

COMUNE DI MONTALBANO JONICO

ADEGUAMENTO SISMICO
DELL'EDIFICIO PUBBLICO AD USO SCOLASTICO
DENOMINATO
"SCUOLA DELL'INFANZIA E PRIMARIA - NICCOLO' FIORENTINO"

Piano Triennale di edilizia scolastica in attuazione del Decreto del Ministero dell'Economia e delle Finanze
di concerto con il Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca
e con il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 03.01.2018
- BANDO TRIENNALE 2018 / 2020 - EDILIZIA SCOLASTICA - MUTUI -

PROGETTO ESECUTIVO

Titolo:

RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA ILLUSTRATIVA DEL SISTEMA SULLE OPERE MURARIE

Scala:

Data:

Maggio 2018

Codice:

//

Revisione:

Elaborato:

All. C

UTC Ufficio Tecnico Comunale
Viale Sacro Cuore - 75023 Montalbano Jonico (MT)
Tel. 0835.593811 - pec: comune.montalbano@cert.ruparbasilicata.it

IL CONSOLIDAMENTO SU EDIFICI IN MURATURA MEDIANTE SISTEMA CAM	2
1 INTRODUZIONE	2
1.1 ELEMENTI COSTITUENTI IL SISTEMA	3
1.2 MIGLIORAMENTI CONSEGUENTI ALL'APPLICAZIONE DEL SISTEMA	3
2 DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO	5
2.1 GEOMETRIA DEL RINFORZO CAM E CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	5
2.2 2.2 RESISTENZA NASTRI CAM	7
3 ASPETTI COMPLEMENTARI ALL'INTERVENTO CAM	8
3.1 LA CUCITURA DI PARETI ORTOGONALI	8
3.2 LE CATENE.....	9
3.3 IL DIATONO CAM.....	10
3.4 DISCONTINUITA' A LIVELLO DI SOLAIO	10
4 CALCOLO del RINFORZO DEL PANNELLO tramite Sistema CAM	13
4.1 SCHIACCIAMENTO (Istruzioni CNR DT200/2013)	13
4.2 PRESSOFLESSIONE NEL PIANO (DM 2018).....	18
4.3 RESISTENZA A TAGLIO	19
4.3.1 Taglio per Scorrimento (Mohr-Coulomb)	20
4.3.2 Taglio per Fessurazione Diagonale (Turnsek-Cacovic).....	21
5 IMMAGINI DELLE REALIZZAZIONI DELL'INTERVENTO CAM SU EDIFICI IN MURATURA (ANCHE BENI VINCOLATI)	23

IL CONSOLIDAMENTO SU EDIFICI IN MURATURA MEDIANTE SISTEMA CAM

1 INTRODUZIONE

Il patrimonio edilizio in Italia è largamente costituito da fabbricati e monumenti in muratura. Le tipologie costruttive e i materiali utilizzati sono i più vari (pietrame a secco, con letti di malta, a sacco). Per tutte le tipologie il comportamento prevalente è delegato alla resistenza per equilibrio tra i singoli blocchi portanti, spesso coadiuvati da letti di malta per migliorare il comportamento a trazione e con funzione di legante.



Fig. 1 - Il patrimonio Italiano

La malta però sebbene abbia un ruolo fondamentale nel comportamento resistente della singola parete risulta quasi sempre, vista l'anzianità dei manufatti storici, polverizzata e non più capace di fornire la funzione di legante cui è demandata.

Di fatto le strutture portanti in muratura sono così costrette ad equilibrare le azioni esterne non tanto grazie ad una resistenza del materiale bensì ad una resistenza per equilibrio alla dislocazione dei blocchi.

Proprio per tale motivo il sistema di Cuciture Attive CAM trova piena efficacia nello "spostare" la resistenza dei pannelli murari da quella per equilibrio a quella per resistenza del materiale sfruttando dunque tutte le capacità della muratura.

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 anche un calibrato e benefico stato di precompressione triassiale.

Esso viene realizzato interamente mediante nastri in acciaio inossidabile, così da eliminare qualsiasi problema di durabilità e compatibilità con qualsiasi tipo di malta, e il materiale scelto ha ottime caratteristiche sia in termini di resistenza che in termini di duttilità.

