

## Miglioramento sismico ed energetico degli edifici esistenti mediante “Cappotto Sismico”: prove sperimentali ed interpretazione dei risultati

Scotta Roberto<sup>+</sup>, De Stefani Lorenzo<sup>+</sup>, Stella Alberto<sup>+</sup>, Pertile Valentina<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Via Marzolo 9, 35131 Padova

### ABSTRACT

Il territorio italiano è contraddistinto dalla presenza di un patrimonio edilizio esistente in larga parte caratterizzato da scarse prestazioni sia a livello sismico che termico. La persistenza di questi limiti impone quindi la necessità di definire un sistema di miglioramento integrato che permetta di incrementare la qualità dell'edificio sotto entrambi i punti di vista. Una risposta a questa necessità viene assicurata dal Geniale Cappotto Sismico Ecosism®, un'innovativa soluzione tecnologica progettata a misura in funzione degli obiettivi di incremento delle prestazioni sismiche ed energetiche.

Il Cappotto Sismico Ecosism® è un sistema integrato costituito da una lastra sottile in calcestruzzo armato gettato in opera all'interno di due strati di materiale isolante personalizzabile. Il getto e l'armatura di rinforzo, opportunamente dimensionati in fase di progetto, vengono resi solidali alla struttura esistente mediante l'inserimento di opportuni ancoraggi che, disposti a livello delle fondazioni, dei cordoli di piano ed eventualmente secondo opportuni allineamenti verticali, garantiscono la massima collaborazione tra il nuovo sistema e la struttura esistente. Il sistema viene prodotto a misura sulla base del rilievo architettonico in situ ed in funzione del progetto strutturale sviluppato dal tecnico incaricato. I pannelli del Cappotto Sismico, prodotti con un'altezza pari a quella di interpiano della struttura e già corredati delle guide per la corretta posa in opera delle armature strutturali, ricalcano fedelmente i prospetti dell'edificio (predisposizione delle forometrie in fase di produzione) e possono essere personalizzati mediante l'utilizzo di differenti tipologie di materiale isolante.

In questo lavoro viene riportato un estratto dei risultati ottenuti in seguito all'esecuzione di una prima campagna di prove sperimentali svolte dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova su telai campione in scala 1:1 ai quali è stato applicato il Cappotto Sismico Ecosism®. Verranno inoltre riportate alcune valutazioni analitiche relative alla resistenza, alla rigidità e alla duttilità del nuovo sistema di miglioramento integrato.

### INTRODUZIONE

La maggior parte degli edifici italiani ad uso residenziale (circa il 77%) è stato realizzato prima del 1981, quando solo il 25% circa del territorio era classificato come sismico. Questo comporta che gli edifici realizzati in zone all'epoca classificate come “non sismiche” presentino un rilevante deficit di protezione nei confronti dei terremoti.

In aggiunta, il patrimonio edilizio esistente è caratterizzato anche da un elevato deficit di isolamento termico, essenzialmente derivante dal ritardo legislativo nell'adozione di opportuni criteri di progettazione dell'isolamento termico dell'involucro edilizio. Infatti prima dell'entrata in vigore della legge n.10 del 1991, la progettazione degli edifici avveniva senza alcuna verifica della capacità di limitazione della dispersione del calore da parte delle pareti e dei solai. Inoltre la richiesta di prestazioni termiche passive è cresciuta notevolmente negli ultimi anni in seguito al progressivo allineamento delle normative agli obiettivi stabiliti a livello mondiale con l'accordo di Kyoto.

L'importanza sociale derivante dalla grande quantità di edifici aventi ridotta prestazione termica e sismica impone pertanto la necessità di definire tecniche di intervento che mirino alla riduzione della vulnerabilità sismica ed all'incremento dell'efficienza energetica nell'ambito di un approccio integrato.

Ad oggi esistono diverse tecniche per l'adeguamento sismico degli edifici, specifiche per le diverse tipologie strutturali (ElGawady et al. 2004), (Priestly e Seible 1995). Sono inoltre presenti tecnologie per la riqualificazione dell'involucro ed il contenimento delle dispersioni termiche (Zhenjun et al. 2012). Ciononostante è sempre più sentita l'esigenza di identificare e sviluppare sistemi di retrofitting integrato (Feroldi et al. 2014) che agiscano contemporaneamente sui due problemi. La soluzione descritta nel presente lavoro rientra in quest'ultima casistica e viene qui presa in considerazione essenzialmente per gli aspetti strutturali.

## DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Il Cappotto Sismico Ecosism® consiste in un sistema di rivestimento delle facciate esterne degli edifici avente funzione sia strutturale che di isolamento termico.

Tale sistema è composto da un cassero a rimanere costituito da due strati di materiale isolante personalizzabili, distanziati a formare un'intercapedine in cui viene realizzata in opera una parete strutturale in calcestruzzo armato.

Uno dei principali vantaggi della tecnologia è la sua auto-portanza in fase di getto della parete: la maglia tridimensionale metallica di fili in acciaio zincato, tipica del sistema costruttivo Ecosism®, permette infatti di realizzare in opera il getto della parete senza la necessità di dover contrastare la spinta del getto con eventuali opere accessorie.

