

L'incremento in capacità negli edifici esistenti. Una tecnologia di intervento: il Sistema CAM®

Marianna Leonori¹, Alessandro Vari²

Abstract

The use of an isolation system is a valid method to protect an existing building from seismic action, particularly for the protection of the property, which will not be damaged even after a seismic event. However, this technique is not always possible in existing buildings in historical centers or built-up areas.

The other possible action is to increase the capacity of the structure. This must aim at obtaining the best possible structural behavior minimizing the invasiveness of interventions.

To achieve this, it is important the determination of all the steps of intervention, in order to reach the best possible result.

Four steps can be defined: first, eliminate local instabilities, second, get to the connect behaviour of the structure, next, eliminate fragile mechanisms of collapse, finally, improve ductile mechanisms of collapse.

The CAM® System can be a valid solution. It is a technology based on the structural use of pre-tensioned stainless steel.

1 EDIL CAM® Sistemi Srl, Ufficio Tecnico, Via dei Genieri 39, Rome, Italy.

2 EDIL CAM® Sistemi Srl, Ufficio Tecnico, Via dei Genieri 39, Rome, Italy.

1. Introduzione

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 isolamento sismico posto su strutture che presentino già carenze per i soli carichi statici o di rinforzi locali in corrispondenza delle porzioni adibite al posizionamento dei dispositivi.

La tecnica dell'isolamento in retrofitting è sicuramente una delle più efficaci per salvaguardare le strutture, in quanto è l'unica che permette di avere danneggiamento nullo a valle di un evento sismico. Tuttavia tale tecnologia risulta di difficile applicazione nel caso di fabbricati inseriti in contesti edilizi complessi.

Il secondo approccio, generalmente sempre applicabile, riguarda l'incremento in capacità, raggiungibile applicando differenti tecniche di consolidamento sulle strutture in CA e in muratura.

È di fondamentale importanza, indipendentemente dall'approccio scelto e dalla/e tecniche di consolidamento impiegate per il raggiungimento dell'obiettivo, affrontare in maniera dettagliata lo studio della struttura, al fine di raggiungere il massimo livello conoscitivo in termini di materiali, geometria e dettagli costruttivi.

Le informazioni preliminari ricavate da questo studio sono utili per ipotizzare il comportamento d'insieme del fabbricato in esame e individuare la presenza o meno delle "tipiche" carenze strutturali anche in relazione all'epoca costruttiva.

Raggiunta tale conoscenza, il difficile compito consiste nel ricercare quelle soluzioni che permettono di portare il comportamento della struttura esistente a quello dell'analoga idealmente ben progettata in origine per resistere ai carichi statici e sismici.

Un buon comportamento nei confronti delle azioni orizzontali possiamo definirlo come un comportamento "duttile" a livello globale, ovvero in cui il massimo numero di elementi sono chiamati a sopportare insieme l'azione esterna. Vanno quindi ostacolati i

meccanismi fragili di collasso sia locali che globali. Nei fabbricati intelaiati in CA questo corrisponde all'eliminazione delle carenze di armatura trasversale in travi, pilastri e nodi che ne determina la prematura rottura a taglio, mentre a livello globale si deve attuare una strategia di consolidamento volta al massimo sfruttamento delle iperstaticità del sistema strutturale. Tale strategia altro non è che il riproporre la progettazione 'in gerarchia' nel problema del consolidamento.

Se le strutture in CA nascono come sistemi continui e connessi, le strutture murarie presentano molto spesso più che un comportamento di insieme, un insieme di comportamenti locali che non concorrono ad un assorbimento efficiente dell'energia trasmessa dal sisma. Questo è dovuto alla diffusa mancanza di scolarità di comportamento per via di carenze di connessione tra i singoli corpi murari e tra questi e gli orizzontamenti. Tali discontinuità nei fabbricati murari portano a collassi prematuri che pertanto possono essere considerati come fragili primari.

La problematica della continuità strutturale sugli edifici in muratura non solo si evidenzia tra macroelementi ma arriva fino alla costituzione del singolo elemento o maschio murario. 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 assenza di continuità tra macroelementi (tra pareti o tra pareti e orizzontamenti). Nei manufatti in muratura, quindi, il meccanismo fragile è determinato dall'attivazione di un meccanismo resistente "in serie" piuttosto che "in parallelo" in cui gli elementi (microelementi lapidei, macroelementi le singole pareti e i solai) collassano singolarmente senza capacità di redistribuzione delle azioni esterne.

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

Solo intervenendo scongiurando i fenomeni appena descritti, attraverso una serie di rinforzi localizzati, il fabbricato può essere caratterizzato sismicamente dal suo comportamento globale, dove i solai consentono una corretta ripartizione delle masse (quindi azioni)

di piano tra i maschi murari e questi collaborano (tutti) nell'assorbire le azioni sismiche.

Ovviamente quest'ultimo funzionamento (pareti in parallelo) si raggiunge non solo attraverso il ripristino dei vincoli, ma attraverso un'ulteriore fase di intervento, capace di incrementare la duttilità nel piano, cioè aumentare la capacità di mantenere una certa resistenza post-fessurazione con spostamenti di interpiano (drift) elevati. Il funzionamento "in parallelo" consente l'attivazione della resistenza del numero massimo di elementi, aumentando la capacità massima del fabbricato sia in termini di resistenza alle azioni che in termini di dissipazione dell'energia sismica.

Stante questa panoramica l'incremento capacitivo della struttura può essere raggiunto per step successivi al variare delle carenze strutturali, riproposte nel grafico di seguito.

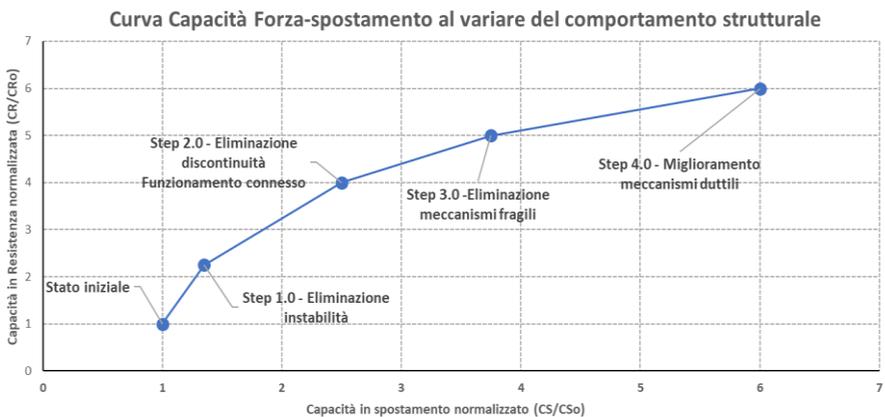


Figura 1. Andamento della curva di capacità funzione delle migliorie ottenibili da interventi specifici

In ordinata è riportata la capacità in resistenza normalizzata rispetto allo stato iniziale della struttura, in ascissa la capacità in spostamento normalizzato.