Negli edifici in muratura il danneggiamento scaturisce per i seguenti fenomeni:

1. Limitata resistenza a taglio della muratura (fenomeni di rottura per fessurazione diagonale);
2. Limitata resistenza a pressoflessione della muratura (fenomeni di rottura per schiacciamento o ribaltamento dentro e fuori dal piano);
3. Mancanza di ammortamento tra pannelli murari ortogonali (ribaltamento fuori dal piano);
4. Carenza di collegamento tra i solai e i pannelli murari e di rigidità dei solai stessi (mancanza di una buona ripartizione delle azioni sismiche tra le pareti resistenti);

1.1 ELEMENTI COSTITUENTI IL SISTEMA

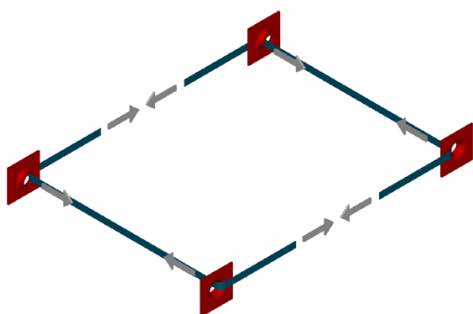
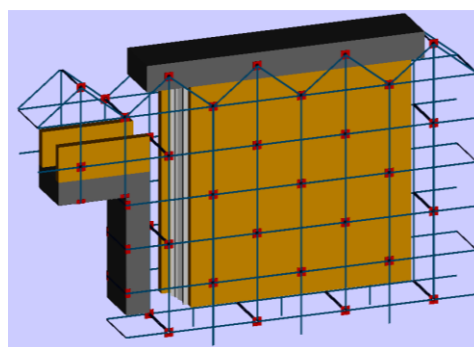


Fig. 2 - Schema statico elementare di riferimento



Disposizione su pannello murario

Gli elementi costituenti il Sistema CAM per la muratura sono:

- Nastri in acciaio Inox
- Piastre imbutite (funzione di distribuzione del carico concentrato in posizione del foro)
- Sigilli necessari al serraggio delle maglie di nastro
- Macchine pretensionatrici

L'intervento di rinforzo mediante CAM sulle murature prevede l'inserimento di nastri in acciaio Inox a formare maglie chiuse nello spessore delle pareti (mediante forature a maglie rettangolari o a quinconce) estese a tutto il pannello, nelle zone di intersezione tra pannelli ortogonali, e alle zone di appoggio dei solai come cucitura (travi in legno, solai in CA alleggerito ecc.).

1.2 MIGLIORAMENTI CONSEGUENTI ALL'APPLICAZIONE DEL SISTEMA

Il Sistema CAM trova la sua naturale applicazione su murature intonacate mediante la rimozione dell'intonaco o di strisce di intonaco nelle quali alloggiare i nastri; grazie all'utilizzo di acciaio inox consente di non utilizzare intonaci cementizi per la finitura o il ripristino.

I nastri pre-tesi applicano uno stato di precompressione tridimensionale, particolarmente utile in direzione trasversale; è grazie agli speciali elementi di connessione che i nastri d'acciaio realizzano un sistema continuo di tirantatura, in grado di ripercorrere le irregolarità della muratura, sia in orizzontale, lungo tutta la parete rinforzata, che in verticale, per tutta l'altezza.

Il sistema assicura il miglioramento della resistenza a taglio ed a pressoflessione dei maschi murari e delle fasce di piano sia per azioni nel piano della muratura sia per azioni fuori del piano ed inoltre impedisce la formazione di meccanismi locali di collasso mediante il collegamento fra pareti ortogonali e fra parete in muratura e cordolo sovrastante.

In particolare il rinforzo mediante il CAM migliora i seguenti comportamenti.

I nastri orizzontali, costituendo una staffatura, migliorano fortemente la resistenza a taglio dei singoli pannelli che passano da una resistenza di un elemento non armato ad armato a taglio;

I nastri orizzontali, forniscono un immediato aumento di resistenza a compressione (grazie al pretensionamento) e migliorano il comportamento di duttilità a compressione della muratura. I nastri verticali costituiscono una armatura a trazione nei confronti delle azioni di pressoflessione e pertanto ne migliorano notevolmente la resistenza;

Tra pannelli ortogonali le maglie di nastri “cuciono” direttamente le pareti fornendo automaticamente quel collegamento necessario tra le pareti per scambiare e ripartire fra loro le sollecitazioni agenti.

