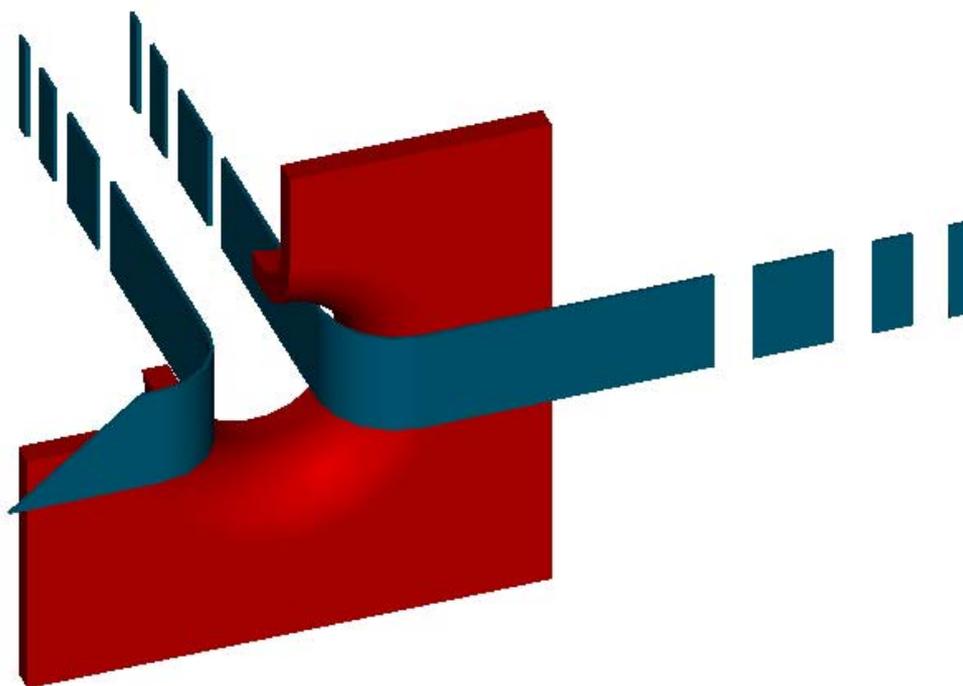


INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO STRUTTURALE E DELLA RISPOSTA SISMICA DELLE COSTRUZIONI

II RAFFORZAMENTO DELLE STRUTTURE MURARIE: IL SISTEMA DI CUCITURE ATTIVE PER LA MURATURA CAM



Novembre 2000

II RAFFORZAMENTO DELLE STRUTTURE MURARIE: IL SISTEMA DI CUCITURE ATTIVE PER LA MURATURA CAM

Mauro Dolce – Professore di Costruzioni in zona sismica, DiSGG, Università della Basilicata
Roberto Marnetto – Responsabile del settore Ricerca e Sviluppo – TIS S.p.A.

Introduzione

Il patrimonio edilizio storico italiano è, generalmente, caratterizzato da murature con caratteristiche estremamente scarse, sia per conformazione dell'apparecchio murario che per qualità della malta.



Fig. 1 – Crollo di una parete muraria a doppio paramento (Sellano, 1997).



Fig. 2 – Crollo di una parete muraria a doppio paramento (Sellano, 1997).

Quasi sempre l'apparecchio murario è caratterizzato da una struttura a doppio paramento (v. figg. 1 e 2) con collegamenti trasversali (diatoni) assenti o scarsi. Spesso si riscontrano anche importanti disomogeneità, per la presenza di rattoppi, aperture tamponate, e sconnessioni importanti anche nell'ambito della stessa parete muraria. In definitiva, la struttura muraria risulta quasi sempre caratterizzata da una bassa resistenza alle azioni orizzontali, spesso ulteriormente compromessa dalla snellezza effettiva dei singoli paramenti della stessa parete, soggetti ad azioni di compressione



Fig. 3 – Sgretolamento del paramento murario esterno al disotto del cordolo.

verticale, di taglio nel loro piano e di flessione per azioni fuori del piano. Si manifestano, per tali motivi, danni rovinosi alle murature, derivanti dall'effetto combinato delle azioni dette, quali quelli illustrati nelle figg. 1 – 4, con crolli di entrambi i paramenti (figg. 1, 2), sgretolamento e crollo del paramento esterno (fig. 3), instabilizzazione del paramento esterno, non collegato al cordolo interno ma caricato dal peso del tetto in laterocemento (fig. 4).

I principali problemi da risolvere negli interventi di rafforzamento dei vecchi edifici, oltre al ripristino collegamenti tra pareti ortogonali e tra orizzontamenti e pareti, per migliorare il comportamento scatolare d'insieme, sono, per ciò che riguarda la struttura muraria vera e propria:



Fig. 4 – Spanciamento per instabilità del paramento murario esterno.