Il collegamento strutturale tra la "nuova epidermide antisismica" e la struttura portante esistente avviene mediante una serie di connettori installati nei cordoli e nelle travi di piano. In corrispondenza di questi elementi, lo strato di materiale isolante interno a contatto con la parete viene preventivamente rimosso, realizzando così una nervatura orizzontale di spessore maggiorato (Figura 1). Il sistema consente inoltre di realizzare, se necessario, delle nervature verticali e orizzontali che permettono di irrigidire la parete.

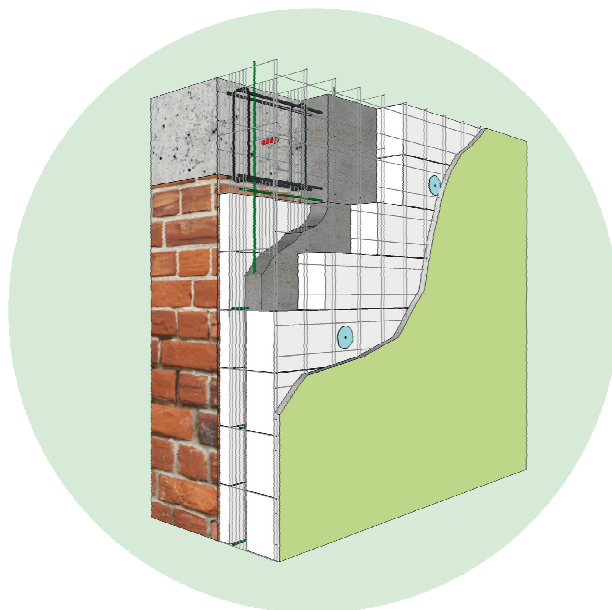


Figura 1: Cappotto Sismico Ecosism®.

Le nuove pareti sottili in c.a. così realizzate, costituiscono un sistema che lavora in parallelo agli elementi resistenti della struttura esistente.

Lo spessore della lastra e la quantità di armatura vengono determinate in funzione delle azioni orizzontali previste e della capacità della struttura esistente di resistere ad esse. Per la conformazione del sistema, in fase di dimensionamento e verifica, si assume che le azioni verticali statiche rimangano affidate alla struttura esistente, mentre le azioni orizzontali vengono ripartite in funzione della rigidità tra la nuova struttura e quella esistente.

La presenza di nervature orizzontali e verticali delimita dei campi costituiti da lastre di spessore ridotto in calcestruzzo armato e consente di inibire fenomeni di instabilità fuori piano delle lastre stesse (Pertile et al. 2017).

Per caratterizzare il comportamento del sistema Cappotto Sismico ECOSISM® è stata realizzata una prima campagna di prove sperimentali, i cui risultati vengono esposti nel seguito.

## CAMPAGNA SPERIMENTALE

La campagna di prove sperimentali per la caratterizzazione del comportamento del sistema Cappotto Sismico Ecosism® ha visto la realizzazione di prove cicliche quasi statiche con cicli di ampiezza crescente su pareti monopiano in scala 1:1.

Tali prove sono state definite sulla base di quanto indicato per le prove di TIPO 3 nelle *“Linee guida per sistemi costruttivi a pannelli portanti basati sull’impiego di blocchi cassero e calcestruzzo debolmente armato gettato in opera”* emanate dal C.S.LL.PP. il 10/02/2011.

### Descrizione dei campioni

Sono stati realizzati 4 campioni così definiti:

- CAMPIONE 1: parete piena 3 x 3 m con nervature orizzontali e verticali;
- CAMPIONE 2: parete 4 x 3 m con foro porta e nervature orizzontali e verticali;
- CAMPIONE 3: parete piena 3 x 3 m con sole nervature orizzontali;
- CAMPIONE 4: parete 4 x 3 m con foro porta e sole nervature orizzontali.

Tutti i campioni sono stati costituiti utilizzando un telaio di supporto in cemento armato composto da due pilastri di sezione quadrata di dimensioni 25 x 25 cm, armati con 4 Ø 12 longitudinali e staffe Ø 8 con passo 30 cm, e da una trave di sezione rettangolare di dimensioni 25 x 40 cm, armata con 4 Ø 14 longitudinali e staffe Ø 8 con passo 30 cm. All’interno della trave è stato collocato un tubo in pvc di diametro 100 mm per permettere il passaggio di una barra in acciaio ad alta resistenza per l’applicazione della forza al campione.

Il Cappotto Sismico, collegato al telaio mediante viti autofilettanti da calcestruzzo che lavorano a taglio, è stato applicato su entrambe le facce della struttura portante al fine di ottenere una sezione simmetrica della parete ed evitare il verificarsi di fenomeni di svergolamento durante l’applicazione del carico. Il metodo scelto per l’applicazione dell’azione orizzontale consente di valutare qualitativamente l’efficacia del sistema di connessione strutturale, progettato per impedire lo scorrimento tra il Cappotto Sismico e il telaio di supporto. La forza di spinta e tiro è stata applicata al telaio mediante opportuna carpenteria metallica.