I nastri possono essere utilizzati per collegare, mediante piatti o presso piegati opportuni, testate di travi in legno, cordoli in CA, solai in latero-cemento, ecc. alle murature che le sorreggono e che poggiano su esso. Questo consente di assicurare alle murature un corretto collegamento di piano (le travi in legno diventano equivalenti a tiranti) e dunque una completa ripartizione delle azioni sismiche tra le pareti resistenti.

2 DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO

Nel testo seguente si espongono le formulazioni necessarie al dimensionamento del Sistema di Rinforzo C.A.M. per il miglioramento delle capacità resistenti a compressione, pressoflessione e taglio di manufatti in muratura.

2.1 GEOMETRIA DEL RINFORZO CAM E CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Come da figura riportata di seguito i principali parametri geometrici sono:

b_f = larghezza singolo nastro

t_{fs} = spessore singolo nastro

n_{str} = numero nastri sovrapposti

$t_{ft} = t_{fs} \times n_{str}$ = spessore totale nastri

p_{fh} = passo orizzontale dei nastri (interasse nastri verticali)

p_{fv} = passo verticale dei nastri (interasse nastri orizzontali)

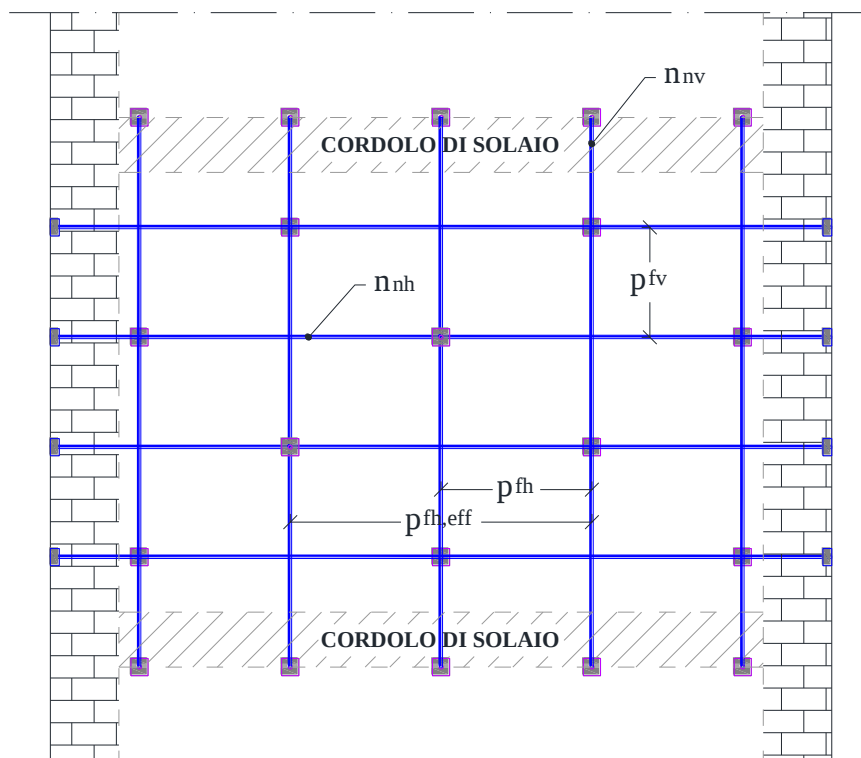


Fig. 3 - Schema grafico di riferimento – foratura a quinconce

I nastri sono posizionati a formare maglie chiuse disposte in continuità secondo disposizioni che possono essere verticali e/o orizzontali e/o diagonali, tra loro anche sovrapposte, con forature secondo un reticolo regolare o a *Quinconce*.

