

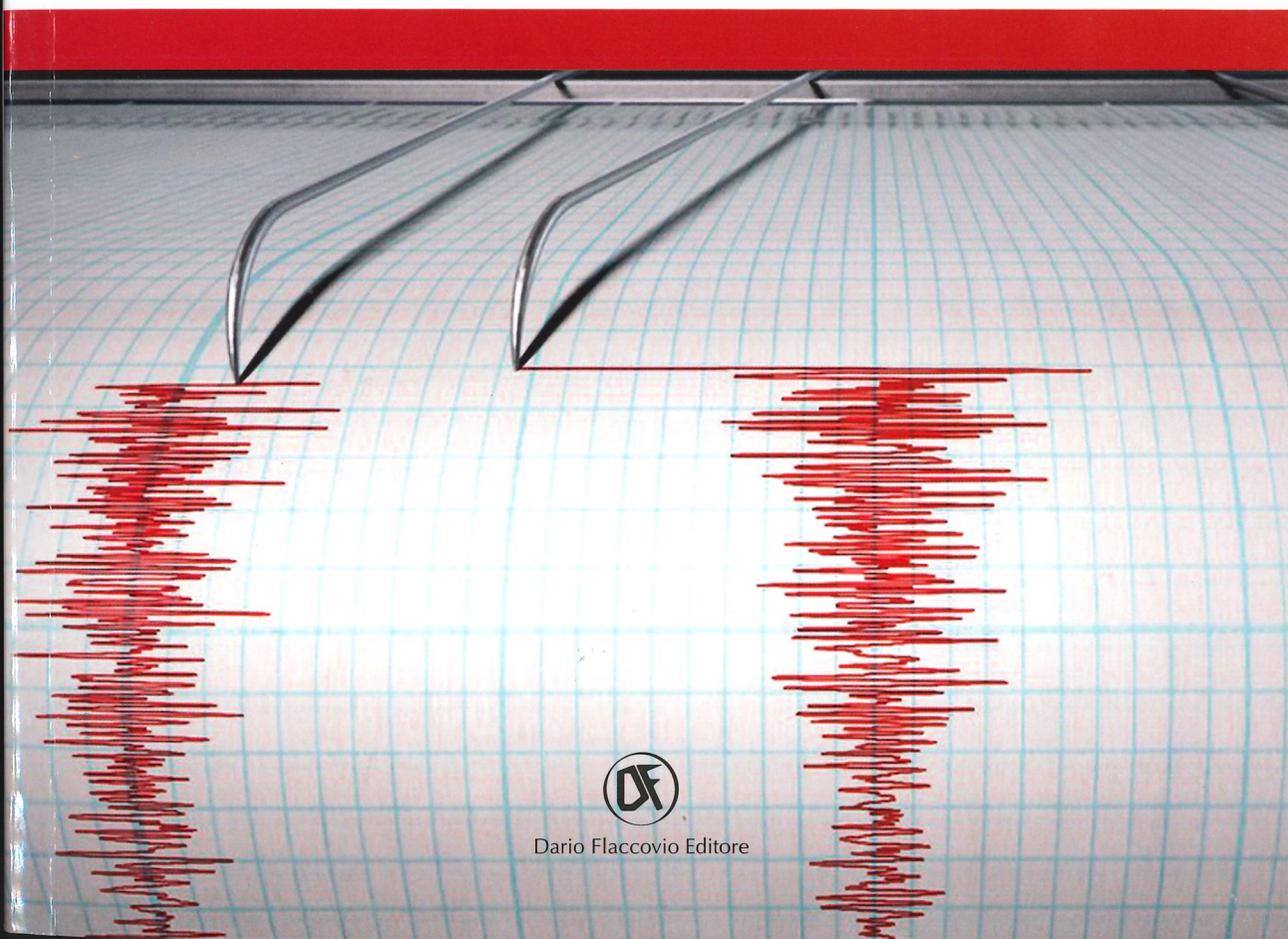
EDIFICI E IMPIANTI DI NUOVA COSTRUZIONE ED ESISTENTI E PATRIMONIO CULTURALE

PROTETTI DAL TERREMOTO GRAZIE A MODERNE TECNOLOGIE

Normativa, sperimentazione, progettazione, realizzazione,
collaudo e monitoraggio sismico

a cura di

Alessandro Martelli



Dario Flaccovio Editore

IL CONSOLIDAMENTO DEGLI EDIFICI ESISTENTI MEDIANTE IL SISTEMA CAM[®] - BOLOGNA, 2016

Marianna Leonori, Alessandro Vari
EDILCAM Sistemi Srl, Ufficio Tecnico, Via dei Genieri 39, Rome, Italy

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.

KEYWORDS

Edifici esistenti in muratura e CA, consolidamento strutturale, miglioramento e adeguamento sismico, Sistema CAM[®]

1 INTRODUZIONE

L'approccio alla problematica del consolidamento strutturale passa da una necessaria e accurata fase di indagine conoscitiva della struttura (in termini di materiali, geometria e dettagli costruttivi) alla analisi del suo comportamento statico e/o dinamico per effetto dell'azione cui intendiamo offrire protezione.

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

L'analisi visiva dei danneggiamenti subiti dagli edifici a seguito dell'evento sismico è utilissima alla comprensione di come esistano problematiche 'proprie' delle strutture che sebbene possano apparire differenti, siano invece affini anche tra manufatti in muratura e in CA.