I campioni 1 e 3 differiscono tra loro per la sola presenza/assenza di nervature verticali in corrispondenza dei pilastri. Analoghe caratteristiche differenziano i campioni 2 e 4. Il confronto dei dati ottenuti ha consentito di valutare l’effetto delle nervature verticali sulla prestazione del Cappotto Sismico sottoposto a sollecitazioni orizzontali.

Nel seguito verranno riportati i soli valori relativi ai campioni 3 e 4, ovvero quelli privi di nervature verticali, in quanto nei casi analizzati non è stato riscontrato alcun effetto significativo legato alla presenza di queste ultime.

Le Figure 2, 3, 4 e 5 illustrano le specifiche relative ai singoli campioni. Le quantità di armatura indicate sono relative ad una singola faccia del campione.

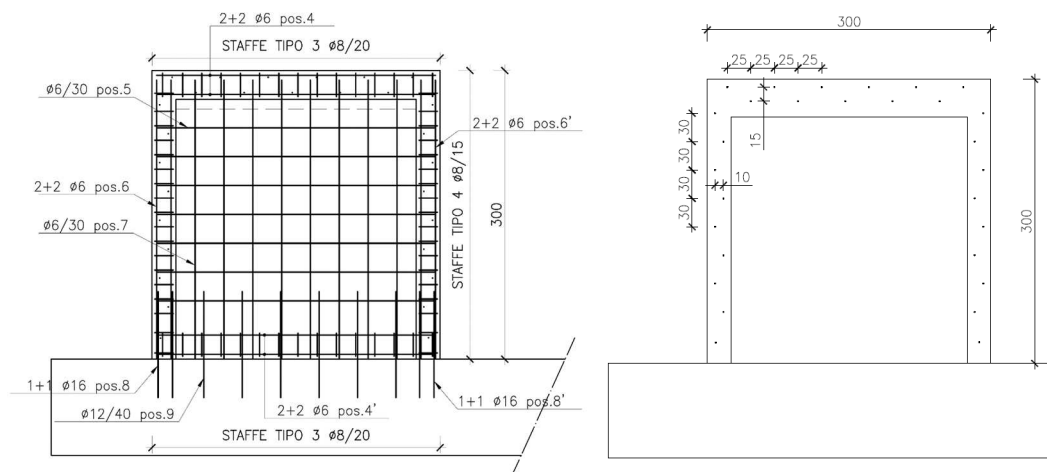


Figura 2: Armatura del Cappotto Sismico nel Campione 1 (a sinistra) e posizione dei connettori (a destra).

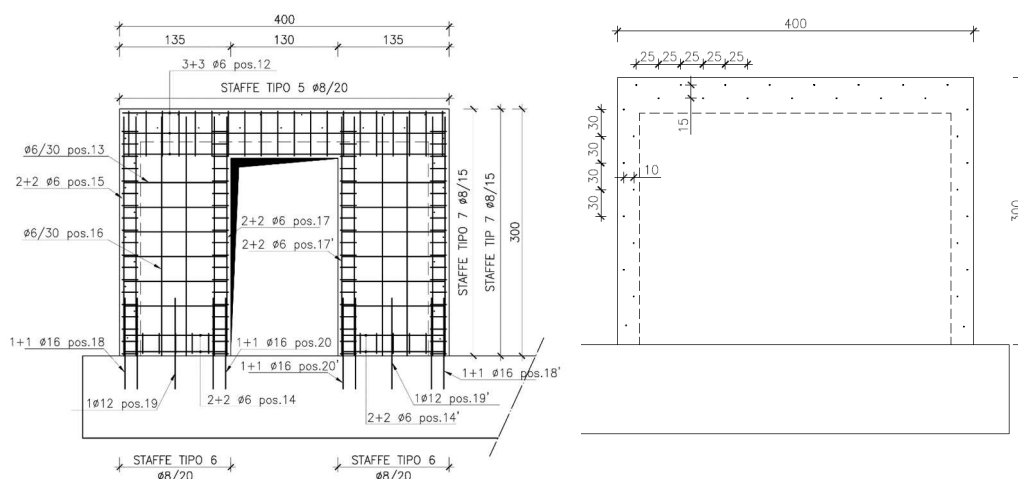


Figura 3: Armatura del Cappotto Sismico nel Campione 2 (a sinistra) e posizione dei connettori (a destra).

