

# Intervenire sull'esistente: il miglioramento e l'adeguamento sismico mediante il Sistema CAM®

Marianna Leonori <sup>a</sup>, Alessandro Vari <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ufficio tecnico Edilcam Sistemi Srl

<sup>b</sup> Ricerca e sviluppo Edilcam Sistemi Srl

## ABSTRACT

Esistono due principali approcci al problema dell'adeguamento o miglioramento sismico degli edifici esistenti. L'uno legato all'abbattimento della domanda sismica alla struttura, e quindi si è nel campo dei sistemi di isolamento e dissipativi, l'altro legato all'aumento della capacità resistente degli elementi strutturali e quindi a tutta la vasta famiglia dei sistemi di consolidamento strutturale.

Non è detto che questi due approcci non possano coesistere; è il caso ad esempio di strutture che presentino già carenze per i soli carichi statici o di rinforzi locali che debbano essere eseguiti su porzioni esistenti della struttura, in concomitanza al posizionamento dei sistemi di isolamento.

Il Sistema CAM® è un sistema di consolidamento delle strutture esistenti (in calcestruzzo, in muratura o realizzate tramite elementi prefabbricati): il principio alla base del Sistema è l'impiego di un nastro (dimensione 19x0.90 mm) di acciaio inossidabile come componente strutturale che, opportunamente messo in tensione all'atto dell'applicazione, permette l'immediata attivazione del suo contributo resistente, già dalla fase d'esercizio della struttura.

Nelle strutture in muratura, in particolare in quelle storiche e vincolate, è particolarmente apprezzato dalle soprintendenze, grazie sia alla sua reversibilità e compatibilità con elementi di fine pregio architettonico, sia perché permette di 'cucire' insieme la struttura, realizzando il funzionamento scatolare scongiurando i meccanismi locali che determinano il collasso fragile delle strutture murarie..

## 1 INTRODUZIONE

Nell'ambito della conservazione dell'edilizia storica l'azione principale cui dobbiamo fare riferimento è l'azione sismica.

Il collasso degli edifici in muratura è quasi sempre legato al problema della discontinuità strutturale a livello locale o globale; la disgregazione della parete muraria per effetto della dislocazione degli elementi lapidei è una mancanza di continuità che si osserva a livello locale (di tessitura) mentre il collasso per ribaltamento di singole porzioni o pareti è dovuto all'assenza di continuità tra macroelementi (tra pareti o tra pareti e orizzontamenti).

Gli edifici in CA nascono come insieme di elementi continui e le principali problematiche sono legate a carenze progettuali sia in termini di quantitativo di armatura, longitudinale o trasversale, sia in termini di una cattiva

distribuzione di masse e rigidzze, in pianta o in elevazione, che determinano una concentrazione degli sforzi in porzioni limitate.

Nella realtà ciò che determina il collasso prematuro, tanto per gli edifici in muratura quanto per quelli in CA, è la mancata attivazione dei meccanismi duttili per la struttura, a favore dei fragili.

Nei manufatti in muratura il meccanismo fragile è determinato dall'attivazione di un meccanismo resistente 'in serie' piuttosto che 'in parallelo' in cui gli elementi (microelementi i lapidei, macroelementi le singole pareti e i solai) collassano singolarmente.

Un manufatto ben legato, il cui il comportamento è 'scatolare', permette l'attivazione dei meccanismi resistenti più energivori (resistenza nel piano di tutti i pannelli).

L'attivazione dei meccanismi duttili nei manufatti in muratura passa dal ripristino della continuità strutturale e dei vincoli assenti o non efficaci al rinforzo gerarchico condizionante la formazione di meccanismi duttili nel piano a

precedere quelli fragili (rinforzo prevalente a taglio, ed incremento di duttilità flessionale).

Negli edifici in CA dove la continuità è assicurata, la strategia di intervento deve essere legata imponendo la gerarchia di rotture a favore dei meccanismi duttili ed eliminando le fragili (schiacciamento degli elementi compressi, rottura a taglio, rottura del nodo trave-pilastro).

Inquadrando il problema in quest'ottica sarà più facile leggere come l'intervento con Sistema CAM® rappresenti una valida soluzione tanto per i fabbricati in muratura tanto per i fabbricati in CA.

## 2 LA SPERIMENTAZIONE SULLA MURATURA

Il progetto di ricerca In.CAM.M.I.N.O. era finalizzato alla verifica sperimentale dell'efficacia del CAM® nell'adeguamento sismico di manufatti in muratura in pietrame disordinato (ciottoli e pietre erratiche irregolari).

L'indagine sperimentale è stata condotta su manufatti esistenti in scala reale, ubicati nella frazione di Giampileri del Comune di Messina (Figure 1 e 2), per i quali era prevista la demolizione, a seguito dei nefasti eventi generati dalla colata detritica del 1 Ottobre 2009, per la costruzione di un canale fagatore di smaltimento delle acque. La campagna sperimentale in situ ha interessato sia pannelli murari, che un arco. Entrambe le tipologie, realizzate in muratura in pietrame disordinato con sovrapposto un sottile strato di intonaco non strutturale (Figura 2), sono state sottoposte ad azioni verticali ed orizzontali, nelle condizioni di fatto e dopo interventi di rinforzo diversificati.

In particolare, dal muro mostrato in Figura 2, sono stati isolati diversi pannelli, alcuni provati nella condizione di fatto, altri rinforzati con il sistema CAM®, in alcuni casi abbinato a reti in materiale plastico. Per l'arco in muratura, anch'esso mostrato in Figura 2, sono state effettuate prima delle prove nello stato di fatto, con l'obiettivo di produrre un significativo danneggiamento dell'elemento strutturale; successivamente, l'arco è stato rinforzato con il sistema CAM® per essere nuovamente sottoposto a prove di carico orizzontale.

