria capacità di dissipazione energetica. L'uso dei controventi metallici per l'adeguamento sismico di strutture in c.a. è molto diffuso in tutto il mondo. A Berkeley (California) molti edifici pubblici sono stati consolidati mediante controventi di acciaio, la cui presenza in facciata – fra l'altro – conferisce una indubbia valenza estetica (Fig. 1). In Giappone l'Istituto di Tecnologia di Tokyo mostra in facciata un recente intervento di adeguamento sismico mediante controventi dissipativi (Fig. 2). In alternativa i sistemi di controvento possono essere concepiti e posizionati all'interno della struttura in modo tale da non apportarne modifiche d'immagine e da conservarne l'impianto ori-

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli "Federico II" - ✉ federico.mazzolani@unina.it

Fig. 1  
Esempi di consolidamento di edifici in c.a. esistenti mediante controventi in facciata (Berkeley, Stati Uniti): (a) University Hall; (b) garage multi-piano.



Fig. 1a



Fig. 1b

Fig. 2  
Esempio di consolidamento di edifici in c.a. esistenti mediante controventi in facciata (Istituto di Tecnologia dell'Università di Tokyo, Giappone): (a) vista della facciata; (b) dettaglio costruttivo.



Fig. 2a

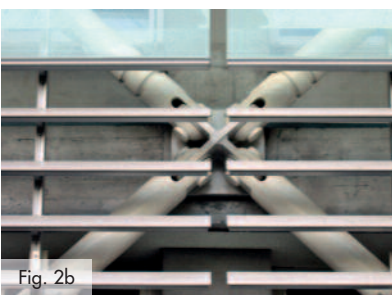


Fig. 2b

ginario. Quest'ultimo aspetto corrisponde al principio della reversibilità degli interventi di consolidamento sugli edifici storici, in base al quale l'intervento deve essere, nel tempo, sostituibile, in modo da consentire l'eventuale futura applicazione di interventi maggiormente efficaci.

In questo lavoro si descrive l'applicazione di sistemi di controventamento metallici per l'adeguamento sismico di strutture esistenti in c.a. progettate per resistere ai soli carichi gravitazionali e si illustrano i risultati di un'ampia ricerca, di tipo sia sperimentale sia

numerico, condotta su tali sistemi nell'ambito del progetto italiano "ILVA-IDEM - ILVA Intelligent DEMolition" (Demolizione "intelligente" di costruzioni dell'ex stabilimento ILVA di Bagnoli, Napoli), che ha interessato quattro istituzioni italiane (Università di Napoli "Federico II", Università della Basilicata, Università di Chieti-Pescara "G. d'Annunzio", Servizio Sismico Nazionale, ora facente parte del Dipartimento della Protezione Civile), nonché nell'ambito del progetto europeo "PROHITECH - Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies" ("Protezione Sismica di Edifici Storici mediante Tecniche Miste Reversibili"), cui hanno partecipato sedici istituzioni accademiche provenienti da dodici



Fig. 3a



Fig. 3b

Fig. 3.  
L'edificio in cemento armato oggetto di sperimentazione nel progetto ILVA-IDEM: (a) la costruzione originaria; (b) la suddivisione in sei sotto-strutture a cui sono state applicate differenti tecniche di consolidamento.



Fig. 4a



Fig. 4b

Fig. 4.  
La costruzione in cemento armato oggetto di sperimentazione nell'ambito del progetto PROHITECH: (a) la costruzione originaria; (b) la struttura metallica di contrasto realizzata per l'applicazione delle forze orizzontali durante le prove cicliche.

Paesi dell'area euro-mediterranea (Italia, Algeria, Belgio, Egitto, Macedonia, Grecia, Israele, Marocco, Portogallo, Romania, Slovenia, Turchia). Informazioni di dettaglio sul progetto ILVA-IDEM sono reperibili in (Mazzolani, 2006). Dettagli relativi all'intero progetto PROHITECH sono forniti in (Mazzolani, 2008) e sul sito [www.prohitech.com](http://www.prohitech.com).

Nell'ambito del primo progetto, una struttura di due piani in cemento armato a pianta rettangolare allungata è stata suddivisa in sei sotto-strutture (Fig. 3), che sono state preven-

tivamente private delle tamponature e dei tramezzi, per essere successivamente consolidate tramite diverse tecniche di adeguamento sismico. Nel secondo progetto, è stata studiata una struttura anch'essa di due piani e base rettangolare (Fig. 4) nella quale le tamponature e i tramezzi sono stati mantenuti integralmente e la loro presenza è stata presa in considerazione sia sperimentalmente sia numericamente. In entrambi i casi si tratta di costruzioni situate nell'area del dismesso Stabilimento Ilva-Italsider di Bagnoli a Napoli.

## 2. Consolidamento mediante controventi eccentrici

I controventi eccentrici rappresentano una interessante soluzione per la riduzione della vulnerabilità sismica delle strutture esistenti in cemento armato. Nelle strutture con controventi eccentrici le forze vengono trasmesse ai controventi mediante flessione e taglio nei "link" d'acciaio, i quali sono progettati per plasticizzare e dissipare l'energia in ingresso senza che i controventi si instabilizzino. Nelle strutture in cemento armato le travi non sono in grado di comportarsi da "link" duttile per i controventi in acciaio che vengono introdotti nell'intelaiatura. Un sistema che permette di inserire controventi eccentrici nelle strutture in cemento armato consiste nell'uso di controventi ad Y rovescia, in cui il "link" è un elemento verticale. Tale sistema permette di dotare le strutture esistenti in cemento armato

di molti vantaggi tipici delle strutture in acciaio a controventi eccentrici, nelle quali è possibile calibrare opportunamente le caratteristiche di rigidità, resistenza e duttilità. L'adozione di collegamenti bullonati alle estremità dei "link" comporta il vantaggio di poter rimuovere il "link" danneggiato a seguito di un evento sismico severo. Naturalmente, notevole importanza rivestono i dettagli del collegamento fra i controventi e la base delle colonne, oltre che quello, già citato, del "link" alla trave della struttura in cemento armato. L'intervento descritto è pienamente reversibile, in quanto la struttura originaria non viene alterata ed è possibile rimuoverlo agevolmente.