Ad esempio 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 assenza di continuità tra macroelementi (tra pareti o tra pareti e orizzontamenti).

Gli edifici in CA, invece, 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 rigidità, in pianta o in elevazione, che determinano una concentrazione degli sforzi in porzioni limitate.

Nella realtà ciò che determina il collasso, 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.

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 IL SISTEMA CAM®

2.1 Principi base

Il Sistema CAM (Cucitura Attiva dei Manufatti) si basa sulla applicazione 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).

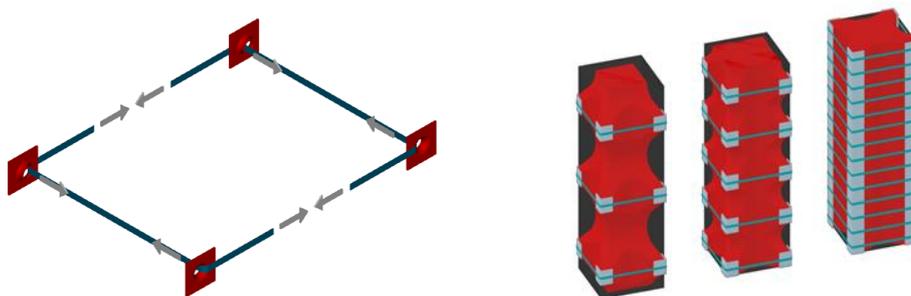


Fig. 1 - Schema statico elementare di riferimento

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.

L'applicazione su CA prevede l'impiego di angolari pressopiegati in acciaio zincato di classe S275 con lavorazione interna mandrolata.



Fig. 2 - 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	$\neq 6/8/10$	UNI EN 10025-2	S275	≥ 430	≥ 275	20
Sigillo	45x55x1 (0.90)	UNI EN 10088-4	1.4301 - 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:

$$f_{yd} = \min \left\{ \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}; \frac{0.7 \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \right\} \quad (1)$$

dove $\gamma_{M0} = 1,10$ (UNI EN 1993-1-4) coefficiente di sicurezza sul materiale;
 $\gamma_{M2} = 1,25$ (Tab. 4.2.XII delle NTC) coefficiente parziale di sicurezza sui collegamenti.

Le tensioni di calcolo per le due tipologie di nastro impiegato pertanto sono:

MURATURA – Nastro INOX AISI 301 $f_{yd} = 318 \text{ MPa}$

CA – Nastro INOX AISI 301-2H C1000 $f_{yd} = 560 \text{ MPa}$

3 IL CONSOLIDAMENTO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

3.1 Problematiche dei manufatti murari

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 in compito di trasferire gli sforzi di compressione, all'acciaio quello di mantenere in posizione gli inerti attraverso il contenimento, per trazione, fornito dalla 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.

Dalla ripetizione in posizione orizzontale e verticale dell'anello base (fig.1) si forma un reticolo tridimensionale (fig.3) che consente di ottenere una condizione finale di coazione triassiale, in grado di conferire maggior resistenza a compressione al volume murario per effetto del confinamento indotto e allo stesso tempo le legature costituiscono armatura ed offrono capacità portante a trazione e senza incremento di massa.

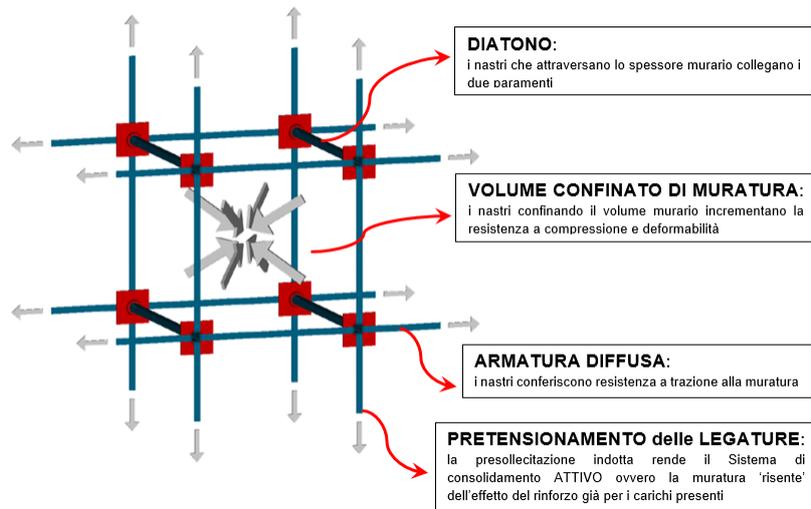


Fig. 3 - Il reticolo tridimensionale del Sistema CAM

3.2 Soluzioni alle problematiche

La compattazione della parete muraria così come la possibilità di realizzare una cucitura diffusa tra gli elementi rende il Sistema CAM estremamente idoneo per il ripristino dei vincoli spesso assenti nei manufatti in muratura.

La flessibilità e la semplicità del Sistema permette di superare agevolmente ostacoli legati alla presenza di orizzontamenti (le legature verticali attraversano i solai, le volte e le scale) o legati a geometrie particolari delle pareti (sezioni variabili e riseghe oggetto di rimaneggiamenti in fasi successive) ovvero la conservazione degli elementi di pregio architettonico (passaggio diagonale delle legature in prossimità dei portali o dei fregi) rendendo di fatto il rinforzo continuo su tutta la struttura.