In tale grafico sono rappresentati qualitativamente due andamenti:

- l'ordine corretto con cui eseguire e conseguire miglioramenti di comportamento che siano questi applicati a strutture murarie, CA o prefabbricate;
- le modalità con cui ogni tipologia di intervento contribuisca all'incremento di capacità in termini di resistenza e in termini di spostamento (duttilità).

Il primo step, ad esempio (valido per strutture murarie) consiste nell'eliminazione dei meccanismi di instabilità relativi alla tessitura muraria disconnessa il cui collasso è per sgretolamento. Questo step di intervento corrisponde ad incrementi capacitivi resistenti significativi ma a ridotti incrementi di capacità in spostamento.

Lo scopo quindi è quello di trasformare il comportamento della muratura da singoli elementi lapidei "accatastati" gli uni sugli altri la cui resistenza nei confronti delle azioni orizzontali è comandata dall'interazione per attrito e scarsa coesione, al comportamento di un materiale omogeneo.

Se vale questa ipotesi di comportamento, anche nei fabbricati murari possono individuarsi macroelementi, il cui comportamento nei confronti dell'azione esterna dipende dallo schema di vincolo. Eliminare le discontinuità esistenti e realizzare un funzionamento connesso tra macroelementi è l'obiettivo da raggiungere nel secondo step, grazie al quale si ottengono notevoli incrementi in termini di capacità resistente della struttura. Ad esempio la realizzazione del cosiddetto "effetto scatola" nei fabbricati murari il collasso dei macroelementi murari passa dall'essere limitato alla resistenza fuori piano dei pannelli all'attivazione della resistenza nel piano "forte" dei medesimi.

La carenza di vincolo tra macroelementi è anche responsabile del collasso prematuro delle strutture prefabbricate come evidenziato dai pericolosi crolli a valle del sisma del 2012 in Emilia.

Raggiunto il funzionamento connesso, il fabbricato si comporta come una struttura tridimensionale. Il successivo step di intervento sarà volto all'eliminazione delle rotture fragili sui singoli componenti strutturali a favore delle duttili. Ad un buon incremento capacitivo in termini di resistenza corrisponderanno anche elevate capacità in termini di duttilità del sistema e quindi in termini di spostamento, come si nota nella curva in corrispondenza del terzo step.

Nei fabbricati in muratura ciò consiste nell'eliminazione della crisi per schiacciamento o per taglio dei pannelli; analogamente nei fabbricati in CA si interviene incrementando le armature trasversali in travi, pilastri, pareti e nodi.

Il successivo step che permette infine di incrementare notevolmente la capacità in spostamento della struttura consiste nel miglioramento dei meccanismi duttili. Esso si raggiunge incrementando la resistenza,

ma soprattutto attraverso l'incremento in capacità rotazionale della sezione realizzato attraverso interventi in confinamento. Ovviamente tali incrementi sono da leggere nell'ambito globale della struttura, massimizzando il funzionamento in parallelo dei componenti resistenti.

Il Sistema CAM[®] è una tecnica di intervento che permette l'incremento capacitivo delle strutture esistenti in CA e in muratura. Nel particolare si presenterà come attraverso questa tecnologia sia possibile intervenire secondo gli step di intervento necessari presentati in precedenza.

2. Il Sistema CAM[®]

La necessità di ricompattare la massa muraria, spesso caratterizzata da tessitura disordinata o a doppio paramento, con scarse o nulle connessioni trasversali, suggerisce l'idea di utilizzare un ideale sistema diffuso e tridimensionale di cuciture, capace di "impacchettare" la muratura, fornendo, eventualmente, anche un benefico stato di precompressione triassiale.

Il concetto di "impacchettamento" prende spunto dall'idea ispiratrice alla base dell'ideazione del metodo, frutto dell'osservazione delle buone capacità portanti che hanno i "gabbioni", comunemente usati per realizzare pareti di contenimento. La combinazione vincente risiede nella specializzazione delle funzioni: alla pietra il compito di trasferire gli sforzi di compressione, all'acciaio quello di mantenere in posizione gli inerti attraverso il contenimento, per trazione, della rete.

La possibilità di immaginare uno stato di pretensione nella "rete" fa presupporre una maggiore efficacia nella stabilizzazione degli elementi lapidei, con conseguente incremento della capacità portante del sistema.

L'insieme di cuciture realizzate attraverso l'impiego del nastro genera un reticolo tridimensionale che consente di ottenere una condizione finale di coazione triassiale (fig. 2), in grado di conferire maggior resistenza a compressione al volume murario per effetto del confinamento indotto e costituendo armatura diffusa (capacità portante a trazione) senza incremento di massa.

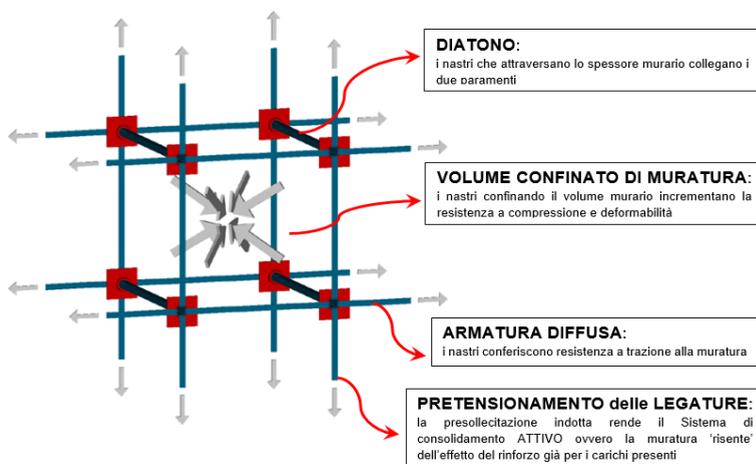


Figura 2. Il reticolo tridimensionale del Sistema CAM®

2.1 Principi base

Il Sistema CAM® (Cuciture Attive dei Manufatti) si basa sulla realizzazione di anelli realizzati attraverso l'impiego strutturale di un nastro in acciaio inossidabile ad alte prestazioni di dimensioni 19x0.90 mm che singolarmente cerchia delle porzioni limitate di struttura. Ciascun anello è chiuso su se stesso attraverso l'impiego di un sigillo e di un'apposita macchina in grado di imprimere al nastro una pretensione all'atto del crimpaggio (chiusura per via meccanica).