Uno studio sperimentale e numerico sull'uso di controventi eccentrici per la protezione sismica di strutture esistenti in cemento armato è stato sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria

Fig. 5. Struttura consolidata mediante controventi eccentrici ad Y rovescia: (a) posizione dei controventi; (b) dettaglio del collegamento fra controventi e struttura in c.a.

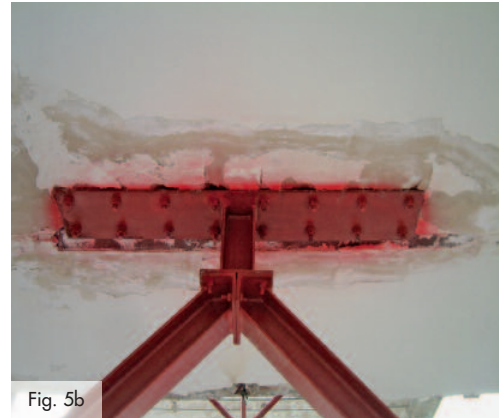


Fig. 6 Consolidamento con controventi eccentrici: (a) modalità di collasso; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base - spostamento d'interpiano" ottenuti durante la prima prova.

Fig. 7 Consolidamento con controventi eccentrici: (a) modalità di collasso; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base - spostamento d'interpiano" ottenuti durante la seconda prova.

Strutturale dell'Università di Napoli "Federico II", nell'ambito del progetto ILVA-IDEM (Mazzone, 2006). In particolare, sono state condotte prove in scala reale, con diverso dimensionamento del "link", a cui hanno fatto seguito analisi numeriche. Il sistema oggetto di prove, composto di controventi eccentrici ad Y rovescia con "link" bullonati, è mostrato in Figura 5. Nel primo sistema, progettato secondo le indicazioni dell'Eurocodice 8 senza tenere conto di criteri di gerarchia delle resistenze, il collasso è avvenuto per rottura del collegamento, con forti deformazioni fles-

sionali nelle flange bullonate (Fig. 6a). La risposta sperimentale ottenuta durante tale prova, espressa come relazione fra il taglio alla base e lo spostamento d'interpiano al primo livello, è mostrata in Figura 6b. Nel secondo sistema, progettato considerando un coefficiente di sovrarresistenza per i "link" pari ad 1,89 ed applicando la gerarchia delle resistenze, il collasso è avvenuto per rottura a taglio dei bulloni, senza però il verificarsi di deformazioni flessionali in campo plastico delle flange (Fig. 7a). Durante tale prova, tuttavia, l'impegno plastico del "link" è stato

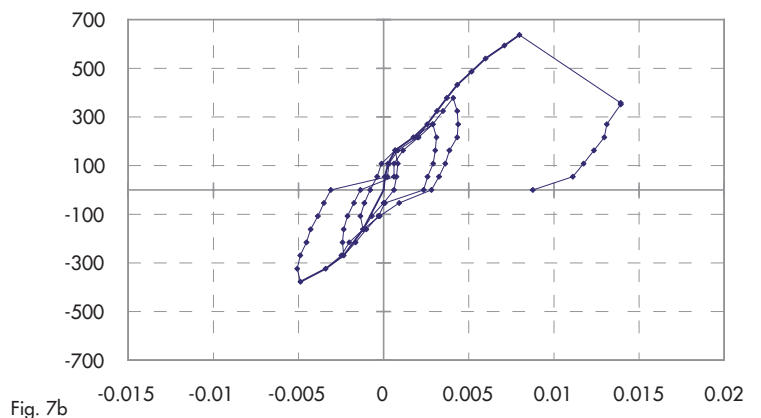
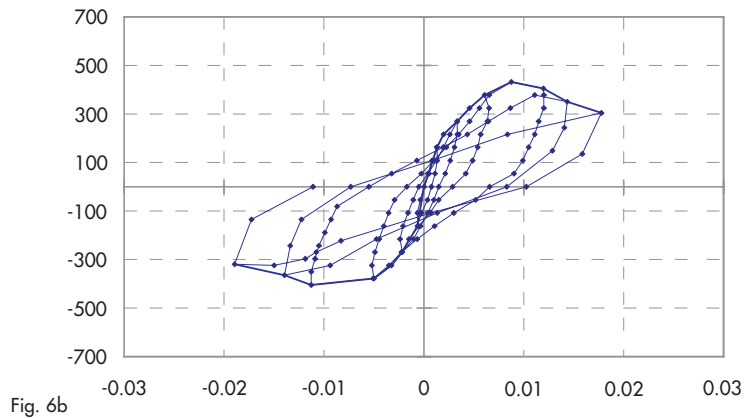