Fig. 4 - Esempi di flessibilità distributiva del Sistema CAM

3.2.1 Ricompattazione dell'apparecchio murario

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

Se la muratura si comporta solo come un insieme di elementi semplicemente appoggiati o scarsamente legati tra di loro, non è lecito considerarla come un materiale omogeneo, pertanto qualsiasi considerazione strutturale viene meno al venir meno di tale ipotesi.



Fig. 5 - La rottura per disgregazione dell'apparecchio murario

Attraverso l'applicazione di una maglia CAM diffusa si realizza, grazie al numero totale di nastri che attraversano lo spessore della parete, 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 dello spanciamiento.

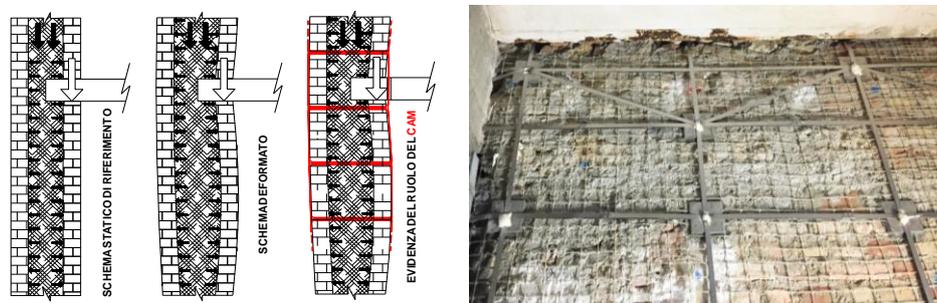


Fig. 6 - L'effetto del diatono CAM e applicazione su muratura di caratteristiche scadenti

Laddove la muratura abbia caratteristiche particolarmente scadenti e quindi ad esempio si abbia la presenza di elementi lapidei tondeggianti e di piccola pezzatura

si consiglia l'applicazione al di sotto del reticolo CAM di una rete porta-intonaco; la sperimentazione svolta [13,14] ha mostrato ottimi risultati.

3.2.2 Incatenamenti e ammorsature tra pareti ortogonali

Vantaggio implicito dell'applicazione del Sistema in corrispondenza degli incroci murari è legato alla realizzazione di ammorsature diffuse con capacità di efficace collegamento tra pareti ortogonali che solo in edifici 'ben costruiti' risultano già ben connesse.



Fig. 7 - Ammorsature efficaci anche in presenza di cantonali in pietra a vista

Tale aspetto ha primaria importanza per realizzare il comportamento scatolare dell'edificio e pertanto per passare da meccanismi locali di collasso a più alta energia di attivazione.

L'ulteriore vantaggio risulta nell'applicazione sempre a doppia faccia così da avere risultante di spinta baricentrica.

3.2.3 Vincoli tra pareti ed orizzontamenti

Il solaio è un elemento che assume enorme importanza nel funzionamento sismico delle strutture svolgendo un'efficace funzione di ripartizione delle azioni orizzontali tra gli elementi verticali.

Un solaio ben ammorsato lungo il profilo e rigido nel suo piano, una copertura non spingente ben ammorsata e rigida nella sua proiezione orizzontale, un cordolo ben ammorsato e con un comportamento a telaio sufficientemente rigido, tutti e tre il più leggeri possibile, realizzano quel grado di vincolo in più, capace di ridurre la

deformabilità della struttura e di conferire un comportamento significativamente migliore nei confronti delle azioni globali che possono investirla.

Laddove tali elementi non siano presenti sarà fondamentale ripristinare i vincoli assenti.

La realizzazione del cordolo tramite il Sistema CAM (fig. 8) permette il corretto funzionamento delle pareti che cucite insieme assorbono l'azione orizzontale trasmessa dal solaio. Inoltre il sistema di legature permette la compattazione della porzione sommitale della muratura che è soggetta allo scarico del solaio.

Attraverso la disposizione di anelli in posizione orizzontale, verticale e diagonale si realizza una trave cordolo in muratura armata con il vantaggio di evitare pericolosi scassi nella spessore della parete.



Fig. 8 - Realizzazione del cordolo CAM

Il vincolo atto ad evitare lo sfilamento del solaio, di piano o di copertura, dalla propria sede viene realizzato attraverso delle arpionature diffuse su ciascun travetto (all'intradosso o all'estradosso). Attraverso l'apposizione di un piolo in corrispondenza dell'elemento portante del solaio e forature nello spessore della muratura (fig. 9), si realizzano anelli di forma pentagonale in pianta (fig. 10) che possono essere costituiti da più nastri in sovrapposizione.