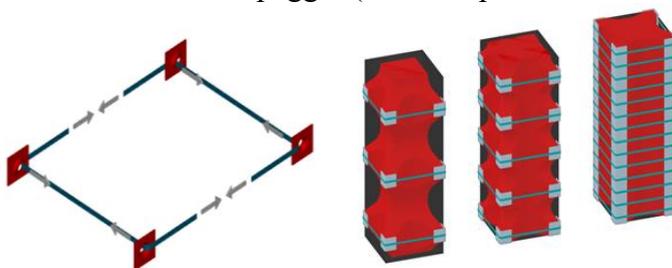


Figura 3. Schema statico elementare di riferimento

Nei componenti travi e pilastri tali anelli sono posti a cerchiare la sezione in posizione trasversale rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, nelle pareti in muratura l'anello attraversa lo spessore

murario e ripetendosi in posizione orizzontale e verticale forma un reticolo tridimensionale.

I componenti impiegati sono molto semplici:

- il nastro metallico utilizzato per realizzare ogni singola maglia;
- l'elemento metallico di chiusura della maglia (sigillo);
- il piatto metallico imbutito da posizionare in corrispondenza delle forature per accompagnare il nastro nella curva;
- l'angolare metallico con stesso ruolo della piastra imbutita da porre in corrispondenza degli spigoli.

2.2 I materiali

Il materiale impiegato per la componente strutturale nastri è per entrambe le tipologie di applicazione (muratura e CA) acciaio inossidabile, ciò a garantire la massima durabilità dell'intervento e la compatibilità con qualsiasi tipologia di intonaco.

L'applicazione su CA prevede l'impiego di angolari pressopiegati in acciaio zincato di classe S355 con lavorazione interna mandorlata.

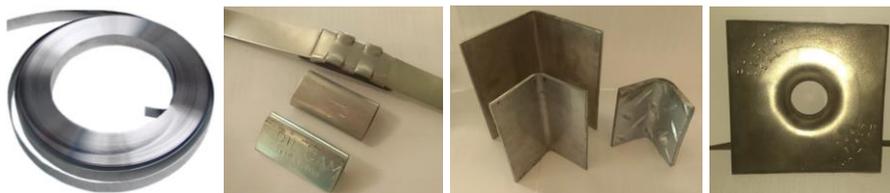


Figure 4. I componenti del Sistema: nastro, sigillo, angolare, piastra imbutita

Tutti i materiali sono marcati CE. Nella tabella 1 e 2 sono riepilogati i materiali impiegati per ogni componente e per tipologia di applicazione.

Tabella 1 - Materiali impiegati sulla muratura

	DIMENSIONE (mm)	NORMATIVA	SIGLA	f_{tk} (MPa)	f_{yk} (MPa)	A ₈₀ (%)
Nastro	19x0.90	UNI EN 10088-4	1.4318	≥ 650	≥ 350	35
Piatto imbutito	125x125x4	UNI EN 10088-4	1.4301 1.4307	≥ 520	≥ 220	45
Angolare ripartitore	125x62.5x4	UNI EN 10088-4	1.4301 1.4307	≥ 520	≥ 220	45
Sigillo	45x55x1 (0.90)	UNI EN 10088-4	1.4301 1.4307	≥ 520	≥ 220	45

Tabella 2 - Materiali impiegati su CA

	DIMENSIONE (mm)	NORMATIVA	SIGLA	f_{tk} (MPa)	f_{yk} (MPa)	A ₈₀ (%)
Nastro	19x0.90	UNI EN 10088-4	1.4318 2H-C1000	≥ 1000	≥ 700	15
Piatto imbutito	125x125x4	UNI EN 10025-2	S235	≥ 360	≥ 235	24
Angolare continuo	≠ 6/8/10	UNI EN 10025-2	S355	≥ 470	≥ 355	20
Sigillo	45x55x1 (0.90)	UNI EN 10088-4	1.4301 o 1.4307	≥ 520	≥ 220	45

Per effetto dell'intaglio la sezione resistente del nastro è ridotta, pertanto non possono essere usati i valori nominali di resistenza del nastro, ma vanno calcolati i parametri resistenti di calcolo del nastro giuntato.

La resistenza di calcolo a trazione $N_{t,Rd}$ è assunta pari al minore fra i due valori:

- $N_{pl,Rd}$ resistenza plastica della sezione corrente A alla tensione caratteristica di snervamento;
- $N_{u,Rd}$ resistenza a rottura della sezione ridotta A_{net} in corrispondenza della giunzione, per la quale è garantita una resistenza minima pari al 70% della resistenza del nastro integro.

In termini di tensione di calcolo e con riferimento alla sezione corrente del nastro, ciò può essere espresso come segue:

$$f_{yd} = \min \left\{ \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}; \frac{0,7 \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \right\}$$

Dove:

$\gamma_{M0} = 1,10$ coefficiente di sicurezza sul materiale;

$\gamma_{M2} = 1,25$ coefficiente parziale di sicurezza sui collegamenti.

3. Step 1 – Eliminazione delle instabilità locali

Il primo meccanismo di collasso che va evitato negli edifici in muratura è la rottura per dislocazione dei singoli elementi lapidei.

Tale meccanismo si manifesta per assenza di vincolo a livello locale. È il caso di murature disordinate con legante di scarse caratteristiche o addirittura assente oppure di murature a doppio paramento e nucleo interno spingente.

La resistenza alle azioni orizzontali è fornita unicamente dall'attrito esistente tra componenti lapidei, pertanto la muratura si comporta come un insieme di elementi semplicemente appoggiati e non è lecito considerarla come un materiale omogeneo; tale ipotesi risulta fondamentale per qualsiasi considerazione strutturale, quindi la rottura per disgregazione della massa muraria è il meccanismo fragile primario.

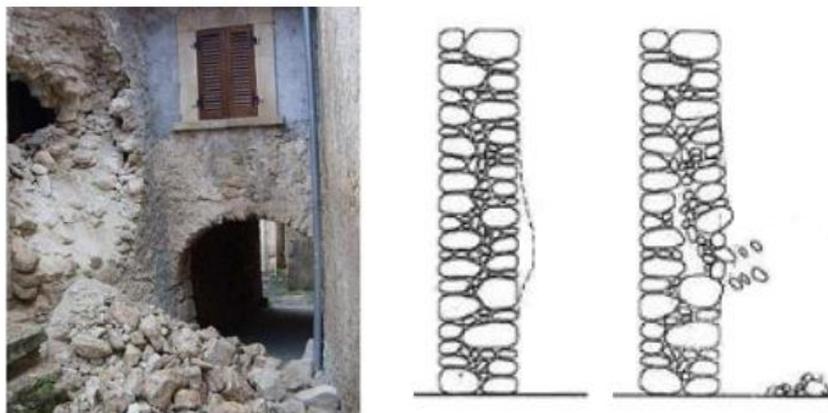


Figura 5. La rottura per disgregazione dell'apparecchio murario

L'insieme di nastri della maglia CAM[®] che attraversano lo spessore murario realizzano un diatono meccanico di collegamento che ha non solo la capacità di assorbire la spinta derivante dal nucleo ma, per effetto della pretensione imposta ai nastri, rappresenta una risorsa immediatamente fruibile, prima dell'attivazione del meccanismo di spanciamento.

