

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

Roberto Marnetto – Responsabile del settore Ricerca e Sviluppo – TIS S.p.A. Roma  
([www.tis.it](http://www.tis.it) - e.mail: [r.marnetto@tis.it](mailto:r.marnetto@tis.it))

### Premessa

Nella statica delle strutture in muratura, per il corretto progetto di un generico intervento di consolidamento, sia rispetto ai carichi verticali, sia, a maggior ragione, se riferito ai carichi derivanti da un evento sismico, assume un ruolo particolarmente importante la comprensione della gerarchia dei meccanismi di collasso. In tali strutture, infatti, questa risulta essere assai più articolata che non in quelle in c.a.

Se in queste ultime la resistenza globale è legata essenzialmente ad un corretto dimensionamento delle sezioni ed alla impostazione strutturale, nelle prime, le strutture murarie, meccanismi di collasso di livello assai inferiore possono condizionare la stabilità globale.

Fatti fortemente locali, infatti, intervengono sull'affidabilità strutturale assai prima di scomodare il concetto della resistenza dei materiali costituenti od il dimensionamento degli elementi strutturali o l'articolazione strutturale.

Dando per scontato il sufficiente dimensionamento degli elementi portanti (altrimenti la struttura non potrebbe esistere), la gerarchia delle cause di collasso, a partire dai gradini più bassi, ovvero più condizionanti, può articolarsi secondo la seguente scaletta:

- 1 forma degli elementi lapidei;
- 2 tessitura muraria;
- 3 continuità strutturale;
- 4 articolazione strutturale;
- 5 resistenza dei materiali;

Prima di ricorrere alla *resistenza*, intesa come capacità del materiale di opporre una sufficiente reazione ad un'azione esterna, che vediamo comparire in ultima posizione, dobbiamo quindi fare riferimento all'*equilibrio*.

Ciò che si deve sottolineare è che le accezioni 'equilibrio' e 'resistenza' si spingono nella struttura muraria a livello decisamente *puntuale* in quanto il materiale costituente 'muratura', nel suo complesso, deve considerarsi quale aggregato di sottostrutture elementari.

Come detto il concetto di 'equilibrio' (meccanica dei corpi rigidi), viene prima del concetto di 'resistenza' (elasticità dei materiali) ed ha priorità, nella scala delle gerarchie di collasso, tra gli aspetti condizionanti la stabilità. Tale sequenza dipende anche dal fatto che nella muratura non si può fare riferimento alla resistenza a trazione.

Per spiegare tale gerarchia basta analizzare in successione il ruolo dei vari aspetti sopra elencati. Tale operazione ci tornerà quindi utile per meglio inquadrare come operare per il corretto consolidamento/miglioramento strutturale.

### 1) LA FORMA DEGLI ELEMENTI LAPIDEI

Una muratura di ciottolame di fiume, *stondato*, deve la sua portanza alla capacità di mantenere in posizione i vari elementi lapidei consentendo loro il trasferimento del carico attraverso i vari 'punti' di contatto. Ora, anche nella ipotesi della più accurata fattura dell'apparecchio murario, è chiaro che è più probabile un cedimento-collasso per espulsione di ciottolame in rapida successione, dovuto a dislocazione interna dei ciottoli stessi, che non per superamento della resistenza dei singoli elementi (*negli innumerevoli contatti puntuali tra superfici curve è prevedibile una forte presenza di componenti orizzontali, oltre a sollecitazioni ribaltanti conseguenti al loro non perfetto allineamento secondo la verticale*).

Ovvero tutto è condizionato alla capacità del legante di assorbire le componenti di carico 'espulsive'. E dato che il legante può genericamente considerarsi di scarsa qualità, almeno rispetto alla resistenza e rigidità dei ciottoli, oltre che sostanzialmente incapace di resistenza a trazione, ecco che la stabilità complessiva dipende, prima di tutto, dalla mutua posizione tra i vari elementi

lapidei, i quali, in contatto solo per punti appartenenti a superfici curve, risultano essere in equilibrio precario. (figg.1 e 2)

L'estremo opposto al ciottolo di fiume è l'elemento lapideo di forma squadrata. In questo caso, per quanto l'apparecchiamento murario possa non essere ottimale, è facile riconoscere che il carico si trasferisce comunque nel contatto tra superfici, con un immediato beneficio in termini di stabilità ed equilibrio, al punto che è facilmente ipotizzabile che, per il collasso, possa essere necessario superare la resistenza del materiale, in un certo senso anche indipendentemente dalla resistenza del legante (muratura in pietrame squadrato, regolare e ben connesso).