Fig. 9 - L'arpionatura dei travetti del solaio all'intradosso e all'estradosso

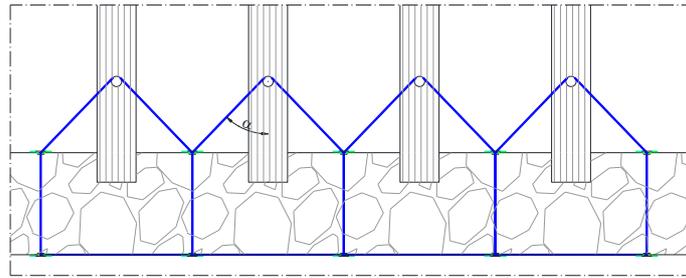


Fig. 10 - L'arpionatura dei travetti del solaio: disposizione in pianta

Calcolato dunque il W_{sismico} del solaio, ripartito per area di influenza sulla singola trave, e applicando l'accelerazione sismica di progetto $S_d(a_g, T)$, si ottiene la massima azione di trazione/compressione orizzontale agente su ogni singola trave che deve essere assorbita dal sistema di legature.

$$n_{\text{nastri}} = \frac{S_d(a_g, T) \cdot \frac{W_{\text{sismico, sol}}}{n_{\text{travi}}}}{A_{\text{nastro}} \cdot f_{y d, \text{nastri}} \cdot 2 \cdot \cos(\alpha)} \quad (2)$$

3.2.4 Realizzazione di armatura diffusa

La realizzazione di una cucitura diffusa tra pareti ortogonali e a livello degli orizzontamenti permette il funzionamento scatolare dell'edificio, rendendo il manufatto in muratura una struttura tridimensionale, capace quindi di assorbire le azioni esterne e poterle distribuire efficacemente sugli elementi resistenti; la maglia disposta è inoltre armatura diffusa per la parete che quindi ha capacità a trazione. Nella fig.11 si riporta lo schema grafico di riferimento relativo al flusso delle tensioni derivanti dall'applicazione della maglia CAM secondo una foratura a quinconce.

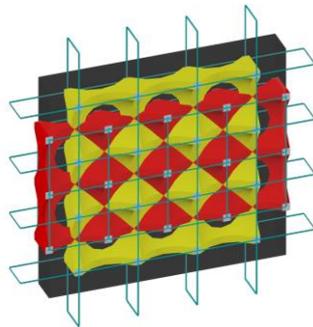


Fig.11 - Schema grafico di riferimento

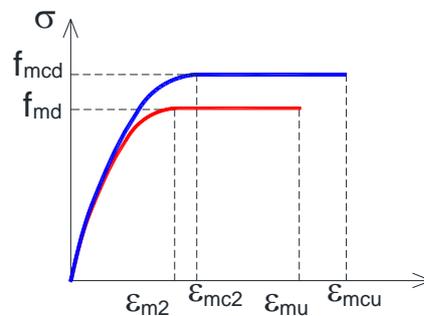


Fig 12 - Modello costitutivo: la muratura confinata

Il primo effetto si ha relativo alla compattazione muraria, per effetto del confinamento (fig. 12), il cui contributo si stima impiegando le formule in normativa [17] da cui si ricava l'incremento in termini di resistenza a compressione (3) e deformazione ultima (4) per la muratura.

Le formulazioni legano l'entità dell'azione trasversale fornita dal rinforzo all'incremento ottenuto per effetto Poisson sul carico verticale massimo raggiungibile.

$$f_{mcd} = f_{md} \left[1 + k' \cdot \left(\frac{f_{1,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{mcd} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{1,eff}}{f_{md}}} \quad (4)$$

I ricorsi verticali di nastro, se efficacemente ancorati a livello di cordolo superiore e inferiore, sono armatura flessionale per il pannello.

Il loro contributo si stima analogamente alla muratura armata [15], considerando la sola armatura tesa in posizione discreta.

$$M_{Rmd..CAM} = (0.85 \cdot f_{mcd}) \cdot 0.8x \cdot t \cdot \left(\frac{L}{2} - 0.4x \right) + f_{yd,v} \cdot A_{s,vert} / s_{vert} \cdot (L-x) \cdot \frac{x}{2} \quad (4)$$

Il primo termine della (4) rappresenta il contributo della porzione compressa (considerando l'effetto del confinamento indotto f_{mcd}), il secondo è il contributo dell'armatura diffusa $A_{s,vert}$ realizzata con i nastri disposti in verticale a passo s_{vert} .

Anche i ricorsi orizzontali di nastro sono fondamentali nel meccanismo resistente, in quanto un efficace confinamento della sezione permette di sfruttare al massimo la capacità rotazionale della sezione in muratura.

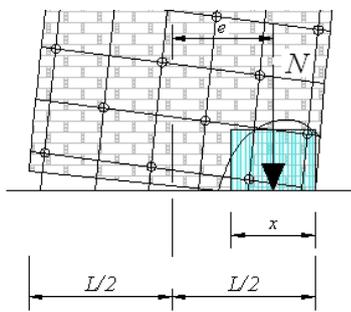


Fig. 13 - Schematizzazione della sezione rinforzata

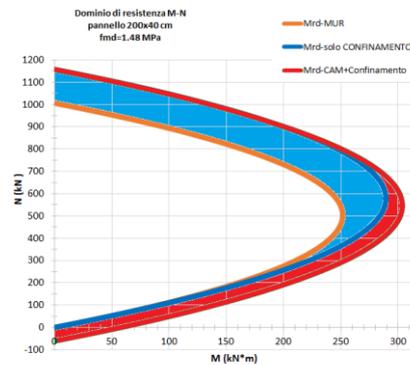


Fig 14 - Dominio resistente di un pannello rinforzato e applicazione

In fig. 14 si nota come un efficace confinamento permetta incrementi notevoli in termini di momenti resistenti in particolare per sollecitazioni assiali notevoli (porzione in blu), mentre l'effetto dell'armatura aggiuntiva è massimo per basse sollecitazioni assiali (porzione in rosso).