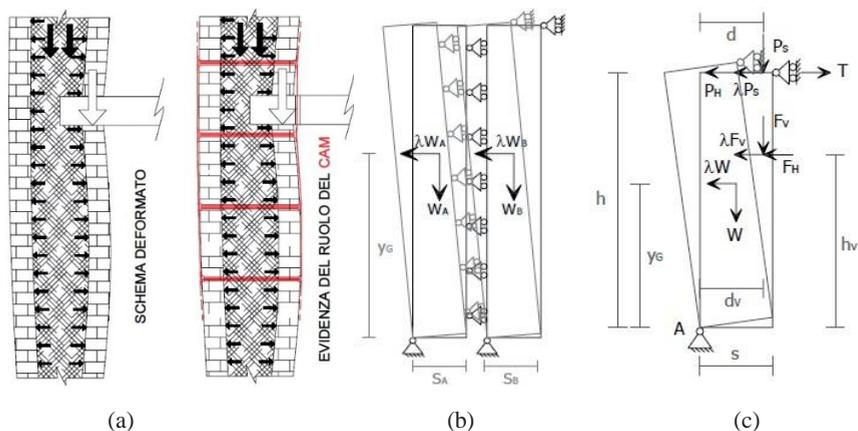


Figura 6. (a) Effetto del CAM[®] sulla muratura a doppio paramento.
 (b) Verifica al ribaltamento: schema statico per doppio paramento.
 (c) Verifica al ribaltamento: schema statico per doppio paramento solidarizzato

La cucitura diffusa CAM[®] comporta come immediata conseguenza quella di passare da un meccanismo proprio del doppio paramento a quello di muratura a tutto spessore (monolitica), ovvero ad una

situazione intermedia in cui la cucitura fornirà un vincolo cedevole allo scorrimento tra i paramenti ma non tale da poter essere considerato fisso. Nella configurazione di parete monolitica le forze verticali corrispondenti a quelle reagenti dei nastri offrono un contributo stabilizzante, nonché un incremento della capacità rotazionale e il conseguente innalzamento degli spostamenti ammissibili dal cinematismo.

Laddove la muratura abbia caratteristiche particolarmente scadenti e quindi ad esempio in presenza di elementi lapidei piccoli e tondeggianti si consiglia l'applicazione, al di sotto del reticolo CAM®, di una rete porta-intonaco. Tale configurazione di rinforzo sperimentata nel corso del progetto di ricerca condotto nel 2013 in collaborazione con l'università di Messina [13], non implica una valenza "strutturale" della rete in matrice polimerica, ma ha unicamente il compito di trattenere in posizione il singolo elemento lapideo evitando di realizzare maglie CAM® eccessivamente strette.



*Figura 7. Esempio di applicazione della maglia CAM®
in abbinamento alla rete in matrice polimerica*

4. Step 2 – Conferimento del funzionamento “connesso”

Se l'apparecchio murario è reso compatto e omogeneo nel proprio comportamento meccanico sarà possibile “leggere” la struttura in

muratura come un insieme di corpi quali macroelementi di parete e solai.

È l'assenza di connessione tra tali macroelementi che comporta la formazione dei successivi meccanismi fragili di collasso quali ribaltamento di facciate o di porzioni di fabbricato.



I più comuni meccanismi locali sono quelli delle singole pareti sia per flessione orizzontale che verticale. La casistica della tipologia di meccanismi locali è estremamente ricca e frutto della combinazione dei meccanismi base. L'attivazione di un cinematismo di collasso rispetto ad un altro dipende ovviamente dalla sua energia e quindi dal grado di vincolo che esiste tra macroelementi.

L'assenza o la carenza di vincolo tra macroelementi (tra parete e parete e/o tra pareti e solaio) può essere ripristinata totalmente o parzialmente dall'applicazione del Sistema CAM®.

La prima soluzione relativa ai cinematismi fuori piano da attuarsi è la realizzazione di incatenamenti.

Il Sistema CAM® nasce come una serie diffusa di catene. La maglia, inoltre, proprio per come va a essere posta in opera in corrispondenza delle angolate e degli incroci murari, rappresenta un presidio per tutti quei cinematismi locali derivanti dall'assenza di vincolo tra pareti ortogonali.

Producendo uno schema connesso, la cinematica dei blocchi rigidi porta a schemi a più elevata energia di attivazione.

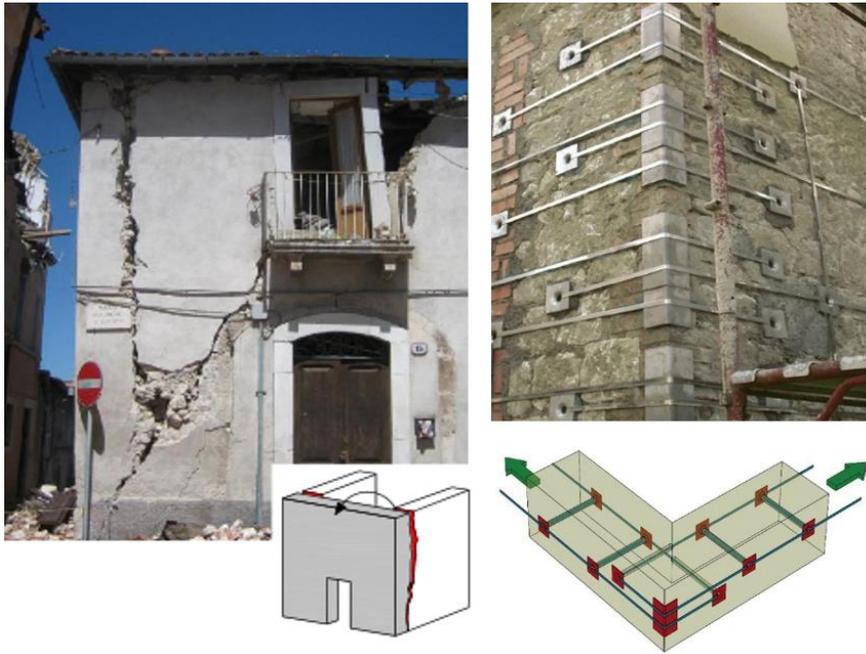


Figura 8. *Classico cinematismo di ribaltamento di facciata per mancanza di ammassamento d'angolo e soluzione mediante Sistema CAM®.*

A livello di orizzontamenti si può realizzare un cordolo in muratura armata alla base dei solai senza praticare scassi e perturbare la struttura originaria, così da rendere maggiormente compatta la massa muraria su cui il solaio scarica e legare insieme le murature ortogonali che devono sopportare insieme l'azione orizzontale da esso trasmessa in fase sismica (capacità del cordolo in muratura di funzionare come trave armata).