- l'assenza o inadeguatezza di collegamenti trasversali, e dunque scarsa stabilità per carichi verticali ed elevata vulnerabilità alle azioni trasversali
- la scarsa resistenza alle azioni parallele al piano della muratura.

In questo difficile quadro di riferimento si trovano quasi sempre ad operare i progettisti degli interventi di adeguamento e miglioramento, spesso costretti ad intervenire sulle murature per aumentarne la resistenza e soddisfare così le prescrizioni di normativa sulla resistenza minima d'insieme dell'edificio. La circolare ministeriale L.L.P.P. del 10 aprile 1997, n. 65/AA.GG. (Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecnicoche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D.M. 16 gennaio 1996) prevede la possibilità di aumentare la resistenza di un elemento murario mediante "uno o più dei seguenti provvedimenti:

- breccia nella muratura
- tirantature orizzontali e verticali"

- iniezioni di miscele leganti
- applicazione di lastre in c.a. o di reti metalliche elettrosaldate e betoncino
- inserimento di pilastrini in c.a. o metallici in

Tra tali soluzioni, quella più spesso utilizzata negli interventi di adeguamento o di miglioramento effettuati negli ultimi venti anni in Italia è consistita nell'uso dell'intonaco cementizio armato con rete elettrosaldata e legature trasversali. Questo provvedimento, sicuramente valido per la semplicità e rapidità di messa in opera, presenta, però, i seguenti svantaggi:

- Le armature svolgono un ruolo passivo, e diventano efficaci solo quando la muratura subisce significative lesioni (nel piano della parete) e sconessioni (tra i paramenti o negli incroci),
- La resistenza delle armature viene sfruttata solo in parte, trovando il loro coinvolgimento un limite superiore nell'aderenza tra la muratura e l'intonaco cementizio,
- La tecnologia è estremamente invasiva, per la necessità di asportare completamente l'intonaco e sostituirlo con un intonaco del tutto estraneo alla tradizione costruttiva, e di effettuare cuciture agli incroci mediante barre in fori iniettati con malta cementizia, e la muratura perde totalmente le caratteristiche originarie,
- L'uso abituale di armature in acciaio ordinario determina una forte deperibilità dell'intervento a causa della corrosione delle armature, spesso in aderenza alla muratura, e dunque mai perfettamente avvolte da malta cementizia (particolarmente le legature trasversali),
- I collegamenti tra pannelli di rete adiacenti vengono realizzati per sovrapposizione, sovrapposizione che spesso risulta insufficiente (spesso purtroppo inesistente alla prova dei fatti), così che si creano piani di scorrimento preferenziali praticamente privi di rinforzo,
- I collegamenti tra le reti di piani successivi sono difficili da realizzare e generalmente non vengono eseguiti, per questo motivo l'intervento con intonaco cementizio produce un generico miglioramento della resistenza a taglio ma nessun miglioramento della resistenza a flessione del maschio murario,
- L'applicazione dell'intonaco cementizio armato altera in maniera non trascurabile i pesi strutturali (4 cm di intonaco armato sulle due facce della parete pesano circa 200 Kg/mq di parete, a fronte di un peso della muratura di 600-1200 Kg/mq, a seconda dello spessore),
- L'efficacia dell'intervento in corrispondenza delle intersezioni delle pareti murarie, degli innesti a T e degli angoli è praticamente nulla se non si eseguono cuciture con barre di acciaio in fori iniettati,
- L'intonaco cementizio crea problemi e difficoltà per l'esecuzione degli impianti o per la loro manutenzione, e può altresì determinare problemi di condensa sulle pareti,
- Non si conseguono significativi incrementi di duttilità della muratura, a causa dei meccanismi fragili di trasmissione degli sforzi tra muratura e armatura, e anche della scarsa duttilità della rete elettrosaldata.

L'utilizzazione delle iniezioni di miscele leganti, affascinante da un punto di vista concettuale in quanto non implica interventi invasivi sulla muratura, si scontra con una serie di problemi di controllabilità delle operazioni e dell'efficacia dell'intervento (penetrazione della miscela in tutti gli interstizi, diffusione omogenea nella massa muraria, adesione al pietrame o ai mattoni, etc.), che spesso ne compromettono il risultato finale.

La necessità di ricompattare la massa muraria, spesso caratterizzata da un apparecchio murario disordinato o a doppio paramento, con scarse o nulle connessioni trasversali, suggerisce l'idea di utilizzare un sistema tridimensionale di cuciture, capace di "impacchettare" la muratura, fornendo, eventualmente, anche un benefico stato di precompressione triassiale. Proprio su tale idea si basa il sistema CAM di Cuciture Attive per la Muratura o Cerchiaggio Attivo dei Manufatti, oggetto della presente nota.