Nel caso in cui il pannello sia carente dal punto di vista della sollecitazione tagliante, il rinforzo CAM si specializza realizzando maglie in cui il passo tra le legature disposte in orizzontale è minore.

Assumendo valida la formula additiva riportata in normativa (7.8.3.2.2 delle NTC), il contributo dell'armatura aggiuntiva disposta, si stima secondo la (5) nel caso di crisi per taglio scorrimento e secondo la (6) per valutare la crisi nei confronti della fessurazione diagonale:

$$V_t = d \cdot t \cdot f_{vd} + \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,orizz} \cdot f_{yd}}{s_{orizz}} \quad (5)$$

$$V_t = L \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}} + \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,orizz} \cdot f_{yd}}{s_{orizz}} \quad (6)$$

I ricorsi verticali di nastro risultano in questa configurazione necessari per ostacolare il movimento lungo la superficie di rottura ed inoltre per riequilibrare le forze e permettere il funzionamento a traliccio dell'elemento rinforzato.

Il drift ultimo del pannello 'armato' con i nastri CAM può essere incrementato del fattore 1.5 (7.8.2.2.1 delle NTC).

Assumendo le indicazioni riportate per gli edifici esistenti (C8.7.1.4 della Circolare) il valore limite per azioni nel piano flessionale è di 0.6 % l'altezza del pannello, quindi si consiglia di limitare lo spostamento ultimo del pannello rinforzato a presflessione con Sistema CAM al valore $0.6 \cdot 1.5 = 0.9\%$ dell'altezza pannello.

Il drift ultimo a taglio del pannello passa invece dallo 0.4% dell'altezza pannello (C8.7.1.4 della Circolare) allo 0.6% (7.8.3.2.2 delle NTC).

4 IL CONSOLIDAMENTO DEGLI EDIFICI IN CA

4.1 Problematiche delle strutture in CA

A differenza dei manufatti in muratura, tale tipologia costruttiva non presenta problematiche legate all'assenza di vincoli essendo strutture realizzate 'continue'.

La tecnica costruttiva del cemento armato, è relativamente recente, e specialmente nei primi anni non si aveva la necessaria conoscenza del loro comportamento sotto azioni sismiche.

Se l'edilizia in muratura è frutto di secoli di apprendimento e seppur in assenza di normative antisismiche esisteva la regola del 'buon costruire', negli edifici in CA mancava una banca storica di dati relativi al danno.

Si deve infatti arrivare in epoche recenti per avere approfondimenti circa il comportamento sotto azioni orizzontali delle strutture intelaiate e ancora più recente se non attuale è lo studio della loro interazione con altri elementi considerati 'secondari'.

Le tamponature, spesso considerate solo come 'massa' rivestono invece un ruolo fondamentale nel comportamento globale, influenzando notevolmente la distribuzione delle masse e delle rigidità in gioco.

La distribuzione di masse e rigidità non uniforme in pianta comporta il nascere di meccanismi torsionali del fabbricato in cui gli elementi più sollecitati risultano essere i perimetrali, mentre forti variazioni di rigidità in elevazione comportano concentrazioni a livello di piano e quindi meccanismi di collasso fragili per la struttura (piano soffice).

Saper sfruttare la capacità duttile della struttura, consente, nelle strutture continue, la dissipazione di energia durante l'evento sismico grazie alla capacità di danneggiarsi ma senza raggiungere il collasso.

Per poter arrivare al comportamento duttile della struttura in CA, da un lato è fondamentale agire a livello di singolo elemento strutturale, favorendo la rottura per flessione (duttile) a sfavore della rottura a taglio (fragile), dall'altro è fondamentale conoscere attraverso quali gerarchie di rotture tra elementi si possa ottenere il massimo coinvolgimento di più elementi resistenti in parallelo.

Una buona progettazione di un qualsivoglia intervento pertanto deve necessariamente prevedere lo studio di tali problematiche e se necessario l'inserimento di elementi atti al centraggio delle rigidità, oltre all'intervento di aumento delle capacità resistenti dei singoli elementi.

Proprio in tale ottica, il Sistema CAM permette di ottenere degli ottimi risultati.

L'anello confina interamente la sezione trasversale di trave e pilastro e può essere costituito da più nastri sovrapposti.

In corrispondenza degli spigoli sono posti in opera profilati metallici in lamiera pressopiegata e in corrispondenza dei fori sono posizionate le piastre imbutite: il nastro non è posto a diretto contatto del supporto in CA pertanto non sono necessari trattamenti superficiali delle superfici prima dell'applicazione del sistema, se non l'eliminazione di un eventuale intonaco.

Gli anelli così realizzati sono a tutti gli effetti armatura trasversale aggiunta (fig. 15), pertanto analogamente alle staffe, assolvono a quel ruolo fondamentale nello scongiurare i meccanismi di rottura fragili (confinamento, rinforzo a taglio) e di migliorare quelli duttili (aumento di capacità rotazionale della sezione confinata, confinamento dei ferri longitudinali).

Infine, la presollecitazione impressa all'atto della chiusura dell'anello introduce una precompressione sulla sezione trasversale e quindi una strizione opposta allo spanciamiento derivante dall'azione assiale; ne consegue che l'elemento risulta rinforzato già per una quota parte dei carichi nella fase d'esercizio.