Il sistema CAM® è stato utilizzato per il rinforzo tridimensionale, per confinare adeguatamente la muratura ed indurre contestualmente un benefico stato di

precompressione triassiale, come sarà più dettagliatamente descritto in seguito.



Figura 1. Vista aerea della zona d'intervento



Figura 2. Parete ad arco e muro oggetto della sperimentazione.

### 2.1 Le prove su pannelli in muratura al vero

La prima fase ha analizzato il comportamento di sette pannelli, le cui dimensioni sono rappresentate in Figura 3, ricavati nella zona identificata in blu come da Figura 2. Il pannello n. 1 è stato impiegato per una prova di compressione non distruttiva allo scopo di conoscere le caratteristiche meccaniche della muratura in compressione pura, mentre i rimanenti sei pannelli sono stati sottoposti ad una prova di taglio-compressione (prova Sheppard).

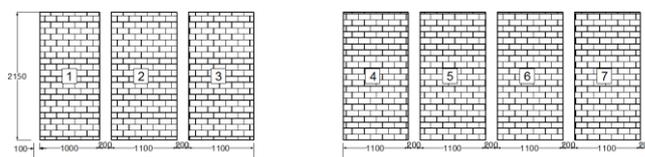


Figura 3. Schema dei pannelli murari

Per una corretta valutazione dell'efficacia del rinforzo CAM®, sono stati sottoposti a prova due pannelli senza effettuare su di essi nessun intervento (n. 2 e 3), in modo da poter valutare l'incremento di prestazioni ottenuto tramite l'applicazione del sistema CAM® ai 4 pannelli individuati dai numeri da 4 a 7.

Tutti i pannelli sono stati ricavati con identiche dimensioni (1.1x2.15x0.55 m), ad eccezione del pannello n. 1, sottoposto a prove di semplice compressione, la cui larghezza è stata scelta pari ad 1m.

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di valutare l'incremento di duttilità e resistenza indotto dalle diverse configurazioni di rinforzo con il sistema CAM<sup>®</sup>, integrato in alcuni casi da una rete polimerica strutturale. I nastri in acciaio impiegati hanno larghezza e spessore pari a 19mm e 0.9mm, rispettivamente, e sono stati disposti seguendo una maglia quadrata regolare di spigolo pari a 400 mm.

La rete strutturale polimerica a maglia quadrangolare di dimensioni 51x71mm ed avente resistenza a trazione pari a 15 kN/m è stata posta con l'obiettivo di estendere il confinamento anche all'interno della maglia CAM<sup>®</sup>, in modo da contrastare quanto più possibile il dislocamento della muratura sotto l'azione di progetto.

Sono state analizzate le seguenti configurazioni:

- pannello 4: è stato previsto un rinforzo CAM<sup>®</sup> realizzato con 2 nastri sovrapposti orizzontali e 2 nastri sovrapposti verticali di acciaio AISI 304 (tensione di snervamento nominale pari a 220 MPa);
- pannello 5: come il 4 con aggiunta della rete strutturale polimerica;
- pannello 6: realizzato senza rete polimerica, i nastri orizzontali sono stati realizzati con acciaio AISI 304 C850 ad elevate prestazioni (tensione di snervamento nominale pari a 500 MPa);
- pannello 7: a quest'ultima configurazione è stata aggiunta la rete strutturale polimerica.

I pannelli sono stati ricavati operando tagli intermedi, in modo da lasciare un'intercapedine di circa 20 cm tra un pannello e l'altro necessaria al posizionamento dei martinetti di spinta, da una parte, ed i contrasti dalla parte opposta. E' stato inoltre costruito un cordolo in CA in sommità, di dimensioni 55x50, con calcestruzzo di classe nominale C25/30, con una doppia valenza:

- realizzare per i pannelli una condizione di vincolo in sommità prossima a quella di incastro,
- consentire l'applicazione sul muro di un carico verticale costante pari a 20 kN attraverso due martinetti idraulici in contrasto ad una carpenteria metallica richiusa a terra.

Alla base, l'adeguato e analogo vincolo orizzontale tra i pannelli è stato realizzato

mediante l'impiego di profilati metallici di tipo UPN-200 inghisati alla muratura stessa.



Figura 4. Preparazione dei pannelli e inizio prova shepard del pannello 2

A metà altezza di ogni pannello sono state fissate delle coppie di profili UPN-200 al fine di ripartire uniformemente il carico orizzontale applicato tramite il martinetto spingente su una piastra di ripartizione di dimensioni 200x200x4 (Figura 5).

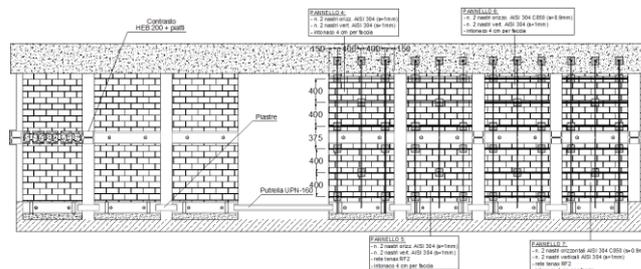


Figura 5. Disposizione dei contrasti metallici tra i pannelli e vincoli alla base dei pannelli

Il carico massimo raggiunto durante la prova di compressione sul pannello murario N°1 è stato pari a 383kN, corrispondente (sezione trasversale del pannello murario pari a 1000x430mm) ad una tensione massima di 0.89Mpa; si sono inoltre rilevati i valori a rottura per deformazione assiale e laterale rispettivamente pari al 3.7‰ e 3.2‰. Le curve carico-spostamento orizzontale ottenute dalle prove sperimentali di taglio-compressione eseguite sui pannelli sono riportate nelle Figure 6-8.