Figura 9. *Realizzazione di cordoli in corrispondenza del solaio*

Un presidio allo sfilamento del solaio può invece essere realizzato tramite un sistema di legature che consentono la connessione del singolo travetto alla muratura su cui è appoggiato. In tal modo oltre alla realizzazione del vincolo, ciascun elemento portante del solaio sarà una catena di contenimento per la parete su cui si innesta.



Figura 10. Intervento CAM® di arpionatura dei travetti di solaio

L'insieme di interventi di cucitura diffusa permettono l'incremento dei vincoli preesistenti e quindi il funzionamento della "scatola" muraria, attivando meccanismi globali di collasso e resistenze nel piano delle pareti, come confermato dalle evidenze sperimentali riscontrate nel corso del progetto Trema nel 2006 testando fabbricati su tavola vibrante.

La problematica dell'assenza di vincolo non si limita ad interessare i soli fabbricati in muratura, ma risulta essere la responsabile dei collassi prematuri anche dei fabbricati di tipo industriale in cui le connessioni tra macroelementi pilastro-trave-tegolo-pannelli spesso sono insufficienti.

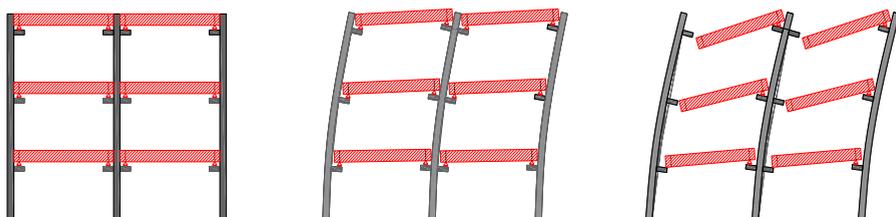


Figura 11. Evidenza dei cinematicismi in strutture sconnesse



Figura 12. Evidenza dei cinematismi di collasso nei fabbricati industriali

Realizzare tale vincolo attraverso un sistema di legature CAM® opportunamente dimensionate è possibile, impiegando elementi di contrasto (tipo scatolati) e nastri con inclinazione variabile in numero tale da assorbire l'azione di sfilamento delle travi.

Un esempio esemplificativo è negli schemi di seguito.

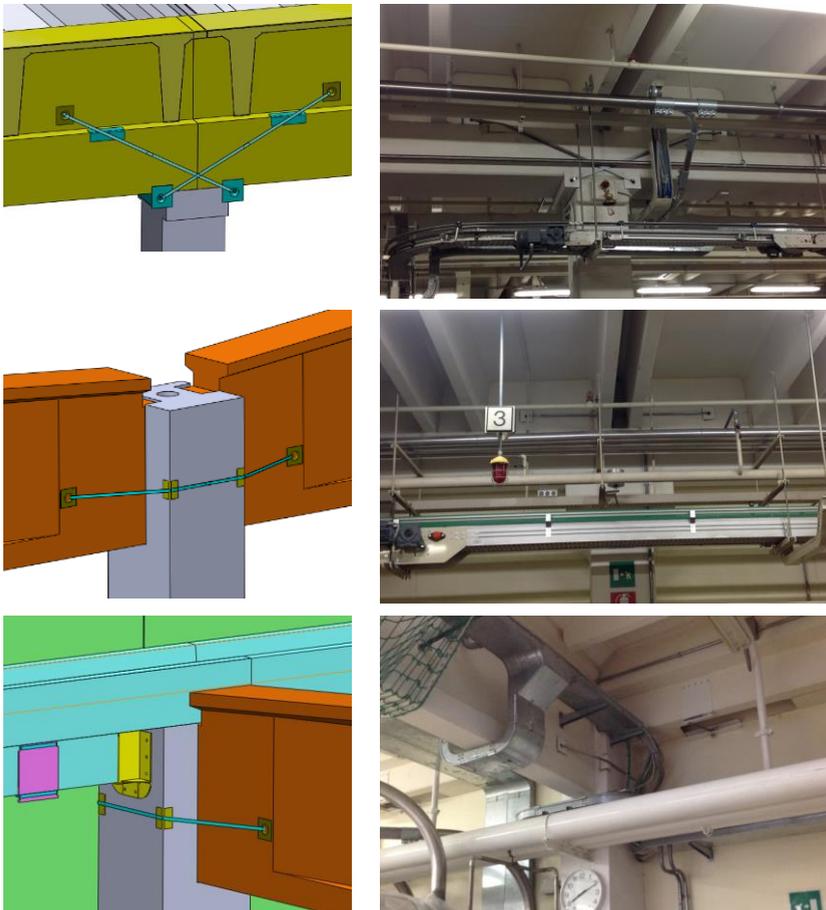


Figura 13. Interventi CAM® di vincolo trave-pilastro

Il principale vantaggio della realizzazione di tali vincoli risiede nella versatilità del sistema che permette di superare in maniera agevole impianti e macchinari spesso presenti in tali fabbricati.

Il solo foro che è necessario realizzare è sulla trave nella posizione più agevole in cui si possono bypassare tubazioni, impianti o macchinari e soprattutto le armature della trave, allontanandosi dalla zona di appoggio in cui la presenza di trefoli o armatura lenta rende spesso impossibile l'inghisaggio delle connessioni previste nel metodo tradizionale di collegamento dell'elemento trave e pilastro.

Su quest'ultimo non sono realizzate forature e l'elemento di contrasto (se presente) è posto in sola adiacenza alla superficie che individua l'angolo tra trave e pilastro.

5. Step 3 – Incrementi prestazionali nei confronti delle rotture fragili

Conseguito il funzionamento connesso del fabbricato, il successivo intervento riguarda l'incremento resistente da fornire ai singoli elementi nei confronti delle rotture di tipo fragile, con conseguente spostamento del collasso a meccanismi duttili.

Tale step di intervento comporta elevati incrementi resistenti ma si innalza notevolmente anche la capacità in spostamento.