Fig. 8a

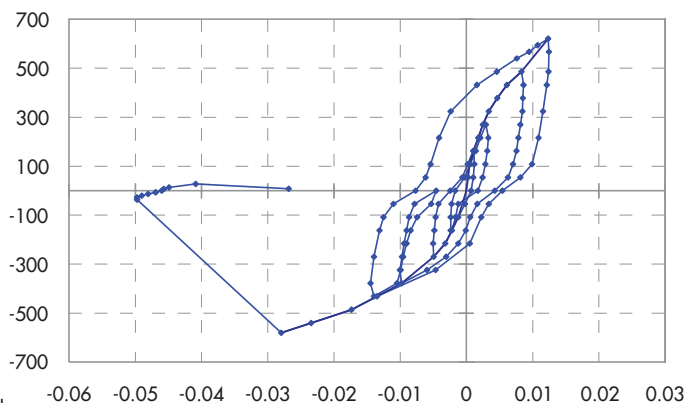


Fig. 8b

comunque modesto, mentre si sono osservate forti plasticizzazioni in prossimità dei bulloni. La risposta sperimentale ottenuta durante tale prova, espressa come relazione fra il taglio alla base e lo spostamento d'interpiano al primo livello, è mostrata in Figura 7b. Nel terzo sistema, progettato con un coefficiente di sovrarresistenza pari a 2,84 in modo da incrementare la duttilità del sistema forzando le deformazioni plastiche nel "link", il collasso è avvenuto ancora per rottura a taglio dei bulloni, il cui diametro non poteva essere modificato (Fig. 8a). Tuttavia, in questo caso, il comportamento ciclico del sistema si è mostrato estremamente stabile, con buona dissipazione energetica grazie alle notevoli plasticizzazioni

### 3. Consolidamento mediante controventi ad instabilità impedita

L'uso dei controventi concentrici ad instabilità impedita (BRB – Buckling Restrained Braces) può rappresentare una soluzione ottimale per l'adeguamento sismico di edifici storici in cemento armato. Infatti, i BRB sono sistemi innovativi che possono essere progettati operando separatamente sulle loro caratteristiche di rigidità, resistenza e duttilità, a differenza di quanto accade nel caso dei controventi concentrici tradizionali, per i quali tali caratteristiche meccaniche sono interconnesse (Wada & Nakashima, 2004; Tsai et al., 2004; Tsai et al., 2004; Chen et al., 2004). Inoltre, un altro importante aspetto che differenzia i BRB dai controventi tradizionali è l'assenza di fenomeni di instabilità globale, per cui, durante l'evento sismico, nell'elemento non sono presenti componenti di spostamento trasversali all'asse. Quest'ultima peculiarità suggerisce l'idea di utilizzare i BRB posizionandoli all'interno delle tamponature a doppia fodera tipiche delle

a taglio del "link" (Fig. 8b).

Oltre alle analisi sperimentali descritte, sono state svolte analisi numeriche agli elementi finiti della struttura, sia in assenza sia in presenza del consolidamento mediante controventi eccentrici, le quali hanno riprodotto con buona approssimazione i risultati sperimentali.

Lo studio condotto ha messo in luce l'efficacia del consolidamento sismico di strutture in cemento armato tramite controventi eccentrici, confermando il ruolo fondamentale giocato dai collegamenti dei "link" sulla duttilità dell'intero sistema. Le tre configurazioni del "link" hanno fornito incrementi di resistenza rispetto alla struttura originaria rispettivamente pari a 5,8, 8,5 e 7,8.

costruzioni in cemento armato. Il fatto di poter disporre un solo controvento per maglia consente un notevole miglioramento della flessibilità distributiva, in quanto, rispetto ai tradizionali controventi ad X che bloccano completamente ogni maglia, vi è a disposizione più spazio per l'apertura di eventuali vani. Il collegamento fra la struttura esistente ed i BRB avviene mediante dei pezzi speciali di estremità che di fatto non alterano l'integrità della struttura originaria. Inoltre, poiché durante l'evento sismico il BRB non presenta spostamenti fuori piano, la tamponatura non viene da essi danneggiata. Infine, un tale intervento di consolidamento è assolutamente invisibile e può essere facilmente rimosso, senza compromettere la struttura esistente, semplicemente eliminando la tamponatura e sganciando i BRB dalla struttura stessa, a conferma della reversibilità del sistema di protezione.

L'applicazione di tale sistema innovativo e reversibile di protezione sismica è stata studiata sperimentalmente e numericamente

Fig. 8  
Consolidamento con controventi eccentrici: (a) modalità di collasso; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base – spostamento d'interpiano" ottenuti durante la terza prova.

Fig. 9  
Consolidamento con BRB (ILVA-IDEM): (a) disposizione dei controventi; (b) struttura di contrasto.



Fig. 10  
Consolidamento con BRB (ILVA-IDEM) durante la prima prova: (a) danneggiamento all'estremità; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base - spostamento d'interpiano".

Fig. 9a

Fig. 9b

Fig. 11  
Consolidamento con BRB (ILVA-IDEM) durante la seconda prova: (a) danneggiamento all'estremità; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base - spostamento d'interpiano".

presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Napoli "Federico II". In particolare, sono stati condotti due studi, uno nell'ambito del progetto ILVA-IDEM ed uno nell'ambito del progetto PROHITECH. Nell'ambito del progetto ILVA-IDEM, una delle sotto-strutture ottenute, come innanzi

descritto, a partire dalla struttura originaria (Fig. 9) è stata equipaggiata con un sistema di BRB. Sono state condotte due prove sperimentali. Durante la prima prova il sistema ha esibito un buon comportamento in trazione, mentre la duttilità del controvento è stata compromessa da un fenomeno di instabilità all'e-