## 2) LA TESSITURA MURARIA

Tralasciamo di considerare la tessitura 'caotica' in ciottolame di fiume, intrinsecamente inaffidabile per quanto detto precedentemente.

Qualora si sia in presenza di pietrame squadrato, se la tessitura non è bene organizzata [es. parete a doppio paramento senza elementi trasversali di collegamento (diatoni)] si può avere il collasso ben prima di attingere alla resistenza dei materiali (sia malta, che pietra) semplicemente per perdita di equilibrio sotto carichi che solo apparentemente si possono considerare afferenti all'intera sezione. Nella realtà, invece, essi agiscono con forte eccentricità, magari solo su uno spessore ridotto di muratura (travi di solaio che gravano solo sul paramento interno), quindi su corpi portanti effettivamente molto snelli rispetto alle apparenze, attivando in questo modo componenti fortemente destabilizzanti. (figg. 3 e 4)

## 3) LA CONTINUITA' STRUTTURALE

E' chiaro che, in caso di elementi squadrati e ben organizzati (sezione resistente di riferimento coincidente con l'effettivo spessore murario) la stabilità ai carichi verticali può considerarsi ottimale e quindi il fattore successivamente condizionante, coincidente con la resistenza ultima possibile, diventa la resistenza dei materiali.

Spesso però, anche in murature nate regolari e ben ordinate, viene a mancare il concetto di continuità per i diffusi rimeneggiamenti che possono aver subito nel tempo, presentando rattoppi, chiusure dei vani originari e aperture di altri, materiali di reintegro fortemente diversi, ..., con conseguente perdita del funzionamento concepito inizialmente.

In una visione più ampia poi, nei confronti delle azioni orizzontali (sismiche) può invece essere condizionante, pur in presenza di murature ben fatte, la mancanza o meno di effettiva continuità con le pareti ortogonali, da cui dipende molto la stabilità al ribaltamento per azioni fuori dal piano (ortogonali). (fig. 5)

Nell'ambito della continuità strutturale possiamo inserire, inoltre, anche il corretto ammorsamento dei solai nelle pareti, lì ove risulta opportuno, se non necessario, che non si abbia mai lo sfilamento delle travi, cui consegue sia il collasso dei solai, con perdita del comportamento scatolare, che la non meno dannosa azione di sfondamento sulle pareti. (fig. 6)

## 4) L'ARTICOLAZIONE STRUTTURALE

Tale aspetto può considerarsi in posizione equivalente a quello precedente, in quanto anche in presenza di una eccellente continuità strutturale, una errata articolazione degli elementi strutturali, in distribuzione e sviluppo (campi di parete eccessivamente lunghi, maschi murari eccessivamente snelli, eccessiva distanza tra centro delle masse e delle rigidezze, pareti in falso, solai affiancati a quote diverse, ...) può considerarsi elemento critico capace di indurre il collasso ancora per dislocazione degli elementi resistenti, prima che per superamento delle capacità portanti dei materiali. (figg. 7 e 8)

### **Obiettivo ideale**

Per quanto premesso risulta chiaro che la massima capacità portante, in senso lato, di una struttura in muratura la si conferisce perseguendo l'affidabilità dell'apparecchio murario (compattazione della tessitura muraria → impedimento della dislocazione degli elementi lapidei → coinvolgimento della loro resistenza), contestualmente al coinvolgimento di quanti più elementi strutturali possibile (collegamento strutturale → comportamento a scatola) e alla uniforme ripartizione delle azioni su questi (ricerca della coincidenza dei centri di massa e di rigidezza)

## Le tecnologie disponibili per il consolidamento/miglioramento strutturale

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 tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D.M. 16 gennaio 1996), così come la recente ordinanza 3274 e successive modificazioni, prevede la possibilità di aumentare la resistenza di un elemento murario mediante "uno o più dei seguenti provvedimenti:

- iniezioni di miscele leganti
- applicazione di lastre in c.a. o di reti metalliche elettrosaldate e betoncino
- inserimento di pilastri in c.a. o metallici in breccia nella muratura
- tirature orizzontali e verticali"

Nell'ambito di tali strategie si trovano tecnologie 'tradizionali' ed altre che solo recentemente si sono affacciate sul mercato, quali:

- l'applicazione dei materiali compositi;
- il sistema CAM (o delle Cuciture Attive delle Manufatti).