Il sistema CAM rientra nella quarta categoria di intervento prevista nella Circolare Ministeriale sopra citata, ossia nella categoria delle "tirantature orizzontali e verticali". Esso viene realizzato interamente mediante acciaio inossidabile, così da eliminare qualsiasi problema di durabilità. I tiranti, realizzati con nastri di acciaio, sono pretesati, così da applicare uno stato di precompressione trasversale, particolarmente importante in direzione trasversale. Grazie agli speciali elementi di connessione, i nastri d'acciaio realizzano un sistema continuo di tirantatura, in grado di ripercorrere tutte le irregolarità della muratura, sia in orizzontale, lungo tutta la parete rinforzata, che verticale,

per tutta l'altezza, così da migliorare non solo la resistenza a taglio, ma anche la resistenza flessionale dei singoli maschi murari e delle pareti nel loro insieme.

Del sistema CAM vengono illustrate di seguito le caratteristiche principali e le potenzialità applicative, le modalità di messa in opera, le valutazioni quantitative della sua efficienza in termini generali e rispetto a un esempio di applicazione, di cui vengono, infine, riportate e commentate le immagini più significative.

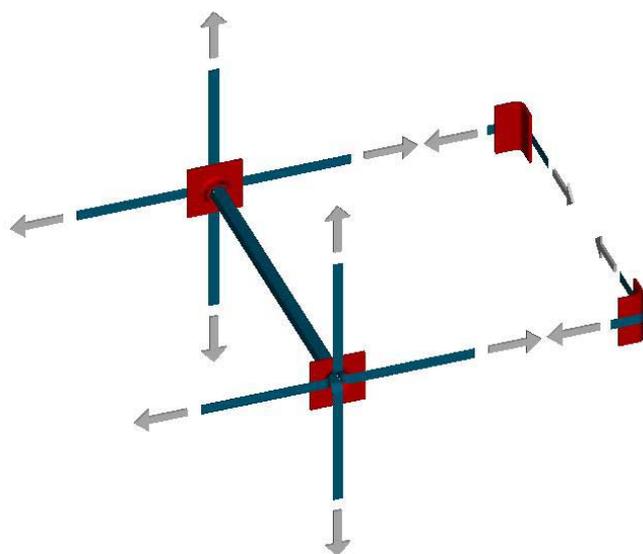


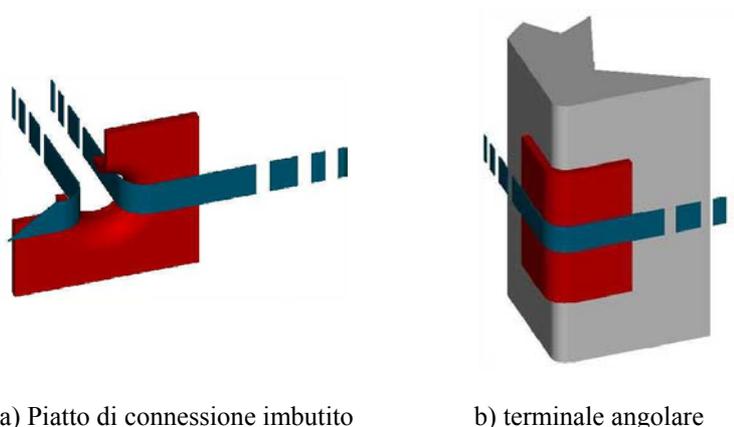
Fig. 5 – CAM – disposizione base.

Caratteristiche del sistema CAM per il rafforzamento delle murature

Il sistema CAM è realizzato con nastri in acciaio inox, di spessore 0.75-0.8 mm e larghezza di 18-20 mm, le cui caratteristiche di resistenza a snervamento e a rottura sono pari a 250-300 e 600-700 Mpa rispettivamente, con allungamento a rottura pari a più del 40%. I nastri vengono utilizzati per cucire la muratura attraverso due fori a distanza normalmente compresa tra i 100 e i 200 cm, richiudendo la singola fascetta ad anello mediante una macchina capace di imprimere una pretensione regolabile al nastro, e dunque una precompressione nella muratura, sia

trasversale che complanare alla parete trattata (v. fig. 5). Il sistema comprende anche piastre di dimensioni circa 125x125 mm anch'esse in acciaio inox, dotate di fori conformati ad imbuto, disposte all'imboccatura del foro (v. fig. 6). Tali piastre svolgono una funzione di distribuzione delle forze di contatto del nastro, altrimenti concentrate nella muratura intorno al foro stesso, e di assorbimento delle tensioni di trazione prodotte nella muratura intorno al foro da due avvolgimenti contigui. Il sistema è infine completato da angolari, ancora in acciaio inox, per gli avvolgimenti dei nastri in corrispondenza delle aperture o delle zone terminali delle pareti (angoli, incroci a L e a T).