La maglia CAM[®] applicata alla struttura in muratura, oltre ad essere un sistema di cuciture diffuse con cui realizzare il cambio dello schema di vincolo è a tutti gli effetti dell'armatura posta in posizione discreta per il pannello murario.

Nel caso di pilastri in muratura, anche circolari, il sistema si specializza attraverso una serie di cerchiature che, per effetto del confinamento, ne incrementano la capacità portante e deformativa, scongiurando i meccanismi fragili per schiacciamento della sezione.

Nel caso in cui la carenza del pannello sia per il raggiungimento della crisi a taglio, sia essa per meccanismo di scorrimento o per fessurazione diagonale, la maglia CAM[®] si modula avvicinando i ricorsi orizzontali e incrementando quindi l'armatura disposta orizzontalmente.

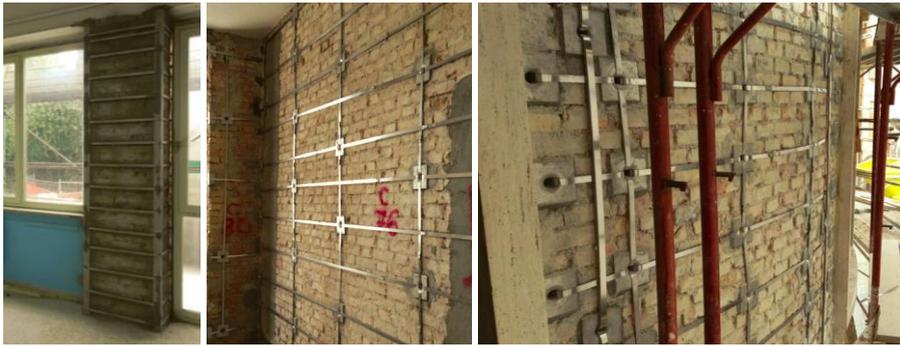


Figura 14. Interventi CAM® mirati allo scongiurare meccanismi fragili per schiacciamento e taglio su strutture in muratura

Nei confronti dei fabbricati in CA è immediato leggere le legature CAM® disposte come armature trasversali, quindi staffe, ma aggiunte a posteriori e poste in coazione. In primis pertanto l'incamiciatura realizzata con le legature CAM® permette lo scongiurarsi di fenomeni fragili di collasso per sforzo assiale eccessivo, permettendo l'instaurarsi di meccanismi duttili per effetto del confinamento indotto.

La sperimentazione svolta nel 2004 [6] comparativa tra il Sistema CAM® e altre tecniche di incamiciatura ha evidenziato come il pretensionamento dei nastri fornisca un contributo non trascurabile nel comportamento globale. La pretensione rende il rinforzo applicato di tipo "attivo". Per effetto Poisson le legature imprimono una tensione radiale e quindi un allungamento dell'elemento cerchiato proporzionale al carico assiale che sarà necessario applicare per riportarlo in configurazione indeformata.

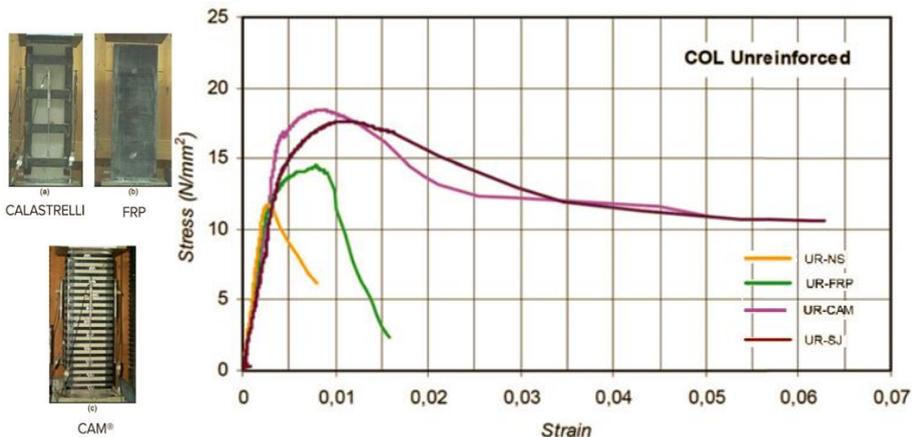


Figure 15. Curve carico spostamento nelle prove condotte da UNIBAS nel 2004

Tale incremento leggibile nella prosecuzione invariata del tratto iniziale elastico (anche superata la resistenza del solo conglomerato cementizio) della curva carico spostamento di prova (in fucsia provino con rinforzato con CAM[®]) implica un comportamento “rinforzato” dell’elemento già per i carichi preesistenti (fase d’esercizio della struttura).

In maniera implicita, inoltre, il limite di collasso per rottura a taglio in travi e pilastri viene innalzato, in quanto il contributo delle staffe CAM[®] si somma a quello delle staffe preesistenti.

Analogamente ad una incamicatura in acciaio “tradizionale” affinché siano congruenti le deformazioni della staffa (annegata nel getto) e del rinforzo (posto perimetralmente sulla sezione) il contributo è preso al 50% come indicato nella formula C8A.7.2.1 della Circolare [18].



Figure 16. *Interventi CAM[®] mirati allo scongiurare meccanismi fragili per schiacciamento e taglio su pilastri e travi in CA*

Le legature CAM[®] possono proseguire a cerchiare il pilastro anche in corrispondenza dell’intersezione con le travi. In tal modo si realizza un rinforzo nei confronti del meccanismo fragile di rottura per taglio del pannello nodale. La crisi del nodo è la primaria causa di collasso

fragile in quanto è impedita la trasmissione degli sforzi tra trave e pilastro.

Attraverso il Sistema CAM® si dispongono legature realizzate con più nastri sovrapposti a realizzare un'armatura trasversale confinante il nucleo di calcestruzzo che, nella maggior parte delle strutture esistenti, nasce come priva del dettaglio costruttivo di staffe che proseguono nel pilastro in corrispondenza dell'intersezione con le travi.



Figura 17. Interventi CAM® su nodi trave-pilastro

Siamo abituati ad elencare e catalogare i meccanismi fragili di rottura con i meccanismi di rottura fragile dei singoli elementi (crisi a taglio di travi, pilastri e nodi – crisi a taglio di pannelli murari). Guardando all'intera struttura ci si accorge che i meccanismi fragili sono tutti quei meccanismi che producono una tipologia di rottura di tipo "imminente" in cui il preavviso che la struttura o l'elemento fornisce è ridotto sia in termini visivi sia in termini di tempo.

Ma si può dire di più; un meccanismo di rottura fragile è anche quel meccanismo che porta non solo alla rottura di un elemento ma produce anche la perdita repentina di resistenza dell'intero fabbricato come evidenziato nelle figure seguenti.