Fig. 10a

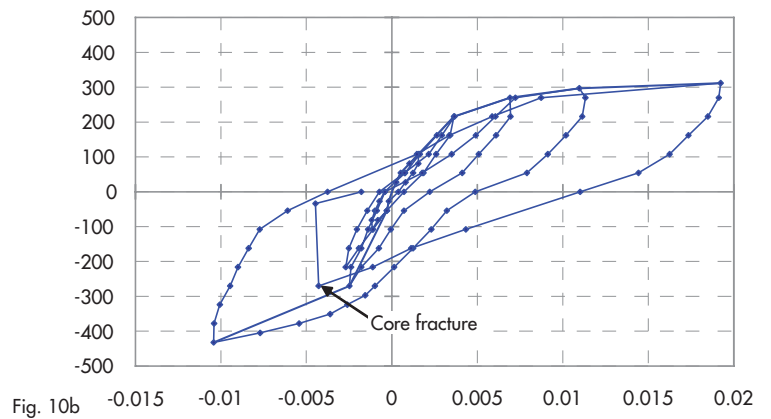


Fig. 10b



Fig. 11a

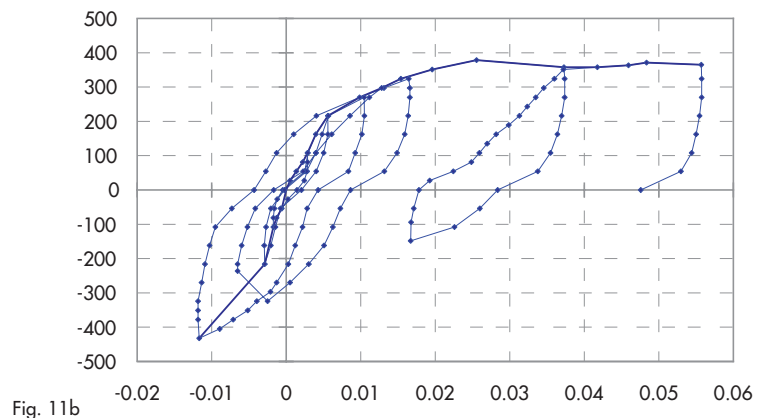


Fig. 11b



Fig. 12a



Fig. 12b

Fig. 12

La costruzione in cemento armato provata a Bagnoli (Napoli) nell'ambito del progetto PROHITECH: (a) stato di danneggiamento dopo il test in assenza di BRB; (b) intervento con i BRB inseriti fra le fodere della tamponatura.

stremità, con progressiva localizzazione del danneggiamento (Fig. 10a). Durante la seconda prova, in cui i controventi erano caratterizzati da un cuore interno in acciaio di dimensioni maggiori ed un ritegno trasversale con elementi di irrigidimento, la crisi finale si è avuta per instabilità del cuore in acciaio (Fig. 11a), ma il comportamento è notevolmente migliorato, in termini di resistenza ma soprattutto di duttilità (Fig. 11b). Rispetto alla struttura originaria, in particolare, la resistenza si è incrementata di 4,2 volte nel primo test e di 5,1 nel secondo. Oltre alle analisi sperimentali, sono stati messi a punto modelli numerici agli elementi finiti che hanno ben riprodotto i risultati delle prove. Nell'ambito del progetto PROHITECH, la struttura presa in considerazione è quella riportata in Fig. 4. Si tratta di una struttura di due piani a pianta rettangolare (Fig. 4a), progettata per soli carichi verticali. La maggiore peculiarità di tale struttura risiede nel fatto che essa non è un modello in scala reale appositamente realizzato per condurre delle analisi sperimentali, bensì è una struttura "vera", con tutte le imperfezioni ed i difetti che caratterizzano queste tipologie costruttive, realmente rappresentativa del modo di costruire in gran parte dei Paesi dell'area euro-mediterranea durante il secolo scorso. Appare, dunque, evidente che si è trattato di un'occasione unica di conoscenza, per cui le indagini sperimentali e le elaborazioni numeriche sono state estensive e dettagliate. Dopo una serie di prove preliminari sui materiali, necessarie per la loro caratterizzazione dal punto di vista meccanico, è stata effettuata l'identificazione dinamica della struttura, come descritto in (Mazzolani et al., 2005). Allo scopo di svolgere prove cicliche in campo inelastico sotto azioni orizzontali, è stata progettata e realizzata una speciale

struttura di contrasto in acciaio (Fig. 4b), che, con l'impiego di sei martinetti a doppio effetto, ha consentito di spingere e tirare, in maniera alternata, la costruzione fino al raggiungimento di valori predeterminati di spostamento orizzontale.

La prima prova è stata condotta sulla struttura nella sua condizione originaria, sulla quale sono stati impressi spostamenti ciclici in regime quasi statico che hanno comportato la completa distruzione delle tamponature e dei tramezzi, al piano terreno, grave danneggiamento alla scala e formazione di cerniere plastiche a flessione e taglio in posizioni critiche delle colonne (Fig. 12a). Dopo il completamento delle prove sulla struttura originaria e sulla struttura consolidata mediante strisce di FRP nelle tamponature esterne, la struttura è stata nuovamente consolidata tramite un sistema di BRB in solo acciaio inseriti nelle tamponature (Fig. 12b) (D'Aniello et al., 2007). Sono state eseguite due prove, che si differenziavano essenzialmente per la realizzazione dei dettagli costruttivi dei BRB. I risultati della prima prova sono stati soddisfacenti e la crisi è avvenuta per instabilizzazione dell'estremità del controvento (Fig. 13a). Il comportamento ciclico ottenuto dalla prova è mostrato in Figura 13b. Per la seconda prova il controvento è stato realizzato in modo da prevenire la crisi evidenziata durante la prima, così che la rottura è avvenuta per instabilità locale del cuore del BRB (Fig. 14a). Il risultato è stato ancor più soddisfacente, vista la notevole stabilità dei cicli e la capacità di dissipazione energetica (Fig. 14b). Oltre alle analisi sperimentali, sono state svolte anche analisi numeriche sulla struttura rinforzata mediante BRB. Tali analisi sono state effettuate mediante il codice di calcolo agli elementi finiti SAP2000 ed i risultati numerici sono stati in pieno accordo con quelli ottenuti sperimentalmente sulla struttura in scala