I valori di carico e di spostamento massimo sono riassunti nella Tabella 1.

I risultati mostrano che, in presenza di muratura in pietrame disordinato, il semplice inserimento della rete polimerica nell'intonaco consente di ottenere un incremento di resistenza alle azioni orizzontali di circa il 10%, mentre il sistema CAM<sup>®</sup> ha prodotto un incremento di resistenza di circa il 41% se realizzato con le modalità "tradizionali", e ben del 110 % se accoppiato alla rete polimerica.

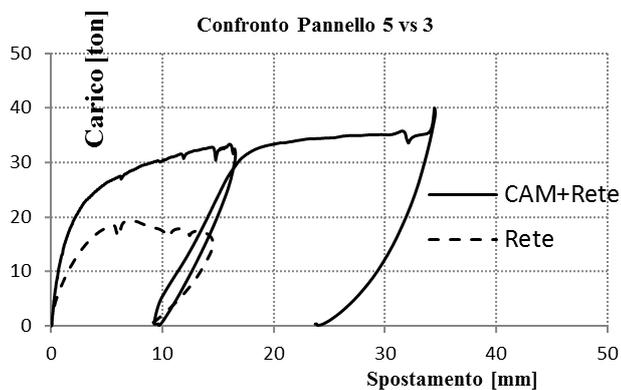


Figura 6. Evidente l'incremento in resistenza e duttilità del pannello rinforzato con nastro standard rispetto al pannello senza rinforzo. Drift a rottura che passa da 1% a 3.5%

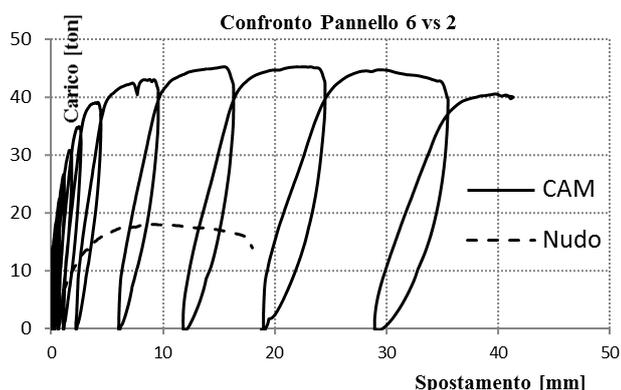


Figura 7. Sistema CAM® in configurazione con nastro ad alta resistenza. Ulteriore incremento di duttilità e resistenza con drift a rottura pari al 4%.

Notevolmente superiori sono risultate le prestazioni ottenute impiegando acciaio AISI 304 C850 ad alte prestazioni, per i quali si sono registrati incrementi di resistenza del 133% se impiegato secondo lo schema tradizionale, e del 171% se accoppiato alla rete polimerica.

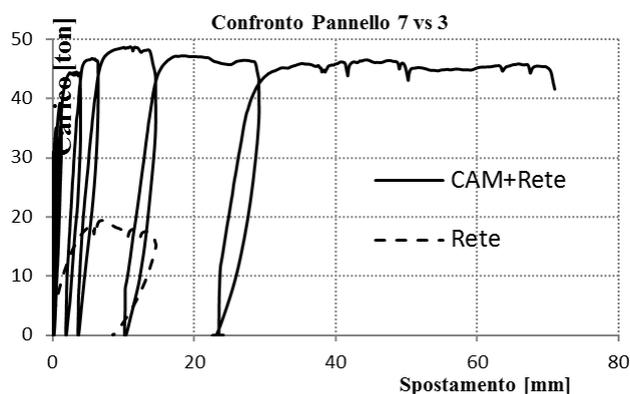


Figura 8. Sistema CAM® in configurazione con nastro ad alta resistenza e rete di ripartizione. Ulteriore incremento di resistenza con drift a rottura pari al 7%.

In tutti i casi il sistema CAM® ha prodotto elevate capacità deformative, registrando incrementi di spostamento ultimo sino al 971% in funzione della configurazione adottata.

Si vuole evidenziare come l'incremento in drift dei pannelli rinforzati, rispetto a quelli non rinforzati arrivi ad incrementi che vanno da 3 a 7 volte maggiori. Tale valore è enormemente maggiore del miglioramento in drift che la normativa concede alla muratura armata rispetto a quella non armata che vale 1.5.

La presenza del sistema di rinforzo ha prodotto uno stato fessurativo estremamente ricco, determinando una fessurazione diffusa sull'intero pannello, a differenza di quella del pannello non rinforzato caratterizzata da una singola fessura critica

Grandezza	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7
Carico Max (tonn)	17.98	19.35	26.16	39.92	45.24	48.66
Spot. Max (mm)	17.97	14.64	-	34.51	156.8	156.8

Tabella 1. Valori di carico e di spostamento massimo.

Il quadro fessurativo dei pannelli rinforzati con sistema CAM® è risultato mutato rispetto a quello ottenuto per i pannelli non rinforzati.



Figura 9. Confronto stato fessurativo tra pannello 2 non rinforzato ( a sinistra) e pannello 7 (a destra) rinforzato con CAM® ad alta resistenza

La formazione di varie fessure diagonali prima della rottura corrisponde ad una maggiore capacità dissipativa da parte della muratura in grado di mantenere resistenza residua post fessurazione ed innescare così una diffusione della frattura.

## 2.2 Prove su arco

La seconda fase sperimentale ha riguardato la valutazione dell'efficacia dello stesso sistema di rinforzo questa volta applicato su di un arco in muratura in scala reale. L'arco è stato isolato dal resto dell'edificio di cui era parte integrante mediante la creazione di un varco di separazione.