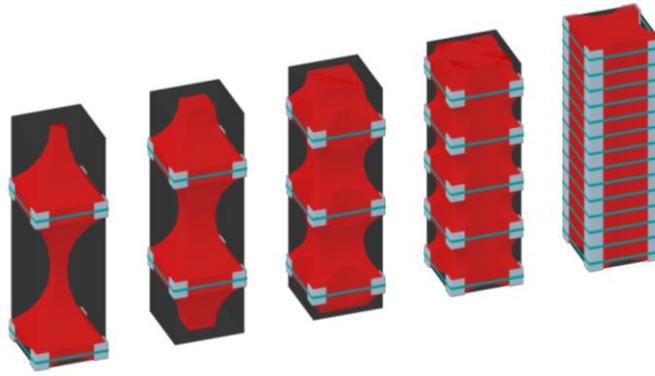


Fig. 15 - Schema statico elementare di riferimento

4.2 Soluzioni alle problematiche mediante il Sistema CAM®

4.2.1 Confinamento

Analogamente a quanto già descritto per la muratura, il confinamento effettuato aumenta la capacità resistente a compressione centrata dell'elemento e ne aumenta anche la deformazione ultima, migliorandone la duttilità a pressoflessione.

La resistenza a compressione (7) dell'elemento confinato soggetto alla pressione di confinamento può calcolarsi con la seguente formulazione della Circolare C8A.7.6:

$$f_{ccd} = f_{cd} \left[1 + 3.7 \left(\frac{0.5 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot f_{yd}}{f_{cd}} \right)^{0.86} \right] \quad (7)$$

Il miglioramento in termini di duttilità è espresso mediante l'incremento della deformazione ultima a compressione attraverso la seguente espressione (8):

$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + 0.5 \cdot \frac{0.5 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot f_{yd}}{f_{ccd}} \quad (8)$$

Anche la deformazione corrispondente al picco di resistenza grazie al confinamento aumenta e può essere posta (9) pari a:

$$\varepsilon_{cc2} = \varepsilon_{c2} \cdot \left[1 + 5 \cdot \left(\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

Il primo effetto legato al simultaneo incremento della resistenza e della deformabilità, comporta l'ampliamento del diagramma costitutivo del calcestruzzo (fig.16).

Per tutte le formulazioni di calcolo e verifica della sezione si potrà pertanto far riferimento a tali valori.

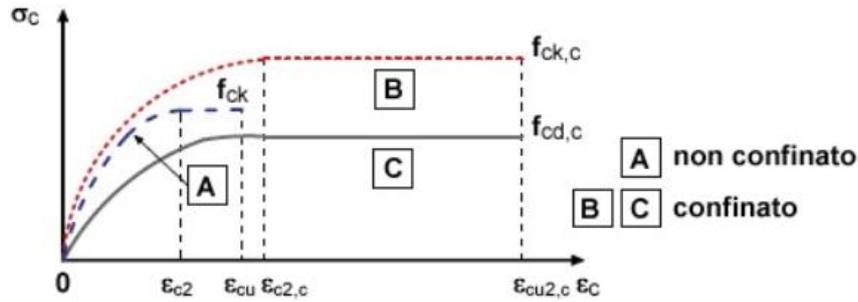


Fig. 16 - Diagramma costitutivo del calcestruzzo confinato

Il diagramma sopra riportato è esplicito dell'incremento in duttilità a livello di 'materiale'.

Dalla duttilità di 'materiale' si passa quindi alla duttilità di 'sezione' ovvero alla maggior capacità dell'elemento confinato di sopportare maggiori spostamenti e rotazioni. L'incremento in termini di rotazione ultima della sezione può essere stimato secondo le formulazioni riportate in normativa a C8A.6.1 [16].

Il sistema CAM quindi incrementa la duttilità locale del singolo elemento e, se opportunamente distribuito, permette un aumento di duttilità globale della struttura.

4.2.2 Incremento di armatura

Attraverso l'applicazione delle legature costituite anche da più nastri pre-tesi in sovrapposizione distanti le une dalle altre ad un passo $p_{n,CAM}$ fissato, si è implicitamente realizzato il rinforzo a taglio dell'elemento strutturale.

Le legature infatti altro non sono che staffatura aggiuntiva.

Il contributo dei nastri CAM si va a sommare a quello delle staffe preesistenti (11); il passo delle legature e il numero dei nastri sovrapposti vengono dimensionati per raggiungere il valore di taglio resistente di progetto, impiegando le formulazioni (10) riportate all'interno della circolare (C8A.7.2.1)

$$V_{Rsd,CAM} = 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_{CAM} \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) \cdot sen\alpha \quad (10)$$

$$V_{Rsd} = V_{Rsd,staffe} + V_{Rsd,CAM}$$

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot \left(d \cdot \frac{n_{br,st} \cdot A_{st}}{s_{st}} \cdot f_{yd} + 0.5 \cdot d_{CAM} \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM} \right) \cdot ctg\theta \quad (11)$$

La staffatura CAM è sempre ortogonale all'asse longitudinale dell'elemento (nei casi in cui la geometria della sezione sia variabile e quindi il nastro non possa pas-

sare ortogonalmente è necessario forare a livello intermedio la sezione per evitare lo scivolamento del nastro) pertanto α si assume pari a 90° .