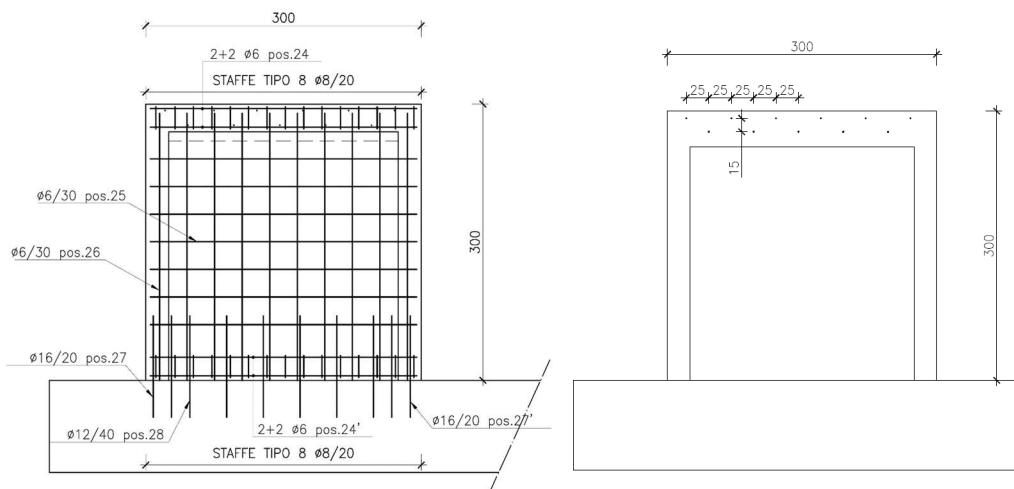


Figura 4: Armatura del Cappotto Sismico nel Campione 3 (a sinistra) e posizione dei connettori (a destra).

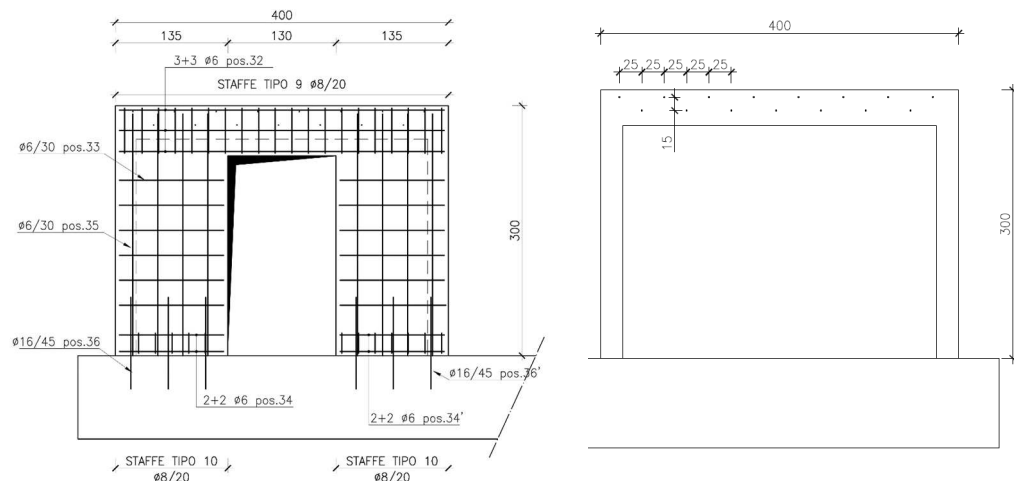


Figura 5: Armatura del Cappotto Sismico nel Campione 4 (a sinistra) e posizione dei connettori (a destra).

Tutti i campioni testati sono stati realizzati utilizzando un Cappotto Sismico caratterizzato dalla seguente stratigrafia: 10 cm di EPS bianco esterno, 6 cm di lastra in calcestruzzo e 4 cm di EPS bianco interno.

I campioni 1 e 2 sono caratterizzati dalla presenza di nervature orizzontali di altezza 30 cm e spessore 10 cm e da nervature verticali di larghezza 25 cm e spessore 10 cm poste, nel caso del campione 1, in corrispondenza dei pilastri del telaio di supporto e, nel caso del campione 2, in corrispondenza sia dei pilastri che della porta. Tali nervature sono state armate con staffe Ø8 poste a passo 20 cm e con 4 barre longitudinali Ø6. Il collegamento strutturale tra il Cappotto Sismico e il telaio di supporto è stato realizzato mediante fissaggio di viti autofilettanti da calcestruzzo di diametro Ø12 mm e lunghezza 130 mm installate direttamente sul telaio e lasciate sporgere per una lunghezza pari a 5 cm.

### Descrizione del setup di prova

Per l'esecuzione delle prove sopra descritte è stato progettato un banco prova ad hoc, realizzato presso la sede di ECOSISM srl a Battaglia Terme (PD). Tale banco prova è costituito da una platea di fondazione in calcestruzzo di lunghezza 12,50 m, larghezza 3,50 m e spessore 1,00 m che sostiene due setti in cemento armato di altezza 3,50 m e spessore 0,40 m, come rappresentato in Figura 6.



Figura 6: Banco prova realizzato e telai di supporto dei campioni.

I setti centrali costituiscono un contrasto sufficientemente rigido e resistente per l'applicazione della forza di spinta e tiro al campione sottoposto a prova. Per l'applicazione della forza è stato impiegato un martinetto a doppio effetto (capacità di spinta pari a 100 t e di trazione pari a 58 t) governato da una pompa manuale ad olio di adeguata capacità.