Il sistema di nastri di acciaio inox può essere posto in opera secondo maglie quadrate, rettangolari o triangolari, anche irregolari, con la massima flessibilità, così da realizzare un'imbracatura continua di tutta la parete, sia in orizzontale che in verticale. Nella fig. 7 è riportata una tipica applicazione su una parete a doppio paramento con disposizione dei fori a quinconce, così da minimizzare il numero di fori e realizzare una maglia ortogonale. La messa in opera dei nastri di acciaio può essere, eventualmente, completata con l'iniezione della muratura attraverso i fori praticati per il passaggio dei nastri stessi, iniezione che, grazie all'inossidabilità dell'acciaio, può essere effettuata anche con miscele leganti non cementizie. Si ottiene in tal modo un



a) Piatto di connessione imbutito

b) terminale angolare

Fig. 6 – Elementi base del sistema CAM.

Il sistema di nastri di acciaio inox può essere posto in opera secondo maglie quadrate, rettangolari o triangolari, anche irregolari, con la massima flessibilità, così da realizzare un'imbracatura continua di tutta la parete, sia in orizzontale che in verticale. Nella fig. 7 è riportata una tipica applicazione su una parete a doppio paramento con disposizione dei fori a quinconce, così da minimizzare il numero di fori e realizzare una maglia ortogonale. La messa in opera dei nastri di acciaio può essere, eventualmente, completata con l'iniezione della muratura attraverso i fori praticati per il passaggio dei nastri stessi, iniezione che, grazie all'inossidabilità dell'acciaio, può essere effettuata anche con miscele leganti non cementizie. Si ottiene in tal modo un

rafforzamento della muratura nella zona circostante il foro, che migliora la funzione di presidio rispetto allo sfaldamento dei paramenti nelle zone limitrofe più lontane dalla zona di applicazione della precompressione.