Fig. 17 - Intervento a taglio e confinamento di pilastri

Per le travi è possibile realizzare l'intervento forando il solaio, e quindi cerchiando l'intera sezione di trave, oppure, laddove non sia possibile intaccare il pavimento del livello superiore e vi sia una altezza estradossale della trave rilevante (almeno pari allo spessore), è possibile forare la trave immediatamente al di sotto del solaio e cerchiarne un'altezza parziale. In tal caso l'altezza utile di trattamento d_{CAM} verrà presa pari a l'altezza trattata.

Nelle travi è bene non impiegare un passo inferiore a 15-20 cm, per evitare di indebolire eccessivamente la sezione di attacco del solaio; si dispongono quindi più nastri in sovrapposizione.

Laddove la sezione di intervento presenti una forma rettangolare allungata è possibile realizzare dei fori intermedi, a interrompere la maglia lungo il lato maggiore dell'elemento. In tal modo la geometria confinata è più efficiente e si realizza una staffa a più braccia.

Laddove il solo rinforzo nei confronti dei meccanismi fragili di collasso non fosse sufficiente e si volesse portare in conto anche il contributo a pressoflessione offerto dall'angolare è fondamentale garantire la continuità d'armatura nella sezione in cui l'angolare si interrompe: in tal caso si adotta la soluzione che prevede il posizionamento di barre ad aderenza migliorata che vengono saldate agli angolari e che vengono inghisate (in fondazione ad esempio) oppure che si connettono all'elemento contiguo se trattato anch'esso.

4.2.3 Rinforzo del nodo trave-pilastro nelle strutture in CA

Altro meccanismo fragile che deve essere sempre evitato negli edifici in CA è la rottura del nodo trave-pilastro, essendo l'elemento atto al trasferimento degli sforzi. Il meccanismo di rottura del pannello del nodo è generalmente per taglio, con formazione di fessurazione diagonale (meccanismo fragile) in assenza di staffatura, ovvero di un traliccio resistente, quindi di una biella compressa e di un corrente teso, qualora siano presenti staffe (meccanismo meno fragile).

Molto spesso, gli edifici esistenti mancano del dettaglio costruttivo delle staffe attraversanti il nodo, pertanto attraverso un sistema di legature costituite da più ricorsi di nastro in sovrapposizione, possiamo introdurre con il Sistema CAM delle staffature aggiuntive che portano all'aumento di capacità del nodo e al contempo possono portare a configurarne il collasso verso il meccanismo a traliccio (meno fragile).



Fig. 18 - Interventi sui nodi trave-pilastro carenti di armatura

Qualora la geometria del nodo lo rendesse possibile (nodo di facciata o nodo d'angolo) e laddove fosse necessario, si può disporre un piatto metallico adeguatamente connesso superiormente e inferiormente. Il ruolo di tale piatto, in questa configurazione di rinforzo, è quello di assorbire parte della sollecitazione che arriva al nodo lavorando per rigidezza in parallelo al nucleo di calcestruzzo, e rappresenta l'unica possibilità di rinforzare il nodo nel caso in cui il limite si raggiunga lato compressione.

Al V_{jbd} agente si sottrae la parte 'assorbita' dal piatto ($V_{jbd,p}$) per rigidezza (spessore del piatto t_p e rigidezza a taglio k_{piatto} , spessore del nodo t_n e rigidezza a taglio k_{nodo}):

$$V_{jbd}' = V_{jbd} - V_{jbd,p} = V_{jbd} - \frac{K_{piatto}}{K_{piatto} + K_{nodo}} \quad (12)$$

La verifica viene poi svolta secondo le indicazioni in normativa [15] assumendo valida l'ipotesi che il nodo sia o meno fessurato.

I nastri CAM disposti in più ricorsi, per effetto della presollecitazione, introducono una tensione orizzontale σ_h , ovvero si oppongono alla formazione della lesione

(formulazione a nodo non fessurato – C8.7.2.5), mentre a seguito della formazione della stessa lavorano come armatura (formulazione a nodo fessurato – 7.4.4.3.1).

4.2.4 Collegamenti su strutture in CA/CAP prefabbricate

Problemi analoghi ai manufatti in muratura si riscontrano, per mancanza di continuità strutturale, principalmente negli edifici prefabbricati, come hanno dimostrato i crolli del sisma del 2012 in Emilia.

In tali casi le soluzioni da adottare circa il ripristino del vincolo insufficiente o assenti tra elementi strutturali quali pilastri-travi, travi-tegoli, elementi principali e pannelli perimetrali, ricordano quanto nel problema, tanto nella soluzione da attuare, i fabbricati in muratura.

Rendere ‘continuo’ il fabbricato che nasce come ‘discontinuo’, permette alla struttura di reagire globalmente all’azione esterna e non si comporti come tanti elementi sconnessi.

La soluzione consiste, a seconda della tipologia di elementi e della geometria di ciascuno, nella disposizione dell’elemento nastro a trattenimento nei confronti dello sfilamento e dunque di perdita d’appoggio.