### Risultati delle prove cicliche quasi statiche

Le prove sono state eseguite dal laboratorio Expin S.r.l., spin-off dell'Università di Padova. I campioni sono stati sottoposti a prova ciclica quasi statica eseguita in controllo di spostamento. Sono stati applicati cicli di carico con incrementi di spostamento pari a 0.5 mm. Poiché i test sui campioni con nervature verticali hanno dato risultati analoghi a quelli senza nervature verticali, nelle figure 7 e 8 vengono riportati i soli grafici forza-spostamento relativi alle storie di carico dei campioni 3 e 4.

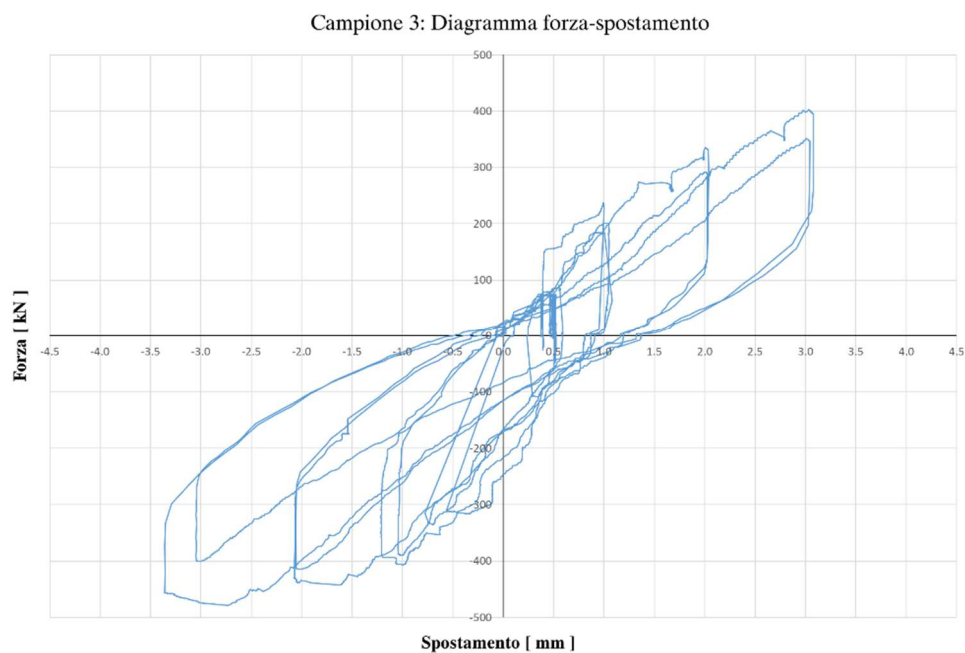


Figura 7: Grafico forza-spostamento relativo al campione 3.

Campione 4: Diagramma forza-spostamento

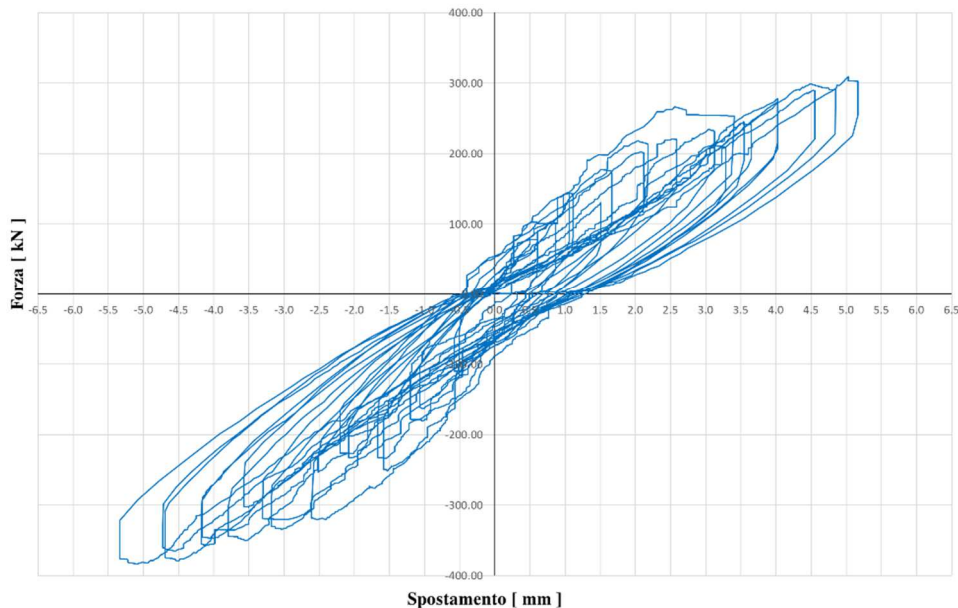


Figura 8: Grafici forza-spostamento relativi ai campioni 4.

Per il campione 3 si è ottenuto, in spinta, uno spostamento ultimo di 3mm applicando una forza di 400 kN, mentre in tiro è stato raggiunto uno spostamento pari a -3.4 mm applicando una forza pari a -480 kN. Per il campione 4 si è ottenuto, in spinta, uno spostamento di 4 mm applicando una forza di 290 kN, mentre in tiro è stato raggiunto uno spostamento pari a -4.2 mm applicando una forza pari a -380 kN.