Al fine di ottenere informazioni sulle capacità di resistenza e di spostamento dell'arco è stato

applicato un carico ripartito in sommità di 30 kN che simulasse l'effetto stabilizzante del solaio o comunque di un carico portato.

La prova è stata eseguita impiegando un martinetto idraulico a contrasto con l'edificio adiacente, avente rigidità notevolmente maggiore della struttura sottoposta a prova. Mediante tale martinetto, è stata applicata un'azione orizzontale pseudo-statica a livello della fascia di piano (tra il solaio sovrastante ed il livello del concio di chiave).

Sono stati collegati 6 trasduttori di spostamento fra l'arco e una struttura in acciaio fissa di riferimento.

L'arco è stato dapprima sottoposto ad azione orizzontale sino al raggiungimento del tratto sub-orizzontale della curva carico spostamento, e la comparsa di un significativo livello di danneggiamento, quindi rinforzato con il sistema CAM® e successivamente portato a rottura.



Figura 10. Arco già sottoposto a carico orizzontale ciclico senza rinforzo e successivamente rinforzato. Nelle due condizioni di prova è stato aggiunto un carico verticale atto a simulare lo scarico di un solaio o di una parete portata.

Durante la prova eseguita sull'arco non rinforzato, fino alla mobilitazione di una resistenza prossima a quella massima, si è verificata la formazione di ampie fessure in corrispondenza delle reni, raggiungendo un carico di circa 50 kN e uno spostamento orizzontale di 5.41 mm.

L'arco è stato quindi rinforzato con il sistema CAM® secondo il reticolo mostrato in Figura 10,

e nuovamente sottoposto a prova di spinta orizzontale.

In Figura 11 sono riportate le curve carico-spostamento registrate in entrambe le prove (con e senza rinforzo).

Il Sistema CAM® ha permesso all'arco di raggiungere un carico orizzontale di 110 kN, ed uno spostamento di 70 mm, per cui i rispettivi incrementi percentuali sono stati pari al 120% e quasi il 1200%.

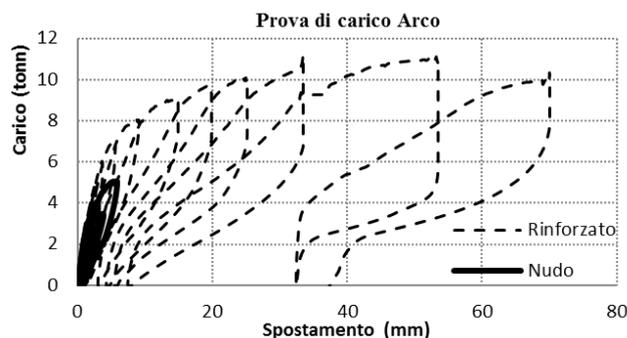


Figura 11. Curve forza-spostamento nella condizione pre e post rinforzo. Notevole l'incremento di resistenza e spostamento dell'arco, rinforzato dopo averlo portato ad uno stato di fessurazione diffuso.

Durante la prova si è stato riscontrato un incremento della formazione di fessure, in particolare oltre alla riapertura della prima fessura (richiusa inizialmente grazie al ricompattamento ottenuto dalla pretensione dei nastri) in corrispondenza delle reni dell'arco, si sono registrate fessure sul piedritto in trazione, in corrispondenza della zona di applicazione del carico orizzontale con una evidente diffusione dello stesso lungo la fascia di piano, ed infine, anche nella sezione di base del secondo piedritto.

L'intervento ha consentito all'arco di assorbire numerose azioni cicliche, dimostrandosi capace sia di mantenere il carico, anche per spostamenti importanti, sia contestualmente di contenere l'ampiezza delle lesioni e, fatto estremamente importante, di comportarne la richiusura nelle fasi di scarico.

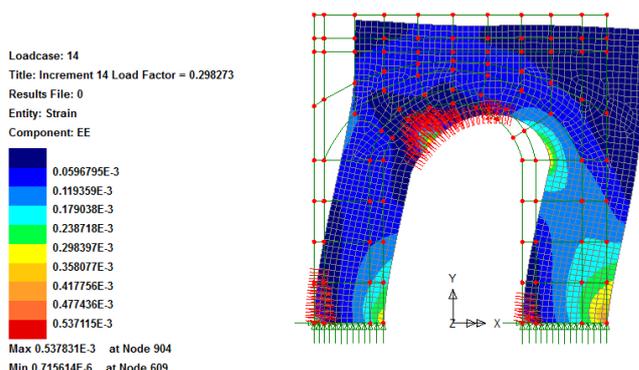


Figura 12. Simulazione FEM eseguita prima delle prove per stimare le resistenze attese.

### 3 LA SPERIMENTAZIONE SUL C.A.

Nel progetto che va sotto l'acronimo In.Glo.Ba.Re. Progetto finanziato dalla Regione LAZIO Programma Operativo 2007-2013 – Fondo Europeo di Sviluppo Regionale, è stato condotto direttamente dalla Edilcam Sistemi Srl, nel 2013 con l'obiettivo di valutare le capacità del sistema CAM<sup>®</sup> come sistema di rinforzo sulle strutture in CA.

In particolare lo studio fu finalizzato alla valutazione del Sistema nei confronti dell'aumento di resistenza a compressione grazie al confinamento, sia parte attiva, sia in comportamento ultimo, alla valutazione dell'incremento di resistenza per rinforzo a taglio di travi e pilastri ed alla valutazione dell'incremento di capacità a flessione grazie all'effetto combinato del confinamento e della partecipazione degli angolari come armatura aggiuntiva.