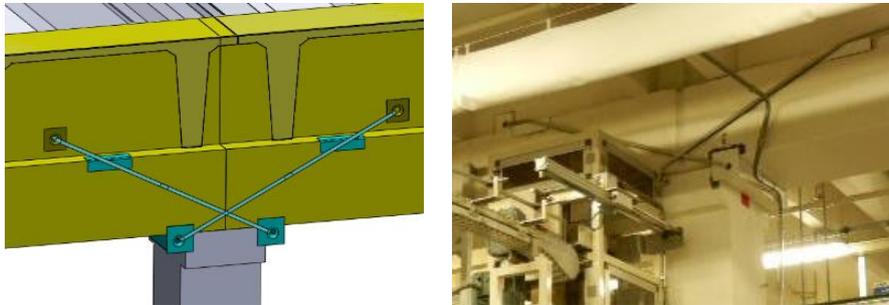


Fig. 19 - Legatura pilastro-trave: compatibilità con macchinari ed impianti.

L’enorme vantaggio rispetto ad altre tecniche più tradizionalmente impiegate in questo ambito, risiede nella flessibilità insita nel non avere elementi a dimensione fissata e pertanto nel poter variare la configurazione e la disposizione a seconda delle necessità. Ad esempio per la presenza di armature il foro può essere convenientemente spostato in posizione differente da quello previsto ovvero per la dimensione sottile del nastro in presenza di impianti o macchinari si rendono possibili soluzioni altrimenti irrealizzabili.



Fig. 20 - Legatura pilastro-trave: compatibilità con macchinari ed impianti.

5 CONCLUSIONI

È di fondamentale importanza, sempre e non solo quando la coscienza si risveglia a seguito di un evento disastroso, preoccuparci del nostro patrimonio storico.

Il nostro costruito, che sia esso di edifici in muratura o in CA, va messo in sicurezza nei confronti dell'azione più pericolosa stante la morfologia del nostro territorio: il sisma.

Sembra difficile trovare un filo logico comune agli interventi su queste due tipologie costruttive così diverse, eppure, comprendendo a fondo la problematica strutturale, si ritrova che il sisma è fondamentalmente energia trasmessa, allora la struttura che reagisce bene a tale azione è quella che riesce a dissipare tale energia.

Tale dissipazione si realizza quando l'edificio ha un comportamento duttile, ovvero quando tanti più elementi possibili concorrono a sopportare l'azione esterna.

Negli edifici in muratura il comportamento duttile si ottiene quando vengono evitati i collassi prematuri della struttura, che nella maggior parte dei casi avviene per prematuri e fragili meccanismi locali di collasso.

I meccanismi fragili sono legati alla scarsa capacità o totale assenza di vincolo tra elementi, siano essi localizzati a livello di tessitura muraria (la muratura non è assimilabile ad un materiale omogeneo e la rottura avviene per dislocazione) o a livello di macroelementi (le pareti sono solo accostate e non ammorsate tra loro e i solai costituiscono solo carico per alcune pareti, ma non vincolo).

Una tecnica di rinforzo che cuci insieme tali elementi è la soluzione al vasto campo di problematiche che si aprono di fronte al progettista.

Il sistema CAM risponde a molteplici di queste problematiche e presenta notevoli vantaggi sia in termini di versatilità e flessibilità, sia in termini di durabilità e reversibilità.

Il rinforzo tramite il reticolo di nastri messi in coazione permette infatti molteplici soluzioni singolari che bene si adattano alla geometria mai standardizzata dei fabbricati in muratura. Il materiale impiegato è acciaio inox ad alte prestazioni che pertanto ne garantisce la durabilità e la compatibilità chimico-fisica con qualsiasi

tipo di intonaco di finitura. Non sono necessari trattamenti e preparazioni delle superfici ed è ampiamente accettato dalle soprintendenze in quanto removibile.

È un sistema a minimo ingombro perché il componente strutturale impiegato nel consolidamento è un nastro di spessore inferiore ad 1 mm.

Lo stesso Sistema applicato agli edifici in CA, realizzando un sistema di staffature diffuse sugli elementi, permette l'attivazione del comportamento duttile a livello di struttura, gerarchizzando le rotture a favore dei meccanismi di rottura duttili (flessionali) e scongiurando i meccanismi fragili dovuti a carenze di armatura trasversale (staffe).

BIBLIOGRAFIA

- [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 multistory 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. Ponzo, 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. Ponzo, 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 CA Mediante il Sistema CAM*, 10° Convegno Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Potenza-Matera 2001.
- [11] 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.
- [12] M. Cilia, P. Colajanni, R. Marnetto, A. Recupero, N. Spinella, *Experimental tests on typical masonry of Messina area (Italy) Retrofitted with CAM: full scale Panels*, 9° international masonry conference 2014 in Guimares, 2014.
- [13] M. Cilia, P. Colajanni, R. Marnetto, A. Recupero, N. Spinella, *Experimental tests on typical masonry of Messina area (Italy) Retrofitted with CAM: a full scale arch*, 9° international masonry conference 2014 in Guimares, 2014.
- [14] 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)*.
- [15] DM 14 Gennaio 2008: “*Norme tecniche per le costruzioni*” (Testo Unico 2008).
- [16] 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*”.
- [17] CNR DT 200/2013: *Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*.
- [18] UNI EN 1993-1-4:2007 Gennaio 2007 Eurocodice 3: *Progettazione delle strutture di acciaio - Regole generali - Regole supplementari per acciai inossidabili*.
- [19] UNI EN 1998-3:2005 Agosto 2005 Eurocodice 8: *Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 3: Valutazione e adeguamento degli edifici*.
- [20] Decreto 20 Novembre 1987: *Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*.