Sulla base dell'analisi dei grafici ottenuti, è possibile affermare che i cicli di isteresi rimangono tendenzialmente stabili e che, in relazione al livello di forza applicato, vi sono ridotte entrate in campo plastico. Inoltre dall'andamento dei cicli si può osservare come non siano presenti elevate deformazioni residue. In relazione a ciò, è quindi possibile individuare una relazione pressoché lineare tra gli incrementi di forza e di spostamento durante l'applicazione del carico, sia nelle fasi di spinta che in quelle di tiro.

## CONFRONTO CON LE PREVISIONI ANALITICHE

I risultati delle prove sperimentali sono stati confrontati con i seguenti valori teorici:

- Resistenza a taglio analitica, calcolata mediante le formule proposte dalle NTC08;
- Calcolo della rigidezza elastica mediante modellazione agli elementi finiti.

### 1) Calcolo analitico delle resistenze

Al fine di realizzare una corretta caratterizzazione del sistema, è stato condotto uno studio analitico dei quattro campioni mediante il calcolo delle resistenze teoriche a taglio, determinate secondo il metodo riportato nella normativa italiana all'epoca vigente (NTC08).

Per le valutazioni analitiche sono stati adottati i seguenti valori medi delle resistenze per il calcestruzzo e l'acciaio delle armature.

#### Calcestruzzo pompabile C25/30

Resistenza media a compressione cubica,	$R_{cm} = 39.1 \text{ MPa}$
Resistenza media a compressione cilindrica,	$f_{cm} = 32.5 \text{ MPa}$
Resistenza media a trazione,	$f_{ctm} = 2.56 \text{ MPa}$

Modulo Elastico,  $E_c = 25000 \text{ MPa}$

Acciaio da armatura

Tensione media di snervamento,  $f_{ym} = 540 \text{ MPa}$   
 Tensione media di rottura,  $f_{tm} = 640 \text{ MPa}$   
 Modulo elastico,  $E_s = 210000 \text{ MPa}$

Assumendo i valori  $\theta = 45^\circ$  e  $\alpha = 90^\circ$  rispettivamente per l'angolo di inclinazione del puntone compresso di calcestruzzo e per l'angolo di inclinazione dell'armatura a taglio, sono stati determinati, mediante le relazioni [4.1.18] e [4.1.19] delle NTC2008, i valori di resistenza al taglio per i campioni 3 e 4, riportati in Tabella 1 ed evidenziati in Figura 9 e Figura 10.

Campione	$V_{rd,y} (f_{ym} = 540 \text{ MPa})$	$V_{rd,u} (f_{tm} = 640 \text{ MPa})$
3	315.95 kN	374.50 kN
4	299.70 kN	355.20 kN

Tabella 1: Valori di resistenza a taglio.

Rispetto ai valori massimi sperimentali ottenuti per il campione 3, pari a 400 kN in spinta e a -480 kN in tiro, le relazioni analitiche sottostimano i valori di resistenza del 27% e del 52% rispetto alla resistenza media di snervamento dell'acciaio. Se si fa riferimento alla resistenza ultima le sottostime si riducono invece al 7% e al 28%.

Per il campione 4 invece, le relazioni analitiche, utilizzando come termine di confronto la resistenza media di snervamento dell'acciaio, tendono a sovrastimare del 3% e a sottostimare del 27% i valori massimi sperimentali di spinta e tiro, pari rispettivamente a 290 kN e -380 kN. Se si fa riferimento alla resistenza ultima, le relazioni analitiche sovrastimano il valore sperimentale in spinta del 15% e sottostimano quello in tiro del 7%.

2) *Calcolo della rigidezza*

In entrambe le tipologie di campione (con o senza apertura) si evidenzia una diminuzione di rigidezza all'aumentare del numero di cicli e dello spostamento imposto.

Si riporta di seguito, per i campioni 3 e 4, il confronto tra la rigidezza media valutata al variare dei cicli di carico e la rigidezza ricavata mediante modellazione numerica agli elementi finiti, ottenuta adottando sia un valore di modulo elastico intero che uno fessurato.

Per una più agevole lettura dei grafici di seguito riportati, vengono definite le seguenti quantità:

$K_i$  = rigidezza media all'i-esimo ciclo di carico;

$K_{n,E}$  = rigidezza derivata dal modello numerico con modulo elastico pari a  $E = 25000 \text{ MPa}$ ;

$K_{n,E/2}$  = rigidezza derivata dal modello numerico con modulo elastico dimezzato pari a  $E^* = 12500 \text{ MPa}$ .

In Figura 9, con riferimento alla curva forza-spostamento ottenuta dal test di spinta ciclica alternata sul campione 3, viene riportato il confronto tra le rigidezze medie sperimentali determinate per ogni ciclo e le rigidezze determinate per via numerica (modellazione FEM). Oltre alle rigidezze medie di ogni ciclo è riportata anche la rigidezza iniziale determinata in corrispondenza di uno spostamento pari a +0.3 mm.