Fig. 13a

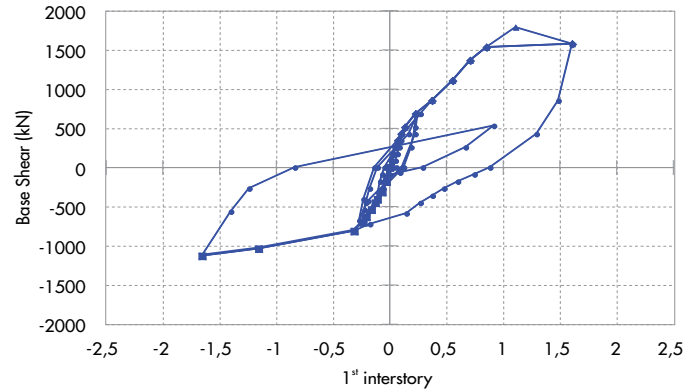


Fig. 13b



Fig. 14a

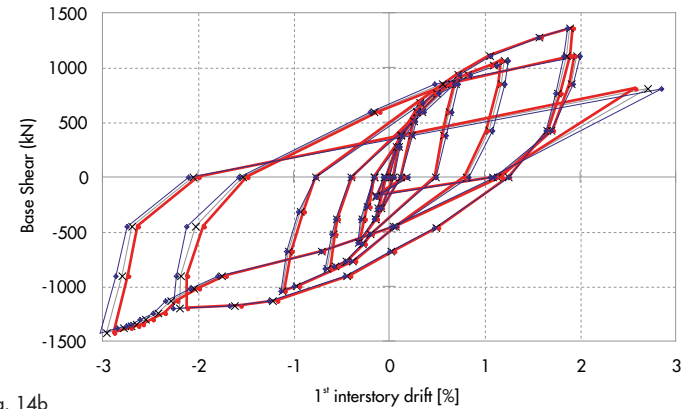


Fig. 14b

Fig. 13  
Consolidamento con BRB (PROHITECH) durante la prima prova: (a) modalità di collasso; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base - spostamento d'interpiano".

Fig. 14  
Consolidamento con BRB (PROHITECH) durante la seconda prova: (a) modalità di collasso; (b) risposta sperimentale in termini di diagramma "taglio alla base - spostamento d'interpiano".

reale. I risultati delle analisi sperimentali e numeriche condotte hanno mostrato le buone prestazioni offerte dal sistema utilizzato, che

#### 4. Consolidamento mediante controventi con dispositivi in leghe a memoria di forma

Il comportamento ciclico delle leghe a memoria di forma (SMA – Shape Memory Alloys) è di tipo ri-centrante, nel senso che le deformazioni residue alla fine dell'applicazione del carico risultano nulle. Tale peculiarità può essere convenientemente sfruttata nel consolidamento sismico di edifici esistenti in cemento armato, disponendo opportuni dispositivi SMA nell'interno di controventi in acciaio. I vantaggi di un comportamento sismico ri-centrante sono sia di tipo strettamente strutturale sia di tipo economico. Dal punto di vista strutturale, ad esempio, è facile riconoscere che in una struttura notevolmente danneggiata da un evento sismico severo, l'effetto P- $\Delta$  sulle colonne può essere importante. Inoltre, dal punto di vista più strettamente economico, è chiaro che il ripristino degli elementi non-strutturali ed impiantistici su una struttura permanentemente distorta e

risulta particolarmente idoneo per adeguare sismicamente edifici in cemento armato progettati per soli carichi verticali.

che deve essere raddrizzata comporta oneri aggiuntivi non indifferenti. Come nel caso degli altri sistemi di protezione basati sull'uso di controventi, anche in questo caso l'intervento si caratterizza come reversibile, non alterando la struttura originaria e permettendo la rimozione dei controventi stessi in caso di necessità. Un intervento di consolidamento basato sull'uso di controventi con leghe a memoria di forma è stato messo in atto e studiato nell'ambito del progetto ILVA-IDEM (Mazzolani, 2006) dal team dell'Università della Basilicata (Dolce et.al., 2004). Il sistema di consolidamento è stato ottenuto mediante quattro controventi speciali (Fig. 15), progettati sulla base di analisi numeriche preliminari, le cui caratteristiche meccaniche dipendono dalle proprietà dei fili in lega a memoria di forma Nickel-Titanio, con conseguente comportamento iperelastico ed elevata resistenza a fatica sotto grandi deformazioni. Il comportamento dei dispositivi è stato fortemente non-lineare e decisa-