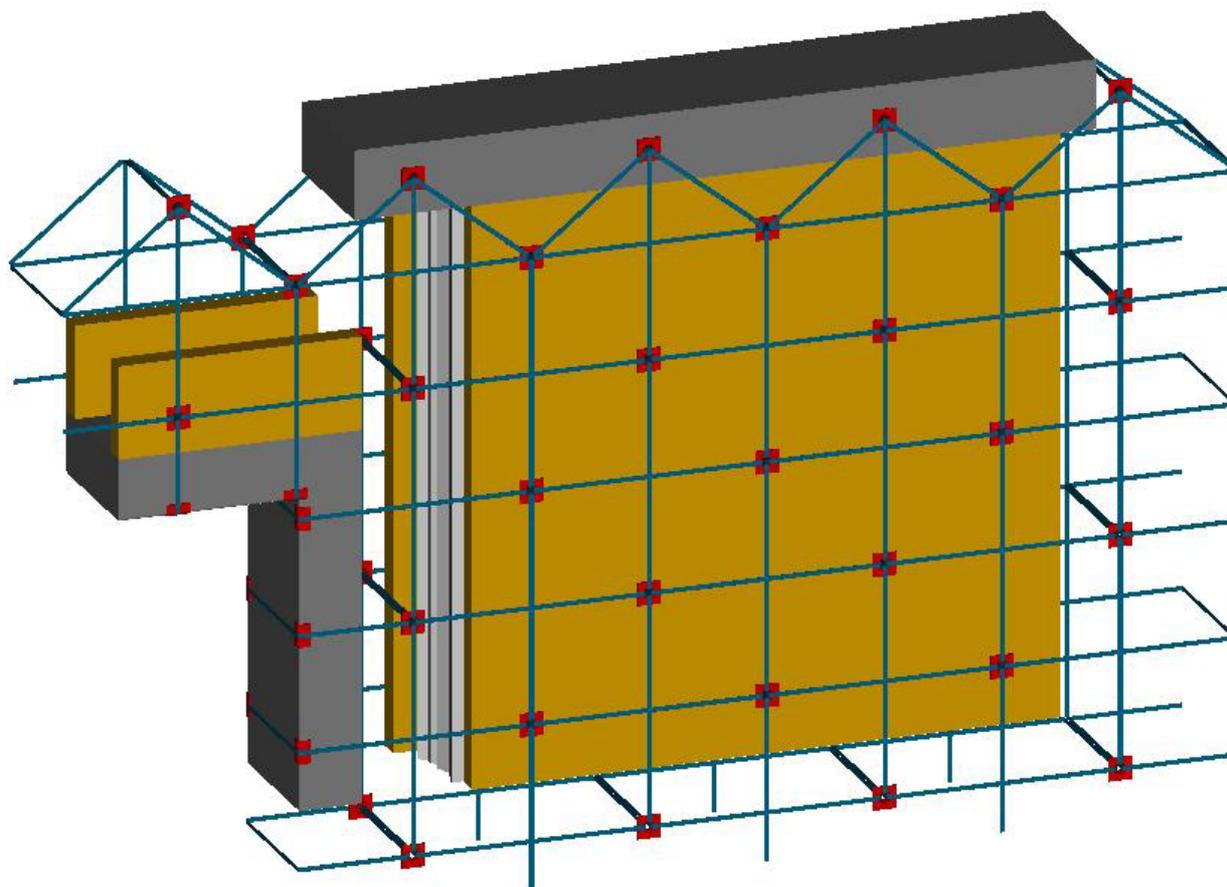


Fig. 7 – Tipica disposizione del sistema CAM per una parete con apertura e cordolo sovrastante.

I vantaggi conseguibili con il sistema CAM sono i seguenti:

- I nastri di acciaio inox svolgono un ruolo attivo, imprimendo alla muratura un benefico stato di precompressione, sia nel piano della parete, orizzontalmente e verticalmente, sia in direzione trasversale, collegando efficacemente i paramenti dell'apparecchio murario; questo stato di precompressione ritarda la formazione di lesioni e fessure e rende le armature immediatamente attive e capaci di impedire o limitare significativamente la formazione di grandi lesioni e di sconnessioni,
- La resistenza delle armature viene sfruttata integralmente, non essendo il loro coinvolgimento legato all'aderenza tra la muratura e l'intonaco cementizio, ma, al contrario, ad un collegamento meccanico totalmente controllabile,
- La tecnologia è poco invasiva (la rimozione dei nastri richiede solo l'asportazione dell'intonaco (non più cementizio),
- L'acciaio inox garantisce la totale affidabilità nel tempo del sistema,
- L'efficacia delle legature trasversali, garantita dai collegamenti meccanici e dalla pretensione dei nastri di acciaio, permette di ridurre il loro numero, e conseguentemente il numero di perforazioni da effettuare sulla muratura, riducendo l'invasività dell'intervento,
- I collegamenti tra avvolgimenti adiacenti è assicurato meccanicamente in maniera totalmente controllabile ed affidabile,

- I collegamenti in verticale tra le pareti di piani successivi sono facili da realizzare (anche senza la demolizione del solaio, è sufficiente praticare fori di diametro di circa 30mm in adiacenza alla parete) e sicuri nel risultato; si realizza così un sensibile miglioramento delle caratteristiche di resistenza a flessione sia nel piano dei maschi murari che nel piano ortogonale,
- Il piccolo spessore dei nastri inox permette l'adozione di intonaci tradizionali, negli spessori usuali, così da non alterare i pesi strutturali,
- Il sistema di cucitura risolve automaticamente anche il problema delle connessioni, spesso carenti, tra pareti ortogonali,
- La conservazione degli intonaci tradizionali elimina le problematiche create dall'uso degli intonaci cementizi, indispensabili nelle applicazioni delle reti elettrosaldate,
- L'utilizzazione dell'acciaio inox garantisce una buona duttilità d'insieme, chiamando in causa le riserve di sicurezza nelle condizioni limite di lavoro della struttura.

Il sistema CAM trova altre utili applicazioni nel campo delle strutture murarie grazie alla sua capacità di collegare efficacemente elementi diversi, senza giochi, ma anzi applicando una presollecitazione agli elementi collegati. Le possibili ulteriori applicazioni sono di seguito elencate.

1) Realizzazione di catene binate orizzontali anche nel caso di muri non rettilinei.

Per realizzare la portanza di 2 $\phi 12$, occorrono circa 20 nastri. Sovrapponendoli in numero di 5 per ogni avvolgimento (spessore totale di 4 mm), occorrono 2 fasce di nastri inseriti in fori ad interasse 150-200 mm, per un ingombro in verticale di 300 mm, uno spessore di 4 mm per le strisce e 5-6 mm per le piastre di trasmissione degli sforzi e gli angolari. Dunque tutto rientra facilmente nello spessore dell'intonaco, e si evitano così le dispendiose e nocive tracce e nicchie nei muri per occultare le barre e le piastre di ancoraggio (spessori dell'ordine dei 30-50 mm almeno). Il sistema CAM permette inoltre di seguire facilmente gli andamenti non rettilinei dei muri, utilizzando avvolgimenti in successione, tra loro collegati in corrispondenza dei fori praticati trasversalmente nei muri, grazie alle speciali piastre imbutite.