Campione 3: Confronto analitico-sperimentale in termini di rigidezza e resistenza

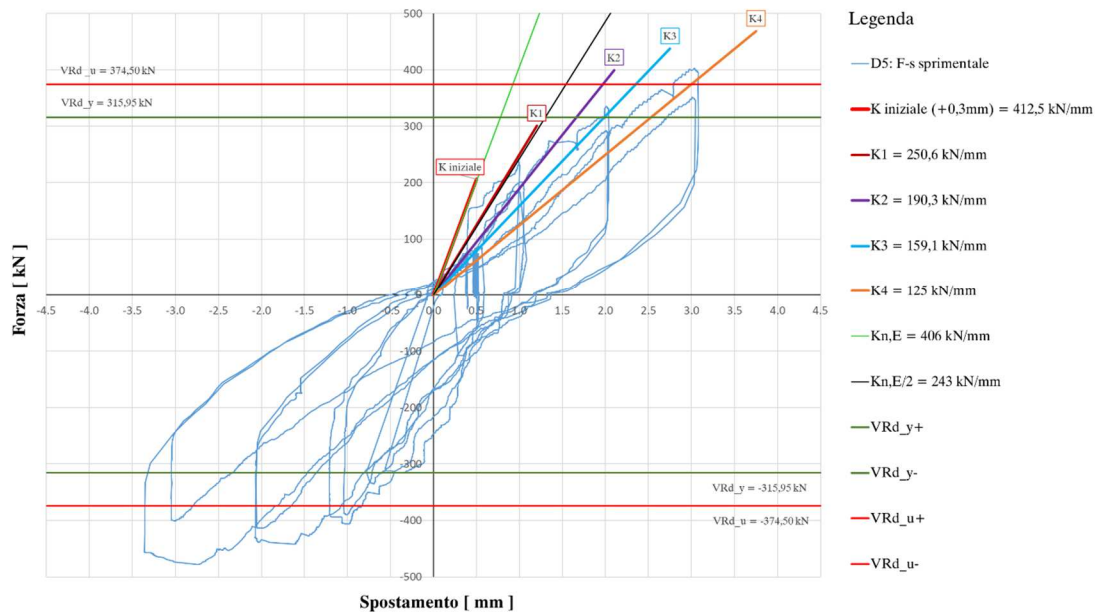


Figura 9: Confronto tra le rigidezze sperimentali e le rigidezze numeriche – Campione 3.

Per il campione 3 la rigidezza sperimentale assume valori variabili tra  $K_1 = 250.6 \text{ kN/mm}$  e  $K_4 = 125 \text{ kN/mm}$ .

Con riferimento all'ultimo ciclo effettuato, si osserva una riduzione di rigidezza del 50% rispetto a quella media relativa al primo ciclo:  $K_4 = 0.5 K_1$ . Rispetto al valore iniziale di rigidezza è stata invece osservata una riduzione pari al 30% circa:  $K_4 = 0.3 K_{\text{iniziale}}$ .

La rigidezza ottenuta dal modello FEM con modulo elastico  $E = 25000 \text{ MPa}$  è pari a  $K_{n,E} = 406 \text{ kN/mm}$  ed è paragonabile a quella sperimentale iniziale  $K_{\text{iniziale}} = 412.5 \text{ kN/mm}$ . La rigidezza ottenuta dal modello FEM con modulo elastico  $E^* = E/2 = 12500 \text{ MPa}$  è pari invece a  $K_{n,E/2} = 243 \text{ kN/mm}$  ed è paragonabile alla rigidezza sperimentale media ottenuta al primo ciclo.

In Figura 10, con riferimento al ciclo forza-spostamento ottenuto dal test di spinta ciclica alternata sul campione 4, viene presentato un confronto tra le rigidezze medie sperimentali determinate per ogni ciclo e le rigidezze determinate per via numerica (modellazione FEM).

Per il campione 4, la rigidezza sperimentale varia da  $K_1 = 231.7 \text{ kN/mm}$  a  $K_9 = 57.5 \text{ kN/mm}$ . All'ultimo ciclo la rigidezza corrisponde quindi al 25% circa di quella iniziale:  $K_9 = 0.25 K_1$ .

La rigidezza ottenuta dal modello FEM con modulo elastico  $E = 25000 \text{ MPa}$  è pari a  $K_{n,E} = 292.8 \text{ kN/mm}$  ed è paragonabile a quella sperimentale ottenuta al primo ciclo  $K_1$ .

La rigidezza ottenuta dal modello FEM con modulo elastico  $E^* = E/2 = 12500 \text{ MPa}$  è pari a  $K_{n,E/2} = 175.5 \text{ kN/mm}$  e si colloca circa a metà tra i valori di rigidezza sperimentali medi ottenuti tra il primo ed il secondo ciclo.