Tra le varie 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 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 sconnessioni (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 o comunque ne sviliscono grandemente l'efficacia teorica.

Assai valide si sono rivelate sempre le applicazioni di **tirantature**. Capaci di perseguire un buon comportamento scatolare delle strutture, sebbene attraverso una forte localizzazione delle azioni e spesso ingenerando delle eccentricità dovute al percorso delle legature stesse, esterne alle pareti e mai in asse a queste, per ovvi motivi di praticabilità degli interventi.

L'applicazione dei **materiali compositi fibrorinforzati**, il più delle volte in forma di teli o fasce applicate sulle pareti, vede il limite dell'efficacia ridotto da fattori tra i quali i principali sono:

- l'affidabilità dell'intervento, di fatto è condizionata dai limiti dell'interfaccia tra materiale applicato e muratura esistente;
- la forte differenza di caratteristiche meccaniche (resistenza e deformabilità), lo rendono scarsamente compatibile per una ottimale collaborazione;
- la scarsa duttilità del sistema finale;
- non consente interventi efficaci di ricompattazione muraria se non nei casi di cerchiaggio/confinamento di maschi murari e solo se a pianta convessa o quantomeno prossima al quadrato.

### **Il metodo CAM (o delle Cuciture Attive delle Murature)**

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 *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”, ovvero quei sottosistemi strutturali costituiti da gabbie in forma di parallelepipedo, realizzate in rete metallica, nelle quali vengono ordinati a secco elementi lapidei spesso solo grossolanamente squadri (fig. 9). Essi sono comunemente usati per realizzare pareti di contenimento, anche di notevoli dimensioni, mostrando buone capacità portanti. 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, 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 (opposizione alla dislocazione → attivazione della resistenza).

La ulteriore possibilità che tale legatura possa risultare continua su tutto lo sviluppo del manufatto, piuttosto che discreta come nel caso reale dei “gabbioni”, consente di massimizzare l'efficacia in quanto conferisce capacità portanti a trazione al manufatto murario a guisa delle murature armate.

Proprio su tali aspetti si basa il sistema CAM di Cuciture Attive per la Muratura o Cerchiaggio Attivo dei Manufatti, oggetto della presente nota.

### **Presentazione del sistema CAM**

Il sistema CAM rientra nella categoria delle “tirantature orizzontali e verticali” ed è caratterizzato dai seguenti aspetti peculiari:

persegue uno stato di coazione triassiale diffuso all'interno di un generico manufatto rispetto al quale viene distribuito a formare un reticolo tridimensionale che lo contiene, ovvero che lo attraversa, realizzato per successione di avvolgimenti singolarmente chiusi in forza su se stessi.

#### **- ELEMENTI BASE (fig.10):**

- **nastro in acciaio** (inossidabile per gli interventi sulle murature, ad alta resistenza al carbonio per gli interventi di cerchiaggio dei pilastri in c.a.); è l'elemento attraverso il quale si realizzano le singole “cuciture” pretese di contenimento al generico volume di materiale;
- **elementi intermedi diffusori di carico e di continuità meccanica**: sono i piatti imbutiti posti nei punti di raccordo delle cuciture distribuite nel campo della muratura, finalizzati ad evitare che l'azione indotta dalla pretensione dei nastri agisca attraverso questi direttamente sul materiale di supporto (muratura), ciò sia richiudendone le forze complanari, in

corrispondenza del foro, che ripartendone il carico ortogonale su una superficie di appoggio sufficientemente ampia;

- **elementi d'angolo diffusori di carico:** sono elementi angolari da porsi in corrispondenza degli spigoli, negli avvolgimenti di bordo, al fine di ripartire il carico della risultante che agisce a 45° su una superficie di appoggio sufficientemente ampia.