Fig. 15a



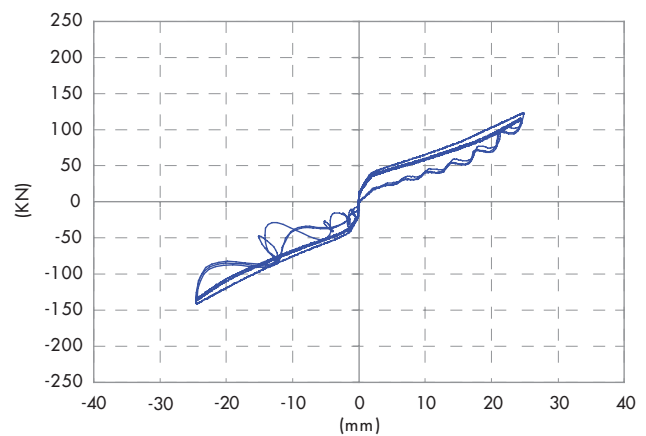
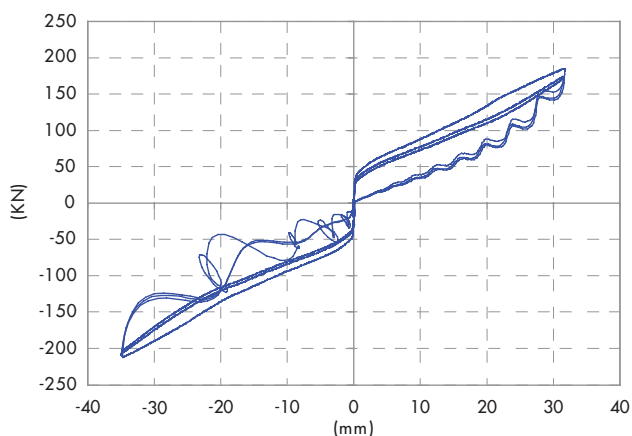
Fig. 15b

Fig. 15  
Struttura consolidata mediante controventi con leghe a memoria di forma: (a) posizione dei controventi; (b) dettaglio dell'attacco di un controvento alla struttura in c.a. esistente.

mente ri-centrante (Fig. 16). Benché alcune SMA siano in grado di garantire, oltre alla capacità di ri-centratura, anche un certo grado di dissipazione energetica, nello studio descritto le SMA sono state utilizzate essenzialmente per eliminare gli spostamenti residui, confidando nella capacità di dissipazione energetica – peraltro modesta – della sola struttura in cemento armato. Tuttavia, a tale limite è possibile ovviare in maniera semplice, aggiungendo, nell'interno dei controventi, elementi o dispositivi a comportamento dissipativo. Nella prima fase del programma sperimentale sono state condotte nove prove in regime quasi statico sulla struttura consolidata tramite i contro-

venti con SMA, allo scopo di valutare l'effettivo comportamento ciclico del sistema strutturale e la capacità ri-centrante dei controventi. Successivamente alle prove in regime quasi statico, sono state svolte delle prove di rilascio dinamico, sia sulla struttura originaria sia sulla struttura consolidata, al fine di valutare l'influenza del sistema adottato sul comportamento strutturale. Infine, dopo le prove dinamiche, sono stati effettuati ulteriori test in regime quasi statico, fino a portare la struttura in condizione prossima al collasso. I test condotti hanno mostrato l'efficacia del sistema adottato nel garantire adeguate caratteristiche di ri-centratura del sistema strutturale consolidato.

Fig. 16  
Risposta in regime ciclico per i controventi al primo ed al secondo livello.



## 5. Consolidamento mediante pannelli metallici a taglio

I pannelli metallici a taglio presentano ottime potenzialità per l'impiego nella protezione passiva delle costruzioni esistenti in cemento armato in zona sismica. Essi possono essere convenientemente utilizzati in modo da garantire alle costruzioni in cemento armato,

progettate per soli carichi verticali, adeguate caratteristiche di rigidità, resistenza, duttilità e dissipazione energetica. In tale modo, in un'ottica di progettazione di tipo prestazionale, si possono ottenere sistemi dotati di rigidità tale da sopportare senza danni gli eventi sismici di bassa intensità ed elevata probabilità di occorrenza e, al contempo, di

Fig. 17  
Consolidamento mediante pannelli metallici a taglio:  
(a) disposizione geometrica;  
(b) configurazione deformata del sistema con pannelli in acciaio;  
(c) configurazione deformata del sistema con pannelli in alluminio.



resistenza, duttilità e capacità dissipative tali da sopportare senza collassi gli eventi sismici di elevata intensità. La geometria bidimensionale dei pannelli a taglio comporta una forte versatilità nella disposizione degli stessi, che possono agevolmente essere posizionati in zone perimetrali delle costruzioni senza interferire con eventuali vani ed inseriti nell'intercapedine delle tamponature a camera d'aria. Da ciò è evidente che, anche in questo caso, si tratta di una tecnica di protezione sismica assolutamente reversibile.

L'applicazione di pannelli metallici a taglio nell'adeguamento di edifici esistenti in cemento armato è stata studiata presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Napoli "Federico II" ed il Dipartimento di Progettazione, Riabilitazione e Controllo delle Strutture Architettoniche dell'Università di Chieti/Pescara "G. d'Annunzio", nell'ambito del progetto ILVA-IDEM (Mazzolani, 2006). In tale circostanza è stata considerata sia l'applicazione di pannelli in acciaio sia quella di pannelli in alluminio puro, entrambi inseriti in un telaio articolato di acciaio (Fig. 17a).