Campione 4: Confronto analitico-sperimentale in termini di rigidezza e resistenza

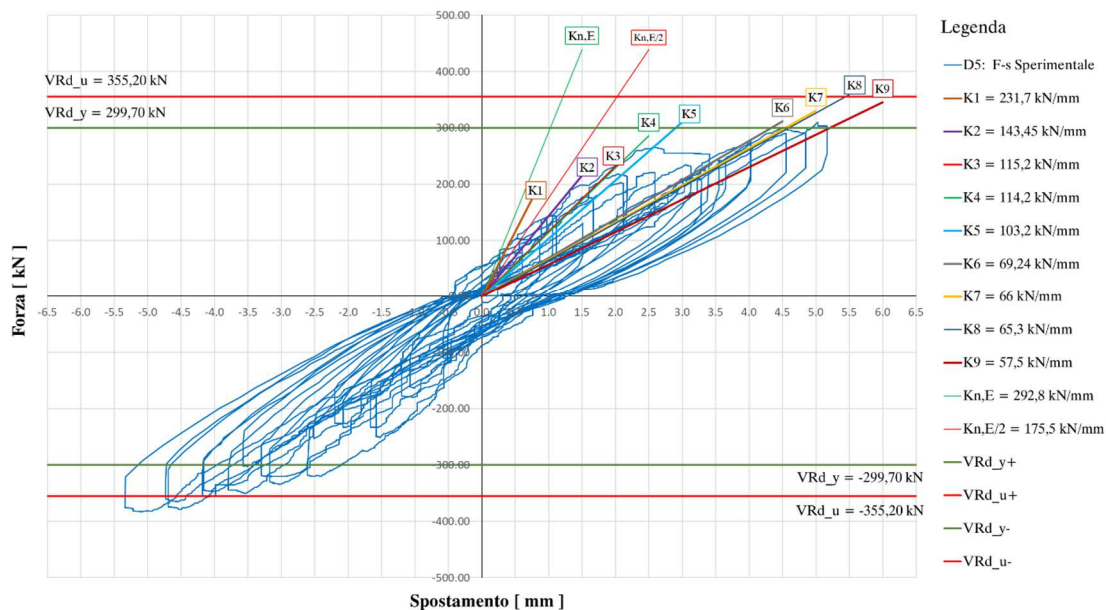


Figura 10: Confronto tra le rigidezze sperimentali e le rigidezze numeriche – Campione 4.

## CONCLUSIONI

In questa ricerca sono state svolte alcune prove sperimentali per la caratterizzazione del comportamento del sistema Cappotto Sismico Ecosism®. Sono state eseguite prove cicliche quasi statiche con cicli di ampiezza crescente su quattro pareti mono-piano in scala 1:1. Tali prove sono state definite sulla base di quanto indicato per le prove di Tipo 3 nelle “Linee guida per sistemi costruttivi a pannelli portanti basati sull’impiego di blocchi cassero e calcestruzzo debolmente armato gettato in opera” emanate dal C.S.LL.PP. il 10/02/2011. I risultati dei test sono stati confrontati con le resistenze del sistema calcolate mediante le relazioni analitiche proposte dalla normativa italiana vigente all’epoca delle prove (D.M. 14/01/2008), impiegando valori medi di resistenza dei materiali e valore unitario dei coefficienti di sicurezza dei materiali.

Dal confronto è emerso come il calcolo teorico della resistenza risulti essere cautelativo rispetto a quanto determinato nei test sperimentali. Inoltre lo studio della rigidezza al variare dei cicli ha messo in evidenza una marcata riduzione della rigidezza stessa all’aumentare dello spostamento imposto. È pertanto consigliata l’adozione di un modulo elastico dimezzato nella modellazione numerica effettuata per lo svolgimento delle analisi sismiche lineari, come previsto al §7.2.6 delle nuove norme tecniche per le costruzioni (DM 17/01/2018).

La conformazione geometrica delle armature contenute nel Cappotto Sismico ECOSISM non rispetta i dettagli indicati in normativa per le zone critiche delle strutture in C.A. dissipative ( $q > 1.5$ ). Nella progettazione di interventi di miglioramento o adeguamento sismico si consiglia quindi l’adozione di un fattore di comportamento pari a  $q = 1.5$  come suggerito dal DM 17/01/2018 per le costruzioni esistenti a comportamento non dissipativo.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l’Ing. Giacomo Goegan per l’elaborazione dei dati sperimentali effettuata durante lo svolgimento della sua tesi di laurea.

## RIFERIMENTI

ElGawady M., Lestuzzi P., Bardoux M., 2004. A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM. 13th International Brick and Block Masonry Conference. July 4-7, Amsterdam, NL.

Feroldi F., et al, 2014. Miglioramento e adeguamento sismico di edifici contemporanei mediante approccio integrato energetico, architettonico e strutturale con soluzioni a doppio involucro a minimo impatto ambientale, *Progettazione Sismica*, 5(2), 31-47.

Priestley M.N.J, Seible F., 1995. Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures, *Construction and Building Materials*, 9(6), 365-377.

Zhenjun M., et al., 2012. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art, *Energy and Buildings*, 55, 889-902.

Pertile V. et al., 2017. Sviluppo e caratterizzazione di un sistema per il miglioramento delle prestazioni sismiche ed energetiche degli edifici esistenti, *Atti del convegno ANIDIS 2017*, Pistoia.

NTC 2008. Decreto Ministeriale del 14 Gennaio 2008, "Norme Tecniche per le costruzioni".

NTC 2018. Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018, "Aggiornamento Norme Tecniche per le costruzioni".