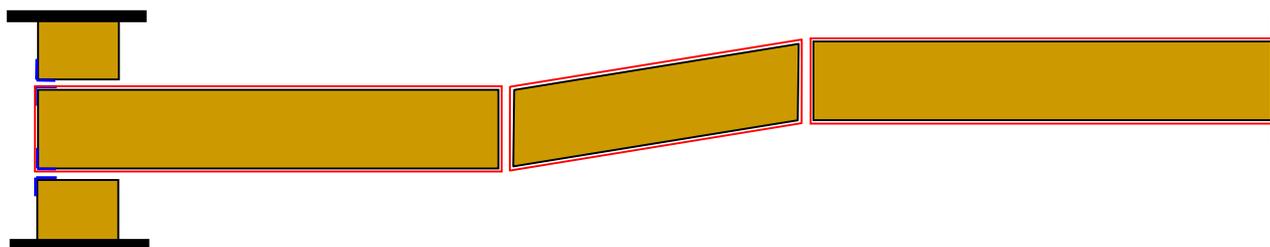


Fig. 8 – Disposizione in pianta di una catena realizzata con il sistema CAM che segue le irregolarità geometriche della parete.

Per specializzare il sistema a questo tipo di applicazione si possono realizzare delle piastre a imbutimento multiplo, eventualmente maggiorandone le dimensioni (larghezza e spessore).

Si conseguono in generale i seguenti vantaggi:

- a) Minimo ingombro: non sono necessarie tracce e nicchie nei muri
- b) Rapidità di posa in opera
- c) Possibilità di seguire gli andamenti non rettilinei nella muratura
- d) Maggiore sicurezza (elevata duttilità e ridondanza, alta resistenza alla corrosione)



a) catena CAM

b) passaggio di impianti

c) terminali con angolari

Fig. 9 – Applicazione del CAM per catene in un edificio in via Tito Livio a Roma di uno degli autori

- e) Migliore diffusione degli sforzi
- f) Facile applicazione della presollecitazione
- g) Semplicità nelle giunzioni
- h) Facilità di aggiramento, all'interno o all'esterno, di tubazioni di impianti tecnologici.

In fig. 9 è mostrato un esempio di applicazione del sistema CAM per la realizzazione di una serie di catene presollecitate in un edificio in via Tito Livio a Roma, dove risiede uno degli autori. L'intervento si era reso necessario a causa della progressiva apertura di lesioni prodotte da un cedimento di fondazione.

2) Cerchiatura di colonne in muratura o anche in c.a.

Il classico intervento di cerchiatura mediante angolari e calastrelli su colonne in muratura o in c.a. può essere efficacemente sostituito dal sistema CAM, con angolari e strisce in acciaio inox. L'effetto di contenimento viene meglio distribuito, potendo utilizzare un numero elevato di strisce (ad esempio a distanza di 100 mm). Gli spessori sono estremamente ridotti e riconducibili agli spessori degli angolari (5-8 mm). L'effetto di presollecitazione rende il cerchiaggio immediatamente efficiente. Nel complesso si ottengono i seguenti vantaggi:

- a) Minimo ingombro l'intervento rientra nell'intonaco (spessori complessivi dell'ordine dei 6-8 mm)
- b) Massima efficacia grazie alla presollecitazione applicata e alla possibilità di distribuire gli sforzi quanto si vuole
- c) Rapidità di posa in opera
- d) Maggiore sicurezza (elevata duttilità e ridondanza, alta resistenza alla corrosione)

3) Collegamento di elementi strutturali in legno, c.a. o acciaio alla muratura

Gli elementi in legno (travi di solaio), in c.a. (travi, cordoli) o in acciaio (travi di solaio, travi principali), che spesso richiedono anche, piastre di ancoraggio, fori per l'ancoraggio di barre di collegamento, etc., possono essere agevolmente collegati mediante il sistema CAM. Il collegamento viene realizzato praticando uno o più fori nell'elemento da collegare, nel quale vengono fatte passare due o più strisce di acciaio, e due fori nella muratura. La ripartizione degli sforzi, particolarmente negli elementi in legno può avvenire mediante appositi tubi in acciaio inox inseriti nei fori, mentre nella muratura si utilizzano le piastre imbutite.

Questo tipo di intervento presenta i seguenti vantaggi:

- a) Minimo ingombro: l'intervento rientra nell'intonaco (spessori complessivi dell'ordine dei 6-8 mm)
- b) Massima efficacia grazie alla presollecitazione
- c) Rapidità di esecuzione
- d) Maggiore sicurezza (elevata duttilità, resistenza alla corrosione, collegamento meccanico)