#### 3.1 Prova a compressione su Pilastri

Le prove si sono eseguite su provini in CA di dimensioni 30x30cm sottoposti a compressione semplice, su elemento non rinforzato, provato a schiacciamento poi rinforzato e provato nuovamente, e provini rinforzati da subito e provati. Lo scopo finale era:

- Valutare il comportamento di pilastri per effetto del confinamento indotto dal CAM<sup>®</sup>.
- Valutare la capacità di recupero dell'elemento danneggiato.
- Valutare l'influenza del numero di nastri in sovrapposizione e del passo del rinforzo.
- Validare le formule impiegate a calcolo.

L'influenza della disposizione del rinforzo è sinteticamente descritta nella figura di seguito, lasciando approfondimenti di calcolo a specifiche da norma (Circolare C8A.7.6).

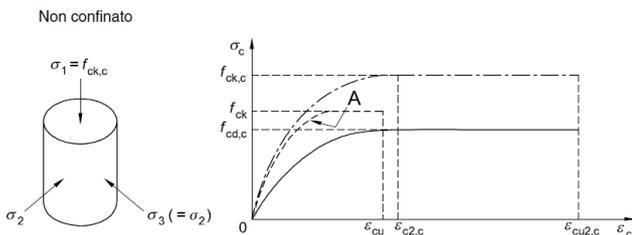


Figura 13. Legame costitutivo calcestruzzo confinato come riportato in Eurocodice 2.

La geometria del rinforzo (inteso come numero di nastri in sovrapposizione ed interasse) è un parametro a dipendenza 'diretta'.

Il set di prove ha validato sia la teoria ben nota, ma anche la potenzialità del sistema inteso come presidio volto al recupero dell'elemento già

danneggiato per applicazioni del sistema su edifici colpiti da sisma o da gravi dissesti statici.

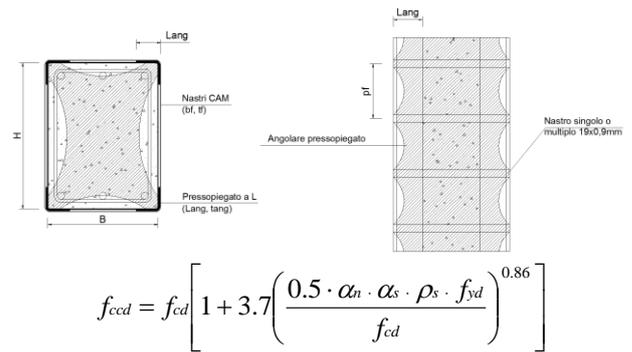


Figura 14. Tipologico di rinforzo con Sistema CAM<sup>®</sup> e formulazione per calcestruzzo confinato riportata nella Circolare 617/2009

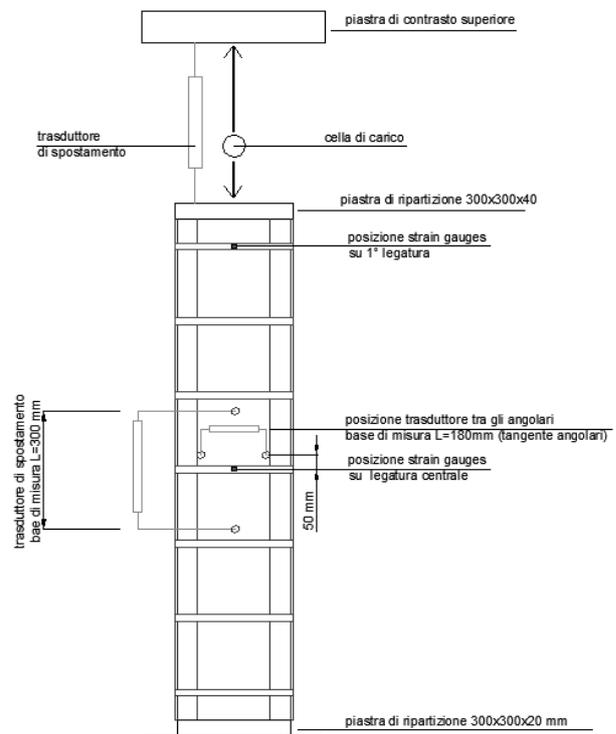


Figura 15. Layout e strumentazione di prova a schiacciamento pilastri. Sezione 30x30cm, altezza provino 1,00m.

Provino	Rinforzo CAM	N <sub>Rd,atteso</sub>	N <sub>Rd,prova</sub>
4	NR	826	771
5	NR	826	785
4-recuperato	3n passo 20cm	990	1115
5-recuperato	3n passo 10cm	1260	1120
6-7	3n passo 20cm	990	1250
8-9	3n passo 10cm	1260	1350
10-11	6n passo 10cm	1615	1520

Tabella 2. Confronto tra valori attesi e quelli ottenuti dalle prove di compressione. Valori in KN.

I risultati evidenziano un modulo secante nella fase "elastica" ridotto (come era lecito aspettarsi) per i provini danneggiati e poi rinforzati, pur raggiungendo un elevato miglioramento sia in

termini di capacità che di deformabilità verticale (quasi pari a quelli integri).

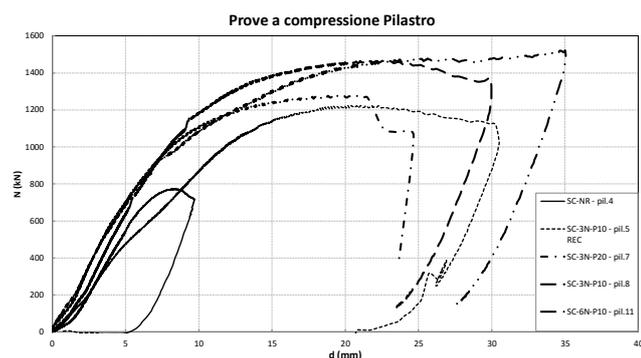


Figura 16. Curve carico-spostamento delle prove a compressione. L'incremento di resistenza è in linea con quello teorico; interessante il recupero di resistenza dei provini già danneggiati.