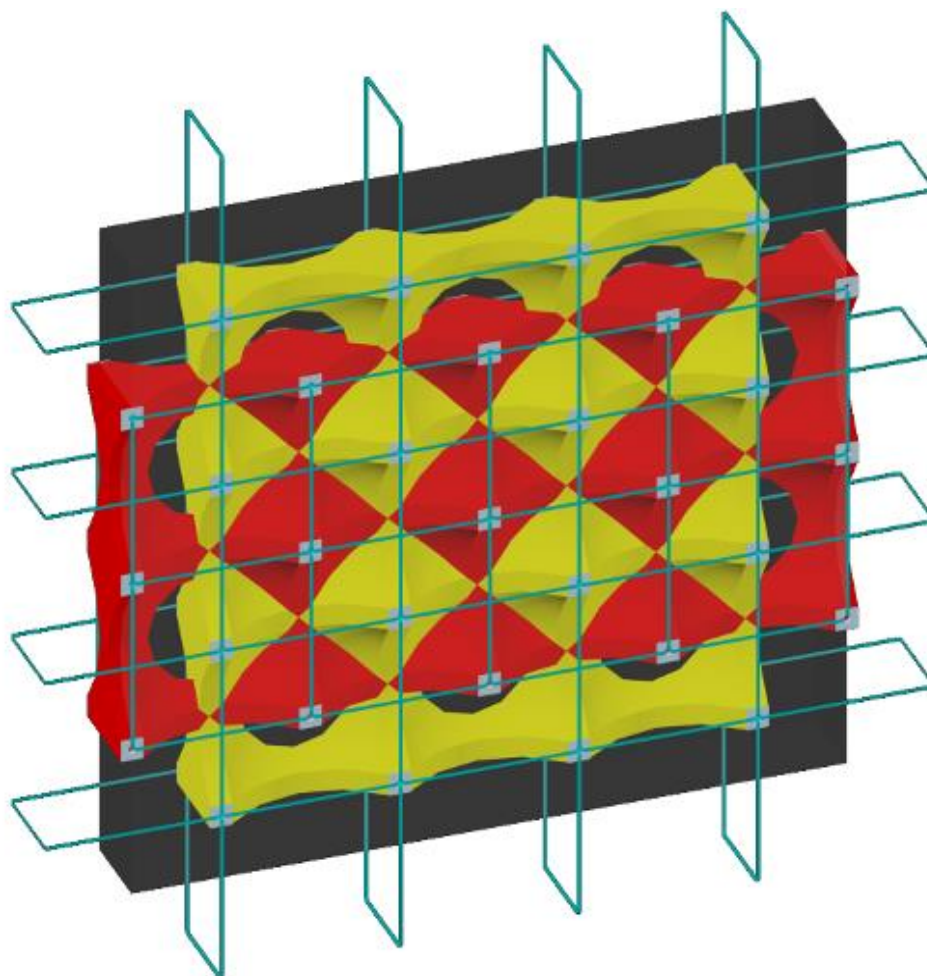


Fig.4 - Schema grafico di riferimento – foratura a quinconce

Quest'ultima modalità ha il vantaggio di limitare la formazione di linee di rottura preferenziali nelle posizioni delle forature trasversali. Al contempo però costituisce (vedi figura) un dimezzamento del passo orizzontale e l'efficienza ne risulta ridotta rispetto alla maglia con fori posizionati ad ogni intersezione di nastro. Il passo equivalente di una tessitura a *Quinconce* può pertanto essere così calcolata:

$$p_{thQ} = 2 \times p_{th}$$

$$p_{fvQ} = p_{fv}$$

NOTA. La disposizione a Quinconce modifica l'efficienza del rinforzo nei confronti solo del confinamento e dunque influisce sul calcolo dell'aumento di resistenza e della duttilità a compressione della muratura. Il passo da utilizzare per le verifiche a taglio e a pressoflessione rimane invece quello standard ovvero p_{th} p_{fv}

2.2 RESISTENZA NASTRI CAM

Il Sistema CAM è realizzato con nastri in acciaio inox con le seguenti caratteristiche:

Tipo 1 – Nastri per disposizione verticale o orizzontale– 1.4301/1.4307 EN10088–4

- spessore 0.9 e larghezza 19 mm
- resistenze a snervamento $f_{yk} \geq 350 \text{ N/mm}^2$ e a rottura $f_{tk} \geq 650 \text{ N/mm}^2$
- allungamento a rottura almeno pari al 35%.

Tipo 2 – Nastri migliorati per disposizione orizzontale – 1.4318 EN10088–4

- spessore 0.9 mm e larghezza 19 mm
- resistenze a snervamento $f_{yk} \geq 700 \text{ N/mm}^2$ e a rottura $f_{tk} \geq 1000 \text{ N/mm}^2$
- allungamento a rottura almeno pari al 15%.

Per la resistenza del nastro, la resistenza di calcolo a trazione $N_{t,Rd}$ è assunta pari al minore fra $N_{pl,RD}$ resistenza plastica della sezione lorda A e la resistenza $N_{u,Rd}$ a rottura della sezione netta A_{net} in corrispondenza della giunzione per la quale è garantita una resistenza minima pari al 70% della resistenza del nastro stesso.

$$f_{yd} = \min \left\{ \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}, \frac{0.7 \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \right\}$$

dove $\gamma_{M0} = 1,10$ (UNI EN 1993-1-4) e $\gamma_{M2} = 1,25$

Si considera quindi una tensione di calcolo pari a

$$f_{yd1} = 318 \text{ Mpa}$$

$$f_{yd2} = 560 \text{ Mpa}$$

3 ASPETTI COMPLEMENTARI ALL'INTERVENTO CAM

La cucitura delle pareti mediante una maglia diffusa sui vari allineamenti murari comporta oltre al consolidamento del singolo pannello murario numerosi vantaggi accessori ma di non secondaria importanza.