Nel caso dei pannelli in acciaio (Fig. 17b), sulla base di una valutazione preliminare basata su indagini sperimentali del comportamento della costruzione originaria in cemento armato, è stata messa a punto una procedura di progetto "ad hoc", sviluppata nell'ottica della progettazione per livelli di prestazione. In seguito, sulla scorta di una procedura analitica di tipo semplificato, è stata definita una adeguata configurazione per i pannelli a taglio, la cui validità è stata poi corroborata mediante raffinate analisi agli elementi finiti. Tale configurazione è stata applicata nelle analisi sperimentali, durante le quali la struttura consolidata è stata sottoposta a cicli di spostamento laterale. I risultati sperimentali, insieme con i corrispondenti studi numerici,

hanno mostrato l'efficacia del sistema di consolidamento adottato. Infatti, la rigidità iniziale è stata raddoppiata rispetto a quella della struttura originaria, mentre la resistenza laterale è stata addirittura decuplicata. Inoltre, anche la capacità di spostamento è notevolmente incrementata, raggiungendo agevolmente spostamenti d'interpiano del 3,5% senza alcuna rottura fragile (Fig. 17b). Infine, la capacità di dissipazione energetica è risultata soddisfacente, mostrando un meccanismo accoppiato di formazione di cerniere plastiche nei nodi della struttura in cemento armato e di deformazione plastica nelle diagonali tese dei pannelli in acciaio.

In seguito, sono state studiate le prestazioni dei pannelli in alluminio puro assoggettato ad un trattamento termico che ne ha ridotto il limite elastico a 20 MPa ed incremento dell'allungamento a rottura fino al 45%. Tale materiale è particolarmente indicato per migliorare il comportamento strutturale soprattutto in termini di duttilità, oltre che di rigidità e resistenza. I pannelli in alluminio puro, dimensionati sulla base di modelli teorici e studiati nel dettaglio mediante raffinate analisi agli elementi finiti, sono stati applicati per il consolidamento della struttura in cemento armato, che è stata sottoposta ad indagini sperimentali (Fig. 17c) e studi numerici.

Dal confronto fra i sistemi di pannelli a taglio in acciaio ed in alluminio (Fig. 18) si è evinto che la resistenza laterale offerta dai due sistemi è stata praticamente la stessa, in entrambi i casi di un ordine di grandezza superiore rispetto alla struttura originaria. Per contro, la capacità di dissipazione energetica del sistema con pannelli in alluminio è stata sensibilmente maggiore di quella con i pannelli in acciaio. Infine, la rigidità del sistema con pannelli in alluminio è stata dapprima maggiore del caso dei pannelli in

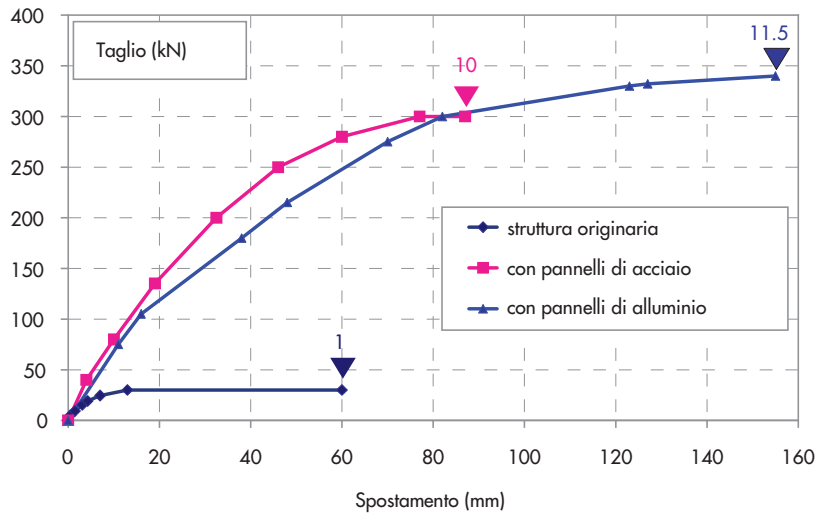


Fig. 18  
Confronto della risposta, in termini di legame fra il taglio alla base e lo spostamento laterale, fra la struttura originaria, quella consolidata con pannelli di acciaio e quella consolidata con pannelli di alluminio puro trattato termicamente.

acciaio, per poi decrescere rapidamente. In entrambi i casi, i risultati numerici e sperimentali hanno mostrato le enormi potenzialità

dell'uso dei pannelli metallici a taglio nella protezione sismica di edifici esistenti in cemento armato.

## 6. Conclusioni

Il presente lavoro riporta in sintesi i risultati di ricerche svolte nell'ambito del progetto ILVA-IDEM ed in parte del progetto europeo PRO-HITECH su alcuni sistemi di controvento metallici utilizzati per l'adeguamento sismico di edifici esistenti in cemento armato. In particolare, vengono illustrate tecniche di intervento innovative basate sull'uso di controventi eccentrici, controventi ad instabilità impedita (BRB), controventi con dispositivi in leghe a memoria di forma e pannelli a taglio in acciaio e in alluminio. Le indagini svolte hanno messo in luce le notevoli potenzialità dell'applicazione di queste tecniche di consolidamento alle costruzioni esistenti in cemento armato, progettate prevalentemente per carichi verticali, per le quali è evidente la

necessità di approfondirne gli aspetti strutturali e tecnologici. Una importante tappa di questa linea di sviluppo della ricerca è rappresentata dalle attività svolte in parallelo a livello sperimentale e numerico, così da potersi vicendevolmente calibrare e validare. A conferire maggiore peso ai risultati ottenuti gioca la circostanza irripetibile di avere avuto a disposizione due edifici reali in c.a. costruiti secondo le tecniche correnti negli anni '70, quando Napoli non era stata ancora inserita in zona sismica. A differenza dei modelli di laboratorio, tali edifici contengono tutti i difetti costruttivi che caratterizzano l'edilizia corrente. Il primo edificio è stato privato delle tamponature e tramezzature per poter provare la sola struttura nuda in c.a. e, conseguentemente, calibrare il modello di calcolo.