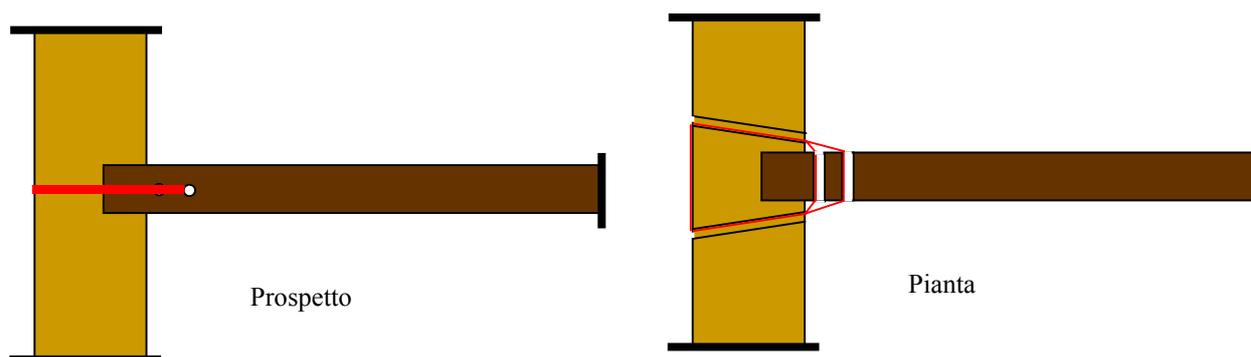


Fig. 10 – Schema di collegamento di trave in legno con la parete muraria.

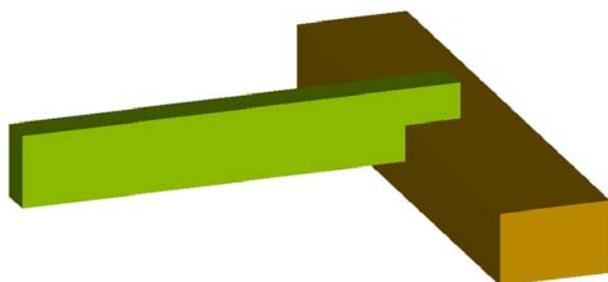


Fig. 11 – vista assonometrica collegamento convenzionale di una trave su mro

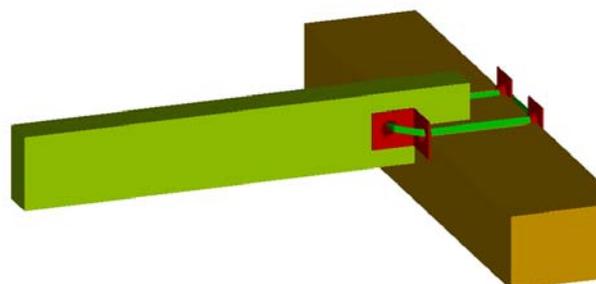


Fig. 12 – vista assonometrica del collegamento mediante CAM. La trave diventa elemento di incatenamento tra i due paramenti contrapposti



Foto 1: preparazione di una parete con presentazione degli elementi imbutiti e degli angolari.



Foto 2: disposizione delle maglie su preparazione per tracce, senza rimozione completa dell'intonaco.

Le operazioni di presentazione dei nastri sono di facile attuazione e, solitamente, vengono completate per campi, prima di passare alla fase successiva di tesatura e chiusura delle maglie (foto 4).

Procedura di intervento. Un esempio di applicazione.

Nel descrivere la procedura di intervento e gli aspetti peculiari del sistema CAM si fa riferimento alla applicazione condotta per il recupero strutturale di un edificio in località Sigillo (PG).

Lì ove la conservazione degli intonaci non lo ha consentito, questi sono stati rimossi portando alla luce l'apparecchio murario. E' da tener presente che tale operazione non è strettamente necessaria (vd. foto 2); per il buon esito dell'applicazione, infatti, è sufficiente anche ricorrere alla realizzazione di semplici tracce al pari di quanto avviene per la posa degli impianti.

La preparazione delle superfici, per rimozione dell'intonaco o per realizzazione delle tracce deve essere finalizzata a consentire un percorso lineare il più aderente possibile alla muratura, evitando che si verifichino contatti specialmente se puntuali od eccessivamente localizzati.

Importante è il corretto allettamento degli elementi imbutiti e degli angolari di spigolo. Da tale operazione infatti dipende l'efficace ripartizione della risultante di compressione ortogonale alla parete, sulla muratura a questi adiacente.

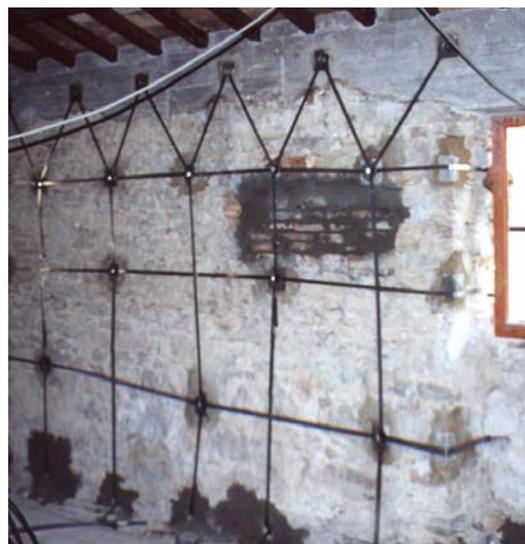


Foto 3: disposizione delle maglie su parete con intonaco completamente rimosso.