Figura 17. Prove di compressione sui pilastri, attrezzatura di prova.

Questo importante risultato denota come il sistema, grazie al pretensionamento dei nastri (confinamento attivo) riesca a garantire un efficace rinforzo anche ad elementi danneggiati nonché a dei valori di resistenza ultima in linea con quelli stimati numericamente mediante l'applicazione delle formulazioni di normativa.

### 3.2 Prove a flessione su travi

Il rinforzo CAM<sup>®</sup> volto all'incremento flessionale prevede il posizionamento di pressopiegati metallici in corrispondenza degli spigoli solidarizzati con legature distribuite uniformemente al fine di garantire aderenza tra i pressopiegati e la trave e poter considerare tale armatura integrativa rispetto alla preesistente. La verifica a pressoflessione può essere condotta secondo i normali criteri riportati nelle NTC2008 o l'EC2.

Le prove sono state condotte su travi con schema appoggio-appoggio e carico su due punti. Tale schema genera un momento flettente costante nella parte centrale ed un effetto di

scorrimento costante agli appoggi, permettendo una completa valutazione dell'efficacia del rinforzo tanto sulla resistenza massima quanto sulle capacità di "aderenza" degli angolari chiamati a collaborare come armatura aggiuntiva.

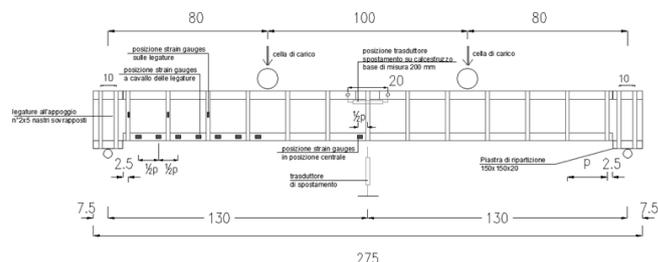


Figura 18. Layout di prova e strumentazione a flessione.

Le prove hanno evidenziato un aumento di momento resistente in linea con quello stimato per via analitica, validando di fatto l'angolare del Sistema CAM<sup>®</sup> come armatura aggiuntiva.



Figura 19. Prove a flessione sulle travi con carico su due punti, attrezzatura di prova.

Le cerniere plastiche flessionali sulle travi si sono sviluppate come prevedibile nella zona a momento costante, mentre nelle zone laterali si è effettivamente riscontrato il necessario trasferimento di sollecitazione tra trave ed angolare del Sistema CAM<sup>®</sup>.

Provino	Rinforzo CAM	$M_{Rd,atteso}$	$M_{Rd,prova}$
Travi 1	NR	19.9	19.5
Trave 2	Solo angolare superiore	10.9	10.1
Trave 3	6n passo 20cm	48.5	49.2
Trave 4	6n passo 20cm	48.5	44.6
Trave 5	6n passo 20cm	48.5	50.4

Tabella 3. Confronto tra risultati teorici e risultati ottenuti in prova. Si riscontra una ottima corrispondenza tra i valori tenendo conto degli angolari come armatura aggiuntiva. Valori in KNm.

Dai grafici dello stato tensionale degli angolari inferiori, Figura 20, si legge in maniera chiara tale trasferimento mostrando come gli stessi risultino snervati nella zona di cernierizzazione (SG6-7).

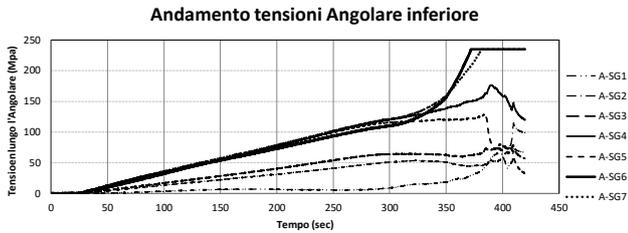


Figura 20. Andamento dello stato tensionale degli angolari inferiori lungo l'asse della trave. Si evidenzia snervamento dello stesso nella zona di cernierizzazione.

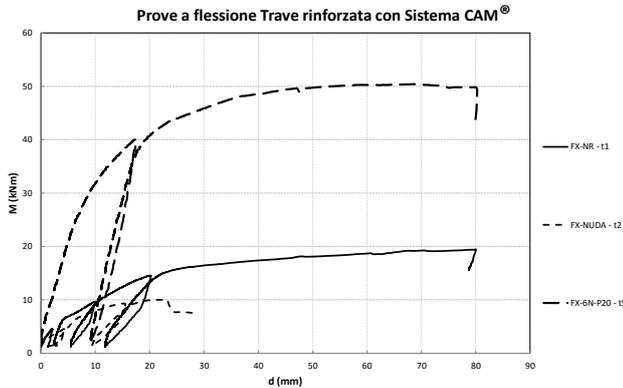


Figura 21. Curve Momento sollecitante – cedimento verticale per le prove a flessione. Il miglioramento del momento resistente ricavato in prova è in linea con quanto ricavabile per via numerica considerando l'angolare pienamente collaborante.

Oltre all'incremento in resistenza si nota inoltre un forte aumento della capacità rotazionale della sezione, non ottenuta semplicemente per l'aumento di armatura ma anche per l'effetto confinante dei nastri, confermando come il Sistema CAM<sup>®</sup> si configuri come un sistema in grado di aumentare fortemente la duttilità.