**- LO SCHEMA STATICO DI RIFERIMENTO:**

- il singolo avvolgimento, in virtù della pretensione, agisce con una forza di trazione costante lungo i suoi bracci (fig. 11/a);
- ciò si traduce in una azione complanare alla parete su ogni faccia ed in un'azione ortogonale, di collegamento, ortogonale tra le due superfici murarie esterne: le quattro risultanti sugli spigoli giacciono nel piano dell'avvolgimento ed operano in modo da compattare lo spessore d'influenza;
- nella successione di due avvolgimenti complanari si dà continuità, nel piano, all'azione di legatura (effetto incatenamento-staffatura) con risultante baricentrica rispetto allo spessore della parete (a differenza di quanto avviene con gli incatenamenti convenzionali che solitamente corrono eccentrici su un lato della parete); la presenza, in successione continua, dei nastri lungo la pelle della parete realizza anche una efficace armatura 'flessionale' in grado di dare un utilissimo contributo nella resistenza alle azioni fuori dal piano in entrambi i versi; inoltre, in funzione della distanza dei fori trasversali, si replica, raddoppiandosi, per ogni foro l'azione di contrasto al meccanismo di collasso per esplosione trasversale della muratura;
- la composizione con le legature verticali (figg. 11/b e c) comporta che in ogni foro si replica, quadruplicandosi, l'azione di contrasto al meccanismo di collasso per esplosione trasversale della muratura; la presenza, in successione continua, dei nastri verticali lungo la pelle della parete realizza anche una efficace armatura 'flessionale' in grado di dare un utilissimo contributo nella resistenza alle azioni fuori dal piano in entrambi i versi; analogamente al contributo delle legature orizzontali, anche quelle verticali concorrono, come staffatura, a conferire incremento alla resistenza alle azioni taglianti di origine sismica che agiscono nel piano della parete;
- l'effetto finale (fig. 11/d) che ne consegue nella realizzazione del reticolo tridimensionale è anche l'effetto di compattazione triassiale sul generico volume murario, con l'ulteriore beneficio di una maggiore portanza sia nei confronti delle azioni di compressione (confinamento), che di taglio (migliore ingranamento degli elementi costituenti).
- A completamento della presentazione dello schema statico di riferimento va poi detto che l'azione indotta dal generico reticolo può essere dimensionata in funzione del numero di sovrapposizioni per ogni singolo avvolgimento ( $\leq 3$  nei reticoli di parete;  $\leq 5$  negli avvolgimenti di incatenamento);
- questo stato di precompressione ritarda la formazione di lesioni e fessure (ovvero richiede un'azione esterna di livello superiore per lo stesso livello di danno → miglioramento) e vede nelle armature un valido presidio nel contrastare la formazione di grandi lesioni e delle conseguenti sconessioni (fig. 12).

**- ASPETTI E VANTAGGI ACCESSORI:**

- il sistema è intrinsecamente modulabile e aperto; modulabile sta a significare la possibilità di ottimizzarne l'uso aumentando o diminuendo il numero delle legature in funzione delle richieste locali; aperto nel senso che la disposizione delle maglie, gli interassi di reticolo ed il percorso stesso delle legature può essere definito e specializzato a piacere in funzione delle particolari esigenze puntuali (fig. 13);
- ne discende la possibilità di seguire lo sviluppo delle pareti anche quando questo non fosse rettilineo, pur conseguendo la stessa efficacia di incatenamento/consolidamento (fig. 14);
- lo stato di presollecitazione del nastro di acciaio comporta che il contributo della resistenza a trazione di questo sia subito attivo fin dai valori più bassi di incremento di sollecitazione nella muratura (in presenza di armatura 'scarica' è necessario invece che ulteriori cedimenti/spostamenti siano necessari per chiamare in causa il contributo resistente significativo di questa);
- 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;