Ecco quindi che il CAM esce dall'aspetto locale di rinforzo del singolo elemento e diventa rinforzo di struttura, per cui l'intervento locale concorre al consolidamento globale.

Nelle strutture murarie sono quasi sempre presenti carenze di collegamento fra i macro-elementi costituenti. Sottovalutare questo aspetto è estremamente rischioso in quanto l'assenza di collegamento comporta il mancato sfruttamento delle capacità reali del manufatto murario. Unire efficacemente fra loro i corpi murari, gli stessi con i solai, ovvero il raggiungimento di quanto più simile all'effetto "scatola", costituisce un miglioramento enormemente più importante di quanto non lo sia il rafforzamento del singolo corpo murario in termini di pura prestazione meccanica.

Riuscire a trasformare il comportamento di un manufatto da una somma di tanti elementi separati, ad un comportamento in cui vi sia una continua interazione tra loro, produce in termini di prestazione meccanica, di dissipazione e di capacità finale un miglioramento di enorme valore.

Ne faremo velocemente dei brevissimi esempi.

3.1 LA CUCITURA DI PARETI ORTOGONALI

Qualora i maschi tra loro ortogonali siano ben ammortati possono costituire, compatibilmente con la capacità del collegamento (attrito), un unico elemento resistente a taglio/flessione, ad esempio due pareti ortogonali convergenti in un angolo possono funzionare come un'unica parete ad L. Questo comporta un aumento di capacità a taglio/flessione nonché un aumento di rigidezza flessionale nel comportamento meccanico delle due pareti considerate continue.

Il funzionamento di trasferimento delle sollecitazioni tra pareti convergenti è riassunto nella figura seguente.

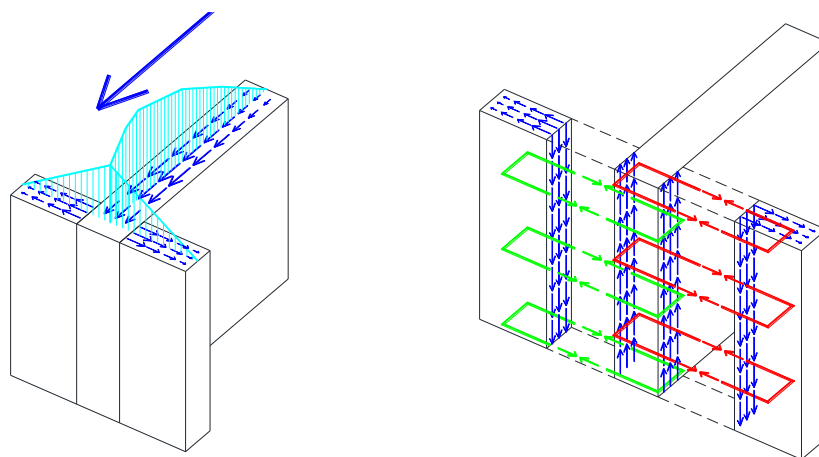


Figura 6 . andamento delle tensioni tangenziali

Ecco quindi che il Sistema CAM, proprio per come va ad essere posto in opera in corrispondenza degli incroci permette un EFFICACE e IMPLICITO presidio nei confronti di meccanismi locali di collasso legati alla carenza di ammassamenti.



Figura 7 . La cucitura dei paramenti ortogonali realizzata IMPLICITAMENTE dalla maglia CAM

3.2 LE CATENE

La realizzazione dell'incatenamento inteso in senso classico, può essere realizzata anche tramite Sistema CAM. Esso prevede il posizionamento di tirantature presollecitate binate correnti lungo le pareti murarie, realizzate con nastri in acciaio inossidabile sovrapposti.

I nastri vengono disposti sulle due facce della parete interessata e corrono paralleli da un'estremità all'altra della stessa, attraversandone lo spessore in corrispondenza dei fori intermedi.

Oltre al vantaggio di compattare la parete con diafani meccanici, le forature costituiscono punti di discontinuità che consentono di accompagnare andamenti anche non rettilinei della parete.