Le operazioni di tesatura avvengono mediante l'uso di una specifica macchina automatica a regolazione pneumatica del carico, in grado di garantire uniformità al livello di trazione delle fasce e, nella loro successione, alla cucitura della parete nel suo sviluppo. Questo comporta la realizzazione di un diffuso stato di precompressione triassiale con tutti i conseguenti benefici già presentati.



Foto 4: presentazione per campo di parete delle fascette attraverso le forature di cucitura e collegamento

La flessibilità del sistema lo rende particolarmente efficace nello specializzare il tipo di collegamento che si vuole realizzare tra i vari elementi di apparecchiamento strutturale. In particolare, come si può rilevare dalle foto 3, 5 e 6, risulta particolarmente efficace nella legatura del cordolo alla muratura sottostante. Si realizza in questo modo, con legature a 45°, un collegamento in grado di contrastare quel fenomeno frequente di distacco del cordolo sotto sisma, con conseguente scivolamento dello stesso.



Foto 6: disposizione delle maglie in corrispondenza della legatura del cordolo di sottotetto.



Foto 5: Particolare del collegamento del cordolo di sottotetto e andamento della maglia orizzontale in corrispondenza del vano finestra.

Allo stesso modo, lì ove se ne ravvisi la necessità, l'orditura a maglia retta può essere



Foto 7: disposizione per maglie inclinate, su traccia.

convenientemente sostituita, o integrata, con una inclinata (foto 7).

Particolari situazioni di precarietà strutturale trovano poi una felice soluzione, senza che ciò comporti la perdita della testimonianza strutturale legata al contesto, consentendo altresì la piena lettura dell'organismo originario. Una efficace testimonianza è rappresentata dalla foto 8, dove è riportato l'intervento di rinforzo di un architrave in legno contestualmente alla precompressione della muratura.



Foto 8: legatura e rinforzo nella zona di architrave di un vano finestra, senza sostituzione dello stesso.

Altrettanto importante è la possibilità di legare efficacemente tra loro le pareti convergenti in corrispondenza dell'intersezione (foto 10).



Foto 10: particolare del collegamento di due pareti convergenti con ripartitori d'angolo e elementi imbutiti. Da notare lo sfalsamento dei livelli di legatura.

Di particolare rilevanza risulta poi la possibilità che il sistema consente di dare agevolmente continuità verticale alle legature stesse, come è possibile riscontrare nella foto 9. Questo aspetto riveste un ruolo strutturale importantissimo in quanto conferisce, in modo uniforme e controllato, una capacità portante a flessione anche fuori del piano della parete.



Foto 9: vista dell'intradosso di un solaio con evidenza del collegamento verticale tra la parete sottostante e quella di spiccato.

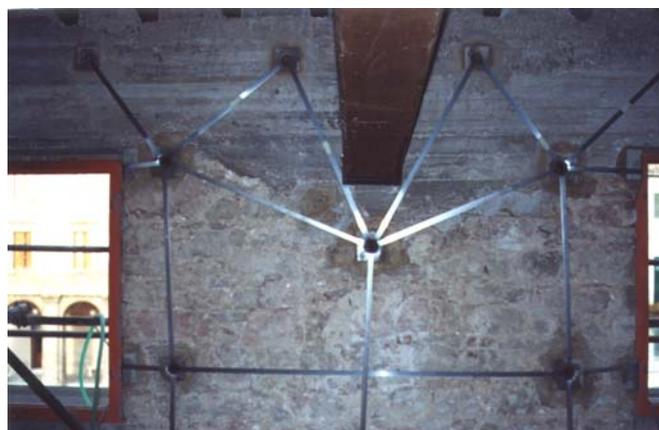


Foto 12: particolare della legatura del cordolo in corrispondenza della capriata principale.

La flessibilità del sistema nel superare situazioni di complicata geometria e disposizione appare evidente nella foto 12, dove è facile intuire sia il ruolo di legatura nei confronti del cordolo che quello di legatura dell'apparecchio murario.

Nelle successive foto 13 e 14 sono riportate due ulteriori viste dall'interno dell'intervento. Si può



Foto 13: si apprezza la posa lungo le tracce d'intonaco con continuità verticale del collegamento.



Foto 14: si apprezza la posa lungo le tracce d'intonaco con continuità verticale del collegamento fino al cordolo

apprezzare la continuità delle legature lungo lo sviluppo verticale, passando per i piani intermedi (foto 13), fino ad arrivare in sommità alla legatura del cordolo (foto 14).