Figura 22. Cerniera plastica sviluppata nel tratto centrale a momento sollecitante costante dove è evidente lo sfruttamento dell'angolare del Sistema CAM<sup>®</sup>

### 3.3 Prove a taglio su Travi

Il rinforzo CAM<sup>®</sup> a taglio avviene mediante disposizione di cerchiaggi lungo l'asse della trave

con funzione di staffatura aggiuntiva. Il passo delle legature e il numero dei nastri sovrapposti influenzano ovviamente il valore di taglio resistente aggiuntivo.

La legatura è di norma eseguita per l'intera altezza della trave (cerchiaggio completo della sezione forando il solaio), ma nei casi in cui non sia possibile o non si voglia forare il solaio, può essere limitato all'altezza estradossata della trave (viene forata la trave in orizzontale appena sotto il solaio).

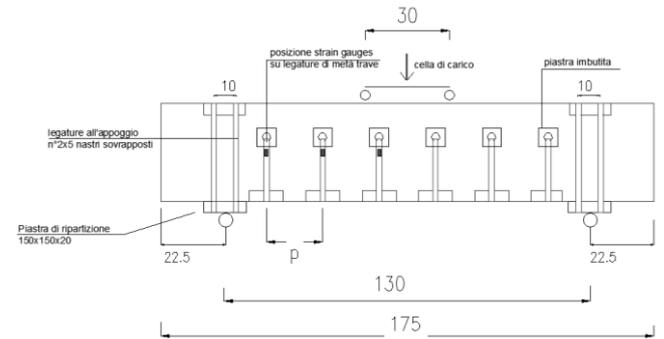


Figura 23. Layout di prova e strumentazione adottata per le prove a taglio

La valutazione analitica dell'incremento di resistenza a taglio offerto dal CAM<sup>®</sup>, si ottiene mediante la formulazione riportata in (C8A.7.2.1).

$$V_{Rsd,CAM} = 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_f \cdot \frac{2 \cdot t_{fr} \cdot b_f}{p_f} \cdot f_{ywd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) \cdot sen\alpha$$

Nella circolare viene imposto di considerare le fasciature del rinforzo sempre in regime elastico e questa condizione viene tenuta in conto riducendo al 50% (primo termine 0.5) la resistenza dei nastri.



Figura 24. Configurazione di prova adottata per i test a taglio. Schema di carico di trave in appoggio-appoggio e carico concentrato centrale.

Le prove hanno evidenziato un incremento resistente maggiore di quello stimato mediante le formulazioni analitiche sia nel caso di intervento a tutta altezza della trave, sia in quello ad altezza ridotta, validando ancora le capacità del sistema.



Figura 25. Stato fessurativo per trave rinforzata a tutta altezza. Prima fessura in zona di appoggio inclinata di circa 45°

Un aspetto particolarmente importante evidenziato da tali prove è relativo al fattore 0.5 prima esposto.

Provino	Rinforzo CAM	$V_{Rd,atteso}$	$V_{Rd,prova}$
Travi 1-2-3	NR	80.6	77.5
Trave 4	3n passo 20cm tutta altezza	102.5	93.8
Travi 5-6	6n passo 20cm tutta altezza	138.5	110
Travi 6-7	6n passo 20cm altezza parziale	109	102

Tabella 4. Confronto tra risultati attesi e quelli ottenuti dalle prove. Per tutte le prove i valori ottenuti risultano superiori a quelli teorici.

Tale coefficiente, imposto dalle norme, è coerente e necessario per gli interventi di rinforzo che si esplicano in regime passivo. Questi evidenzieranno le proprie capacità solo dopo un aumento di sollecitazione sull'elemento rinforzato, che in particolare necessiterà di una fessurazione per la sua attivazione. La limitazione dell'apertura della fessura necessaria ad attivare il sistema di rinforzo passivo è il motivo del coefficiente riduttivo 0.5, che garantisce così una limitazione implicita alla dimensione delle fessure.



Figura 26. Situazione al collasso per trave rinforzata "sotto-solaio" avvenuta per rottura della biella compressa.

La messa in opera dei nastri del Sistema CAM<sup>®</sup> è sempre eseguita mediante la presollecitazione degli stessi, tale presollecitazione produce un immediato rinforzo all'elemento ed al contempo non necessita di una fessurazione elevata per sfruttare tutta la capacità del nastro stesso. Evidenza di questo è il risultato ottenuto dalle prove, solo eliminando il fattore riduttivo 0.5 si ottiene l'uguaglianza tra i valori attesi e quelli reali.

A vantaggio di sicurezza nelle formulazioni del Sistema CAM<sup>®</sup> tale coefficiente viene comunque mantenuto.

#### 4 CONCLUSIONI

La sperimentazione svolta ha permesso di valutare l'efficacia del Sistema CAM<sup>®</sup> come sistema in grado di incrementare le prestazioni tanto di elementi in muratura che in cemento armato.

Il rinforzo di strutture che hanno subito un danneggiamento di qualsiasi natura ad esempio a seguito di eventi sismici è una pratica sempre molto delicata, in quanto spesso non si riesce a conoscere perfettamente la qualità dei materiali o l'entità del danneggiamento.

Tecniche ad azione passiva, possono senz'altro portare ad un miglioramento per un successivo evento dannoso, ma sono difficilmente in grado di aumentare il grado di sicurezza di una struttura all'atto della sua messa in opera.

Quanto dimostrato dalla sperimentazione sul Sistema CAM<sup>®</sup> ha portato alla luce quanto mediante tale sistema si possa invece garantire un immediato aumento di resistenza proprio nella situazione di carico già applicato alla struttura. Inoltre anche agli elementi danneggiati, come hanno evidenziato le prove di schiacciamento sui pilastri o l'esperienza eseguita sull'arco in muratura, il CAM<sup>®</sup> consente di migliorarne le prestazioni quasi come fosse integro.