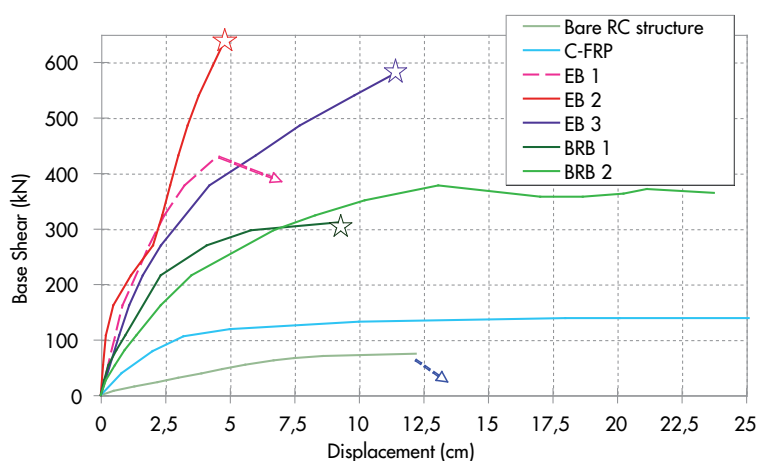


Fig. 19  
Risposte delle strutture consolidate mediante controventi eccentrici (EB) e controventi ad instabilità impedita (BRB) confrontate con quelle consolidate mediante C-FRP [16] e in assenza di consolidamento.

Il secondo, invece, è stato provato così come è, completo di divisori interni e pareti esterne, che peraltro hanno fornito una notevole collaborazione al comportamento globale, di norma trascurata durante la progettazione. I risultati ottenuti dalle indagini sperimentali e

numeriche condotte hanno mostrato le enormi potenzialità dei sistemi di controventamento studiati, che consentono di ottenere straordinari incrementi di resistenza sismica, accompagnati da ottimi valori di rigidezza e duttilità (vedi Fig. 19).

### Bibliografia

- Cosenza E., Manfredi G. (1997). "Some remarks on the evaluation and strengthening of under-designed r.c. frame buildings", in "Seismic Evaluation and Retrofit" (D.P. Abrams and G.M. Calvi eds.), Columbia University, Technical Report NCEER-97-0003.
- Cosenza E. (Editor), (2000). "Il comportamento sismico di edifici in c.a. progettati per carichi verticali", GNDT, ISBN 88-88151-02-8.
- Cosenza E., Manfredi G., Verderame G.M. (2002). "Seismic assessment of gravity load designed r.c. frames: critical issues in structural modeling", *Journal of Earthquake Engineering*, Special Issue, vol. 6, n. 2.
- Cosenza E., Manfredi G., Verderame G.M. (2006). "A Fibre model for push-over analysis of under-designed reinforced concrete frames", *Computer and Structures*, vol. 84.
- Mazzolani F.M. (coordinator & editor), (2006). "Seismic upgrading of RC buildings by advanced techniques – The ILVA-IDEM Research Project", Polimetrica.
- Mazzolani F.M. (2008). "The PROHITECH research project", *Atti della Conferenza SAHC 2008*, Bath, Regno Unito.
- Mazzolani F.M. (2008). "Advanced techniques for seismic protection of historical buildings: experimental and numerical approach", *Atti della Conferenza Internazionale di Ingegneria Sismica MERCEA'08*, Reggio Calabria e Messina, Italia.
- Wada A., Nakashima M. (2004). "From infancy to maturity of buckling restrained braces research", *Atti della Tredicesima Conferenza Mondiale di Ingegneria Sismica*, Vancouver, Canada.
- Tsai K.C., Lai J.W., Hwang Y.C., Lin S.L., Weng Y.T. (2004). "Research and application of double-core buckling restrained braces in Taiwan", *Atti della Tredicesima Conferenza Mondiale di Ingegneria Sismica*, Vancouver, Canada.
- K.C. Tsai, Y.T. Weng, S.L. Lin, S. Goel (2004). "Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame: Part 1 - Performance-based specimen design", *Atti della Tredicesima Conferenza Mondiale di Ingegneria Sismica*, Vancouver, Canada.
- Chen C.H., Hsiao P.C., Lai J.W., Lin M.L., Weng Y.T., Tsai K.C. (2004). "Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame: Part 2 – Construction and testing", *Atti della Tredicesima Conferenza Mondiale di Ingegneria Sismica*, Vancouver, Canada.
- Mazzolani F.M., D'Aniello M., Della Corte G. (2005). "Modal testing and dynamic identification of a two-story RC building", *Conferenza Internazionale sull'Ingegneria Sismica per i 40 anni dell'IZIS*, Skopje-Ohrid, Macedonia.
- D'Aniello M., Della Corte G., Mazzolani F.M. (2007). "A special type of buckling-restrained brace for seismic retrofitting of RC buildings: design and testing", *Atti del XXI Congresso C.T.A.*, Catania, Italia.
- Dolce M., Cardone D., Moroni C., Mucciarelli M., Nigro D., Ponzo F.C., Santarsiero G. (2004). "ILVA-IDEM project: in situ experimental test of the seismic upgrading with re-centering SMA-based braces", *Atti dell'Undicesima Conferenza Italiana di Ingegneria Sismica*, Genova, Italia.
- Della Corte G., Barecchia E., Mazzolani F.M. (2006). "Seismic upgrading of RC buildings by FRP: full scale tests of a real structure"; *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5.