- non vi è incremento di peso e quindi di massa 'sismica';
- l'apparecchio murario conserva inalterata la sua 'natura'; il rinforzo agisce in modo discreto, non contiene-nasconde l'apparecchio murario, concorre con esso senza sostituirsi a questo, ne conserva completamente le sue peculiarità (ruolo portante, traspirabilità, accessibilità, testimonianza costruttiva) (fig. 15);
- a meno delle forature, il sistema è completamente reversibile;
- il numero delle forature è limitato ad interassi che possono variare solitamente da 100 a 200 cm convenientemente posti a quinconce (maglia conseguente 50÷100 cm);
- 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 la possibilità di reintegrare la continuità muraria specialmente in quelle situazioni in cui appaia particolarmente evidente la presenza di vuoti; l'effetto di imbibizione è inoltre reso particolarmente efficace dal numero dei fori, dalla loro dimensione ( $\varnothing$  35 mm) e dal fatto che sono a tutto spessore assicurando una ottimale permeazione del legante;
- la **posa in opera** presenta vari aspetti positivi:
  - non è richiesta nessuna preparazione delle superfici, in quanto l'azione di rinforzo, come già detto non interviene per aderenza, ma è conseguente ad un collegamento meccanico (fig. 16/a);
  - non vanno rimossi gli impianti ed anzi essi rimangono pienamente accessibili, interferendo il passaggio delle legature solo puntualmente, peraltro senza che ci debba essere contatto (fig. 16/b);
  - l'asportazione dell'intonaco, qualora in buono stato, può essere limitato alla sola realizzazione delle tracce lungo il percorso delle legature (fig. 16/c);
  - il piccolo spessore dei nastri e la loro qualità (inox) permette l'adozione di intonaci tradizionali, negli spessori usuali, così da non alterare i pesi strutturali;
  - 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 30 mm in adiacenza alla parete) e sicuri nel risultato; come già detto si realizza così un sensibile miglioramento delle caratteristiche di resistenza a flessione sia nel piano dei maschi murari che nel piano ortogonale;
  - la correttezza dell'esecuzione è intrinsecamente garantita: stabilito il reticolo e ferme restando le competenze degli esecutori, non vi è economia potenziale tra una cattiva posa in opera ed una a regola d'arte e lo stato di pretensionamento è facilmente verificabile anche da un non esperto;
- dal punto di vista del **miglioramento strutturale** sono poi da sottolineare ulteriormente i seguenti aspetti:
  - il sistema di cucitura risolve efficacemente, in termini di forza di collegamento e di distribuzione dell'azione, anche il problema delle connessioni, spesso carenti, tra pareti ortogonali (fig. 17/a);
  - l'azione di collegamento diffusa nell'estensione del reticolo scongiura forti concentrazioni di carico e quindi l'esigenza di vistosi elementi di trasferimento/ripartizione di questo;
  - nel suo complesso il sistema consente quindi di perseguire un reale comportamento a scatola, nel collegamento delle pareti tra di loro, delle pareti agli orizzontamenti, e del profilo di colmo al cordolo quando presente, realizzando nella sostanza un corpo unico ideale (fig. 17/b);
  - l'utilizzazione dell'acciaio inox garantisce, oltre che un incremento del carico ultimo, una buona duttilità d'insieme, il che consente di attivare tutte le riserve resistenti nelle condizioni limite di lavoro della struttura (fig. 17/c e 127/d);
  - l'adozione dell'acciaio INOX garantisce la piena affidabilità nel tempo.

#### - APPLICAZIONI PARTICOLARI

- Il collegamento di elementi strutturali in legno, c.a. o acciaio alla muratura (fig. 18).
  - Gli elementi in legno (travi di solaio), in c.a. (travi, cordoli) o in acciaio (travi di solaio, travi principali), che spesso richiedono zanche, 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:
  - Minimo ingombro: l'intervento rientra nell'intonaco (spessori complessivi dell'ordine dei 6-8 mm)
  - Massima efficacia grazie alla presollecitazione
  - Rapidità di esecuzione
  - Maggiore sicurezza (elevata duttilità, resistenza alla corrosione, collegamento meccanico)
- Il cerchiaggio dei pilastri (fig. 19).
  - Il CAM si è rivelato particolarmente efficace nel cerchiaggio dei pilastri, specialmente in virtù della possibilità del pretensionamento. Esperienze comparative condotte prevedendo l'impiego di angolari e calastrelli, ovvero di fasciatura in teli di carbonio e, quindi, del CAM, a partire dallo stesso criterio di dimensionamento [ ], hanno dimostrato la complessiva migliore efficacia strutturale del CAM in termini di incremento di capacità portante e duttilità rispetto alle altre tecnologie. Se poi si vuole considerare anche il minor tempo di applicazione del sistema, l'entità della convenienza risulta palese.
  - 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).
  - Ancora una volta il pretensionamento risulta l'aspetto qualificante del sistema. Ad esso corrisponde infatti un immediato incremento di portanza funzione del carico di pretensionamento e dell'interasse dei cerchiaggi; mentre il carico ultimo dipende dal carico di rottura degli elementi confinanti al pari delle altre tecnologie.
  - Considerando che il pretensionamento può assorbire gran parte del carico ultimo dei cerchiaggi, il carico ultimo dell'elemento rinforzato si raggiunge per minore deformazione verticale.
  - La rottura avviene per deformazioni ultime caratterizzata da elevata duttilità e con capacità portante, nel ramo plastico, di un carico residuo maggiore del carico di rottura del pilastro originale.