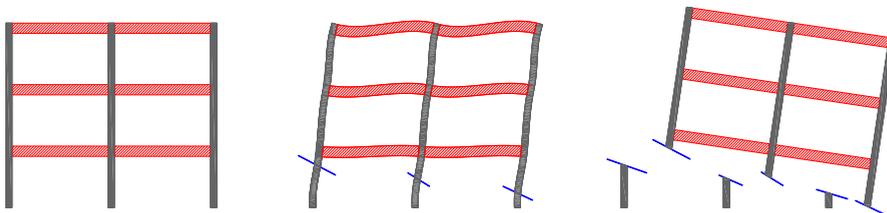


Figura 18. Influenza della rottura fragile dei pilastri a livello globale

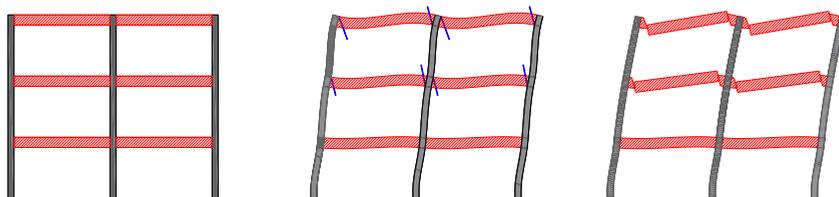


Figura 19. Influenza della rottura fragile delle travi a livello globale

Nel primo caso il collasso per meccanismo fragile a taglio del pilastro implica la contemporaneità del collasso per tutti i pilastri del medesimo piano, qualora di simile rapporto rigidezza/resistenza, e quindi il collasso “senza avviso” dell’intera struttura con l’intera caduta dei piani superiori. Nella seconda figura il collasso fragile per taglio delle travi, separa la trave dal pilastro e provoca anche il collasso dell’intero solaio.

Analogo discorso può riproporsi per i fabbricati in muratura.

Risulta quindi necessario scongiurare i meccanismi fragili a livello locale anche in conseguenza al collasso poco dissipativo a livello globale dell’intera struttura.

6. Step 4 – incrementi prestazionali nei confronti delle rotture duttili

L’ultimo step di incremento capacitivo della struttura lo si ottiene attraverso interventi sui meccanismi di collasso già duttili.

Nelle strutture in muratura tale incremento può ottenersi attraverso il Sistema CAM[®] in quanto i ricorsi verticali di nastro sono armatura discreta e quindi il comportamento del maschio murario è quello di una sezione in muratura “armata”. L’incremento resistente a flessione offerto dalla maglia CAM[®] normalmente disposta sul pannello è un contributo ridotto e fortemente dipendente dallo stato di sollecitazione assiale gravante sul maschio murario. Il contributo resistente dell’armatura descrive una curva nel dominio resistente del maschio murario rinforzato che si amplia maggiormente nel caso di sforzi assiali piccoli, mentre tende ad essere nullo per sforzi assiali notevoli. Il maggior contributo lo si ha per effetto del confinamento indotto, in quanto aumenta notevolmente la capacità rotazionale della sezione.



Figura 20. Schema di calcolo e applicazione del rinforzo CAM® a pressoflessione

Il contributo in termini di spostamento è però notevole e assunto pari a 1.5 volte quello relativo al maschio murario privo di armatura. La sperimentazione [12] svolta su una parete ad arco soggetta a spinta orizzontale ha mostrato incrementi in termini di spostamento notevoli e superiori a tale limite normativo. Successive campagne di indagini saranno volte a correlare tale incremento con i differenti layout di rinforzo applicabile.

Nelle strutture in CA il miglioramento dei meccanismi di collasso già duttili può risolversi secondo due differenti approcci:

- incremento di capacità rotazionale della sezione per effetto del confinamento
- incremento dell'armatura longitudinale esistente.

Il primo contributo è sempre presente negli elementi rinforzati con Sistema CAM® in quanto le legature trasversali sono staffe che cerchiano la sezione. Il solo contributo della resistenza a compressione aumentata per effetto del confinamento è spesso insufficiente nel coprire la sollecitazione agente a flessione, tuttavia comporta capacità in spostamento notevoli. Il secondo contributo può essere ottenuto laddove l'angolare disposto sugli spigoli dell'elemento sia reso aderente al supporto e sia in grado di assorbire gli sforzi gravanti sulla sezione in CA.

È il caso dei pressopiegati disposti inferiormente in una trave inflessa in cui le legature trasversali siano opportunamente dimensionate per il trasferimento delle azioni. Nel rinforzo dei pilastri generalmente la massima flessione si ha alle estremità dell'elemento, ovvero laddove l'angolare si interrompe. In tal caso si realizza la continuità d'armatura

attraverso la solidarizzazione di una barra all'angolare e l'inghisaggio della stessa all'interno del nucleo di calcestruzzo in fondazione oppure connettendola al profilato disposto sul pilastro superiore se anch'esso è trattato.



Figure 21. La sperimentazione svolta [14] sulle travi in CA e l'intervento di continuità d'armatura nei pilastri

Tuttavia, a livello globale, ci sono casi in cui il susseguirsi di collassi duttili produca globalmente un collasso di tipo “fragile”.

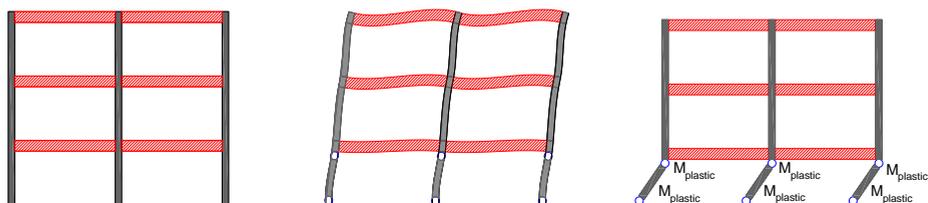


Figure 22. Influenza delle rotture duttili dei pilastri a livello globale

È questo il caso del collasso per piano soffice come evidenziato nella figura precedente. Tale esempio vale ovviamente sia che si parli di muratura che di strutture intelaiate. Il meccanismo globale generato dalla rottura per cernierizzazione dei pilastri di piano genera il collasso di tutta la porzione di fabbricato superiore, tale meccanismo sebbene generato da plasticizzazioni duttili corrisponde a tutti gli effetti ad un meccanismo di collasso fragile.

È chiaro dunque che, leggendo oltre le definizioni “classiche” di meccanismi fragili, fragili primari e duttili, il loro effetto sul meccanismo globale evidenzia comportamenti anche più disastrosi di quanto si possa immaginare. Pertanto il miglioramento prestazionale sui meccanismi definiti duttili si differenzia in maniera sostanziale

qualora si adotti sugli elementi portanti verticali (pilastri, pareti) od orizzontali (travi, fasce di piano).