Viene da sé che tale caratteristica, prodotta essenzialmente dal pretensionamento dei nastri e dunque dal funzionamento "attivo" del sistema, risulta particolarmente funzionale ad essere applicata ad interventi in cui si necessita di un miglioramento istantaneo della struttura, come nei casi in cui ci si trovi in fase avanzata di danneggiamento.

Anche in tutte le situazioni in cui la conoscenza della struttura, dei materiali, del grado di danneggiamento, non sia estesa e completa, poter operare con un sistema in grado

di sopperire a tali carenze aggiunge un elevatissimo valore aggiunto all'intervento aumentando il grado di sicurezza reale.

Da tempo infatti mediante tale sistema vengono realizzati dapprima interventi urgenti di messa in sicurezza, per poi essere completati, a valle di una progettazione completa, da un intervento integrale. Il vantaggio è che l'intervento di messa in sicurezza, che per altre tecnologie deve essere rimosso con aggravio di spesa e di tempi esecutivi, nel caso del CAM<sup>®</sup>, grazie alla sua flessibilità, può essere integrato nell'intervento complessivo, divenendo esso stesso definito.

Aggiungere una o più sovrapposizioni di nastri, o aggiungere maglie intermedie, su un intervento già eseguito non invalida il precedente anzi questo rimane integrato nel nuovo ed entrambi contribuiscono alla prestazione finale dell'intervento.

La sperimentazione ha inoltre validato come per tale sistema le formulazioni matematiche utilizzate per il calcolo delle resistenze, riportate nelle norme, ne sottostimino la reale prestazione soprattutto nei valori delle caratteristiche più critiche, come la resistenza e lo spostamento ultimo a taglio, sia per la muratura sia per il cemento armato.

Nei confronti dei rinforzi a flessione e/o schiacciamento si è evidenziato come il sistema porti a caratteristiche resistenti in linea con le formulazioni attuali, ma anche qui porti invece a capacità duttili fortemente sottostimate.

In pratica la prestazione reale nei confronti delle tipologie di collasso critiche come il taglio è superiore a quella calcolabile. La duttilità di comportamento a taglio, flessione e compressione è fortemente sottostimata.

Ne risulta che l'intervento reale che si realizza con il sistema CAM<sup>®</sup> è ancor più nella filosofia della gerarchia delle resistenze di quanto non si sia valutabile analiticamente, ovvero scongiura ancor più le crisi per taglio ed incrementa fortemente la duttilità oltre i limiti di normativa.

## REFERENCES

Abruzzese D., Como M., Lanni G., On the lateral strength of multistory masonry walls with openings and horizontal reinforcing connections, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Ed. Balkema, 1992.

Braga F., Dolce M., Un metodo per l'analisi di edifici multipiano in muratura antisismici, Proc. Of the 6th I.B.Ma.C., Roma, 1982.

Cilia M., Colajanni P., Marnetto R., Recupero A., Spinella N., Experimental tests on typical masonry of Messina

area (Italy) Retrofitted with CAM: full scale Panels, 9° international masonry conference 2014 in Guimares, 2014.

Cilia M., Colajanni P., Marnetto R., Recupero A., Spinella N., Experimental tests on typical masonry of Messina area (Italy) Retrofitted with CAM: a full scale arch, 9° international masonry conference 2014 in Guimares, 2014.

Como M., Grimaldi A., An unilateral model for the limit analysis of masonry walls, International Congress on "Unilateral Problems in Structural Analysis", Ravello, Springer Ed., 1985.

Dolce M., Cacosso A., Ponzo F. C., Marnetto R., New technologies for the structural rehabilitation of masonry constructions: concept, experimental, validation and application of the Cam System, Febbraio 2004.

Dolce M., Ponzo F.C., Di Croce M., Moroni C., Giordano F., Nigro D., Marnetto R., Experimental assessment of the CAM and DIS-CAM systems for the seismic upgrading of monumental masonry buildings, Giugno 2009.

Dolce M., Gigliotti R., Laterza M., Nigro D., Marnetto R., Il Rafforzamento dei Pilastrini in CA Mediante il Sistema CAM, 10° Convegno Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Potenza-Matera 2001.

Marnetto R., Il rafforzamento delle strutture murarie: il Sistema CAM di cuciture attive per la muratura. ASSIRCO, Le tecnologie avanzate (FRP, materiali a memoria di forma, isolatori sismici...), Roma, 14 settembre 2005.

Palmieri G., Il miglioramento sismico dei beni monumentali con il Sistema CAM, Settembre 2008.

Salvatori A., Il metodo CAM e l'isolamento sismico. Calcolo ed applicazione. Esempi in edifici danneggiati dal sisma a l'Aquila, XXI Secolo. Scienza e Tecnologia, Giugno 2013.

Samarisinghe W., Henry A.W., The strength of Brickwork under biaxial tensile and compressive stress, Proc. 7th Int. Symp. On Load Bearing Brickwork, London, 1980

Turnšek V., Sheppard P., The shear and flexural resistance of masonry walls, Proc. of the Intern. Research Conference on Earthquake Engineering, Skopje, 1980.

Linee Guida BBCC: Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008 - DPCM 9 Febbraio 2011 (GU n. 47 del 26-2-2011 - Suppl. Ordinario n.54).

DM 14 Gennaio 2008: "Norme tecniche per le costruzioni" (Testo Unico 2008).

Circolare 617 del 02/02/2009: "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008".

CNR DT 200/2013: Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.

UNI EN 1993-1-4:2007 Gennaio 2007 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio - Regole generali - Regole supplementari per acciai inossidabili.

UNI EN 1998-3:2005 Agosto 2005 Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte3: Valutazione e adeguamento degli edifici.