#### - I MATERIALI:

- nastro:
  - per gli interventi di consolidamento diffuso e/o cerchiaggio delle murature: acciaio INOX trattato meccanicamente per ottenere forte duttilità ed alte resistenze; 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%; carico di lavoro della singola maglia 4000÷4500 N; carico di rottura  $\geq 5500$  N
  - per i cerchiaggi di pilastri di cls: nastro al carbonio ad altissima resistenza rottura superiore ai 10000 MPa; la sezione del nastro può arrivare a 30 mm per uno spessore di 1 mm; carico di rottura della singola maglia  $\geq 70\%$  della  $\sigma_u$ ; il nastro è zincato;
- elementi di diffusione del carico e di chiusura delle forze (angolari e piatti imbutiti)
  - la scelta dei materiali deve essere coerente con quella relativa al nastro, per cui, quando si opera sulle murature, viene impiegato acciaio INOX, mentre per nastro in acciaio al carbonio viene impiegato acciaio tipo S235 JR o superiore zincato a caldo.

#### - IL CRITERIO DI CALCOLO

##### ○ Le strutture murarie

Per quanto detto in premessa, l'approccio al dimensionamento di un intervento di consolidamento/miglioramento di una struttura muraria va inteso come somma di interventi locali, che, nella loro composizione, concorrono a formare l'intervento globale. Tale approccio risulta conveniente anche al fine di ottimizzare le quantità, e quindi i costi, dell'intervento stesso.

Ripercorrendo i meccanismi di collasso cui, doverosamente, bisogna dare sufficiente garanzia di sicurezza nel corretto dimensionamento dell'intervento, è possibile quindi tracciare un criterio di calcolo estendibile, nel ragionevole uso della sensibilità progettuale, a qualsiasi situazione. Nell'ambito degli aspetti strettamente collegati alla sensibilità strutturale compare, in prima battuta, la percezione/conoscenza del tipo di muratura e, conseguentemente, la definizione di affidabili valori in termini di caratteristiche meccaniche di riferimento, ricorrendo all'esperienza, ai dati di bibliografia disponibile e, se necessario, a prove di caratterizzazione.

### 1) **Contenimento dell'esplosione/separazione del paramento murario (fig. 20)**

- a. Tale obiettivo può essere perseguito fatte le seguenti assunzioni:
- l'azione di compattazione, e quindi di contrasto alla separazione laterale, è funzione della entità della forza agente nel singolo collegamento trasversale (n. dei nastri per la forza ultima specifica),
  - che questa si diffonde attraverso un piatto di ripartizione di lato B (pressione di trasferimento),
  - che tale stato tensionale si diffonde nel mezzo mediante isostatiche che possiamo in prima approssimazione ipotizzare rettilinee a 60° e che i fusi in successione sulla stessa faccia si intersechino ad 1/3 dello spessore s della muratura,
  - ne discende che per un affidabile consolidamento della muratura l'interasse della maglia non deve eccedere:
    - $i \leq 2 \cdot 0.6 \cdot s + B$  essendo:
    - s: lo spessore della muratura
    - B: il lato del piatto imbutito
  - La pressione trasversale non deve superare quella ultima resistente della muratura per un coefficiente riduttivo convenientemente pari 0.5;
  - Tale stato tensionale comporta un benefico incremento anche della portanza verticale, del quale comunque è bene non tenere conto.

### 2) **Rinforzo delle pareti a taglio (fig. 21)**

- a. Definito il reticolo di maglia i, con n ( $\leq 3$ ) nastri per ogni avvolgimento, necessario al consolidamento/compattazione trasversale, deve essere verificato che il rinforzo a taglio che ne consegue sia sufficiente anche nei confronti delle azioni nel piano conseguenti all'input sismico. Essendo:
- L'input sismico definibile come l'ordinata spettrale di competenza del sito moltiplicata per la massa sismica, in considerazione di un giustificato coefficiente di struttura;
  - La massa sismica sarà quella di competenza relativa al corpo di 'fabbrica' sostenuto;
  - Ne consegue un'azione sismica di piano che deve essere ripartita per le relative rigidità degli elementi resistenti, in considerazione dell'eventuale azione conseguente all'eccentricità tra centro di massa e centro delle rigidità;
  - Gli avvolgimenti orizzontali concorreranno alla portanza di taglio alla stregua delle staffature, ovvero ogni singolo reticolo, nel triangolo formato dai due tiranti (orizzontale e verticale) e dal puntone/biella della diagonale in muratura, sarà in grado di portare un'azione massima, fatto salva la capacità resistente degli avvolgimenti, ragionevolmente pari alla componente di  $f_d$  del puntone, essendo:
    - $f_{d,puntone} = s \cdot 0.5 \cdot s \cdot \sigma_{d,muratura}$
  - la somma dei contributi di ogni singola maglia nello sviluppo della singola orditura di reticolo darà il taglio complessivo portato a quella quota;