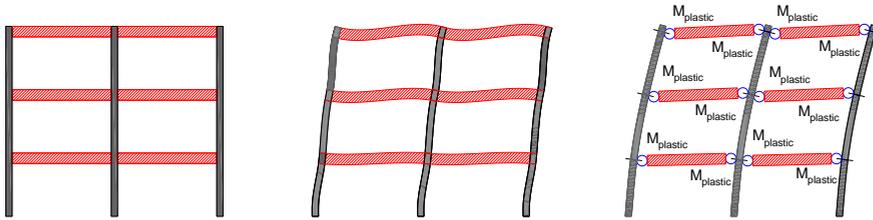


Figura 23. *Influenza delle rotture duttili delle travi a livello globale*

La cernierizzazione delle travi comporta a livello globale una maggior capacità dissipativa alla struttura, come riportato nella figura precedente.

Tale meccanismo evidenzia che qualora i pilastri garantiscano il costante trasferimento dei carichi verticali a terra, con le travi generanti cerniere plastiche dissipative, venga a prodursi un meccanismo globale capace di un funzionamento non “disastroso” e fortemente dissipativo.

Senza doverlo definire esplicitamente, tale percorso ha portato ad evidenziare come il susseguirsi degli step di intervento, nel tentativo di aumentare le capacità in resistenza ed in dissipazione globale della struttura, è andato nel verso di una costante ricerca di imposizione di gerarchie di rottura.

Gerarchia di rottura tra tipologie di meccanismi fragili primari-duttili (step da 1 a 3) e gerarchia di rottura tra elementi verticali ed orizzontali (step 4).

In sintesi si potrebbe dire che l'unico meccanismo globale veramente duttile è solo quello ottenibile dall'imposizione o dal conseguimento di tutte le gerarchie di rottura.

7. Conclusioni

The strengthening of reinforced concrete and masonry structure must be obtained through a constant search for the imposition of breaking hierarchies. In other words, it can be defined steps of intervention, each one propedeutic to the next (following one?), first aimed to guarantee the connect behaviour of the structure and, after

designed, to ductile global behaviour in which as many elements as possible respond working together to the external action, taking advantage of the hyperstaticity of the structure.

In masonry structure there is a primary problem that causes brittle collapse: the lack of constraint (in stone weaving and between macroelements wall-wall and wall-slab) prevents the activation of strength characteristics.

This brittle behaviour can be solved through CAM® technology, which uses a stainless steel strip to create a continuous and three-dimensional stitching system.

Achieved connected behaviour (in masonry or in CA structure), other steps of interventions can be reached by maximizing the dissipative capacity of the structure, increasing its resistance to shear and then to bending mechanisms.

In framed building for example, brittle break in beam, column and joint can be solved using CAM® tie that realizes post-placed but pre-stressed stirrup.

A good retrofitting design aimed at guaranteeing the globally ductile mechanism is well matched with the strengthening that can be realized with the CAM® technology which stands out for its characteristics of excellent resistant performance, reduced thickness and application flexibility.

References

- [1] W. Samarisinghe, A.W. Henry, The strength of Brickwork under biaxial tensile and compressive stress, Proc. 7th Int. Symp. On Load Bearing Brickwork, London, 1980.
- [2] D. Abruzzese, M. Como, G. Lanni, *On the lateral strength of multistorey masonry walls with openings and horizontal reinforcing connections*, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Ed. Balkema, 1992.
- [3] F. Braga, M. Dolce, *Un metodo per l'analisi di edifici multipiano in muratura antisismici*, Proc. Of the 6th I.B.Ma.C., Roma, 1982.
- [4] M. Como, A. Grimaldi, *An unilateral model for the limit analysis of masonry walls*, International Congress on "Unilateral Problems in Structural Analysis", Ravello, Springer Ed., 1985.
- [5] V. Turnšek, P. Sheppard, *The shear and flexural resistance of*

- masonry walls*, Proc. of the Intern. Research Conference on Earthquake Engineering, Skopje, 1980.
- [6] M. Dolce, A. Cacosso, F. C. Ponzio, R. Marnetto, *New technologies for the structural rehabilitation of masonry constructions: concept, experimental, validation and application of the Cam System*, Febbraio 2004.
- [7] G. Palmieri, *Il miglioramento sismico dei beni monumentali con il Sistema CAM*, Settembre 2008.
- [8] M. Dolce, F.C. Ponzio, M. Di croce, C. Moroni, F. Giordano, D. Nigro, R. Marnetto, *Experimental assessment of the CAM and DIS-CAM systems for the seismic upgrading of monumental masonry buildings*, Giugno 2009.
- [9] R. Marnetto, *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.
- [10] M. Dolce, R. Gigliotti, M. Laterza, D. Nigro, R. Marnetto, *Il Rafforzamento dei Pilastrini in C.A. Mediante il Sistema CAM*, 10° Convegno Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Potenza-Matera 2001.
- [11] V. Bianco, G. Monti, A. Vari, G. Palmieri, *Seismic amelioration of existing reinforced concrete Buildings: Strategy to optimize the amount of Reinforcement for joints*, COMPDYN 2017, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece, 15–17 June 2017.
- [12] M. Cilia, P. Colajanni, R. Marnetto, A. Recupero, N. Spinella, 9th International Masonry Conference, *Experimental Tests on Typical Masonry of Messina Area (Italy) Retrofitted with CAM: a Full Scale Arch*, Guimarães 2014.
- [13] M. Cilia, P. Colajanni, R. Marnetto, A. Recupero, N. Spinella, 9th International Masonry Conference, *Experimental Tests on Typical Masonry of Messina Area (Italy) Retrofitted with CAM: Full Scale Panel*, Guimarães 2014.
- [14] M. Leonori, A. Vari, *Intervenire sull'esistente: il miglioramento e l'adeguamento sismico mediante il Sistema CAM®*, ANIDIS, Pistoia 2017.
- [15] A. Salvatori, *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.
- [16] 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).

- [17] DM 14 Gennaio 2008: *“Norme tecniche per le costruzioni”* (Testo Unico 2008).
- [18] 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”*.
- [19] CNR DT 200/2013: *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*.
- [20] UNI EN 1993-1-4:2007 Gennaio 2007 Eurocodice 3: *Progettazione delle strutture di acciaio - Regole generali - Regole supplementari per acciai inossidabili*.
- [21] UNI EN 1998-3:2005 Agosto 2005 Eurocodice 8: *Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte3: Valutazione e adeguamento degli edifici*.
- [22] Decreto 20 Novembre 1987: *Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*.