### 3) **Rinforzo delle pareti a flessione fuori dal piano**

- L'armatura a questo punto disponibile sulle superfici esterne della generica parete costituisce sezione resistente utile nell'assorbire la trazione conseguente alla flessione fuori dal piano.
- Il computo di tale contributo richiede l'individuazione dello schema statico di riferimento, in considerazione delle condizioni di vincolo del campo di parete e della condizione carico di verifica;

- c. La verifica può essere condotta, con le necessarie cautele, nell'ambito delle sezioni composte: muratura a compressione ed acciaio a trazione;
- d. Si ritiene che tale ulteriore capacità portante dovrebbe essere tenuta come riserva intrinseca e che il modello di calcolo e verifica sulla struttura non dovrebbe fare riferimento a tale aspetto per garantire la stabilità globale;

**4) Rinforzo delle maschi murari a flessione nel piano (fig. 22)**

- a. Gli allineamenti verticali più esterni del reticolo di rinforzo costituiscono l'armatura a flessione;
- b. La verifica deve ripercorrere il criterio classico per le sezioni parzializzate;
- c. Il carico ultimo per il generico maschio murario sarà comunque quello che per primo porterà ad una condizione limite sulle tre verifiche necessarie:
  - i. a taglio (secondo quanto già detto nel punto b);
  - ii. a flessione
  - iii. a compressione (secondo quanto presentato nel successivo punto g);

**5) Collegamento tra pareti ortogonali (incatenamenti)**

- a. Definita l'azione sismica di distacco della parete dal profilo di vincolo si disporranno un numero di collegamenti alle pareti ortogonali sufficiente all'assorbimento di detta azione, in modo da garantire il ricercato comportamento a scatola;
- b. Ogni avvolgimento agisce con una doppia sezione resistente in quanto è sempre realizzato con due bracci complanari alla forza;
- c. Ogni legatura può essere realizzata per sovrapposizione di più avvolgimenti: negli incatenamenti correnti (da uno spigolo all'altro) si può ipotizzare la sovrapposizione fino a 5 nastri; nel caso di fori intermedi e conseguente presenza di piatti imbutiti il numero delle sovrapposizioni deve essere limitato a 3;

**6) Collegamento tra pareti ed orizzontamenti**

- a. Vale quanto detto al punto precedente, verificato che la zona interessata al collegamento nell'elemento di orizzontamento (foro nel trave in legno) sia sufficientemente consolidata/rinforzata ad evitare fenomeni di 'rifollamento' (ad esempio mediante presentazione sui fori d'entrata di piatti imbutiti ancorati con viti);

**7) Il rinforzo a compressione (cerchiaggio dei pilastri)**

- a. Ogni singolo cerchiaggio agisce sugli spigoli con una pressione funzione della forza ultima del cerchiaggio stesso (condizione ultima pari alla minima tra le due: materiale del pilastro compatto che, cedendo, comporta la rottura dei cerchiaggi; materiale con vuoti che cede, implodendo, senza comportare la rottura dei cerchiaggi);
- b. Il carico ultimo sarà condizionato, nel caso di materiale compatto, a quello ultimo del pilastro originale sommato alla pressione di contrasto del cerchiaggio per la sezione minima del fuso nella posizione intermedia tra due cerchiaggi successivi (fig. 19);
- c. Una valutazione della sezione minima del fuso può essere ricavata immaginando una diffusione secondo archi di circonferenza tra sezioni sovrapposte con inclinazione della tangente di partenza a 45° (fig. 19);
- d. Nella condizione di incipiente collasso i volumi esterni al fuso delle pressioni di cerchiaggio vanno considerati espulsi e quindi non portanti; da ciò consegue la necessità, per dare consistenza portante all'intervento di confinamento, che i cerchiaggi siano sufficientemente vicini.