Ogni singola maglia è chiusa su se stessa ed è costituita da più nastri sovrapposti.



Figura 8 . Tirantature binate (catene realizzate tramite CAM)

Il calcolo della catena realizzata con Sistema CAM è del tutto equivalente al classico calcolo impiegato nei tiranti, potendo sfruttare il vantaggio derivante dalla presollecitazione imposta.



Figura 9 . Meccanismo di collasso e presidio realizzato mediante Sistema CAM

3.3 IL DIATONO CAM

Implicitamente per come va ad essere realizzata la cucitura attraverso lo spessore murario, il Sistema CAM va a realizzare diatoni meccanici di collegamento tra paramenti a doppio spessore.

Il nucleo spingente presente all'interno delle tipiche murature a sacco è responsabile di numerosi crolli legati a meccanismi di collasso locali della parete senza che essa abbia avuto la capacità di sfruttare i suoi parametri resistenti.

Ciascun diatono meccanico realizzato con il Sistema CAM ha la capacità di trasferire una azione pari al numero di nastri che entra in ciascun foro per la prestazione di ciascun nastro.

Intuitivamente nello schema seguente:

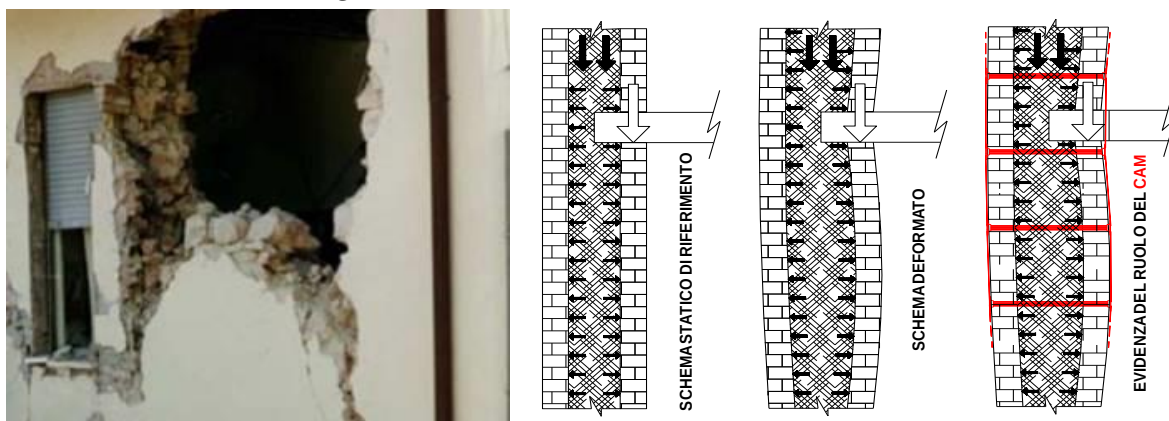


Figura 10 . Meccanismo di collasso e presidio realizzato mediante Sistema CAM

3.4 DISCONTINUITA' A LIVELLO DI SOLAIO

La mancanza di continuità a livello di solaio può essere legata a due aspetti diversi.

Una possibilità è quella di murature che per scarsa ammortatura reciproca non riescono a formare l'effetto scatola necessario a coinvolgere i paramenti ortogonali durante l'azione sismica.

L'altra possibilità è quella di avere solai non ammortati alle murature ortogonali.

Nel primo caso un utile intervento è quello di andare a realizzare una sorta di cordolo alla Giuffrè nella fascia di muratura immediatamente al di sotto del solaio ovvero a cavallo dello stesso.



Figura 11 . Due applicazioni di CORDOLO realizzato mediante Sistema CAM

Nei confronti dello scarso collegamento tra solaio e pareti che lo sostengono il sistema di consolidamento consiste nella ARPIONATURA e può essere applicato sia all'intradosso che all'estradosso dei solai fornendo due soluzioni differenti in termini di prestazione.



Figura 12 . Intervento di ARPIONATURA all'intradosso e all'estradosso

L'intervento all'**intradosso** prevede l'incatenamento delle singole travi di solaio, che siano queste lignee o metalliche, attraverso l'applicazione di connettori tipo TECNARIA, ovvero mediante forature trasversali delle stesse, in cui far passare le legature con nastri CAM alle murature (vedi figura seguente).

L'intervento all'**estradosso** funziona analogamente al precedente qualora il collegamento avvenga sempre in corrispondenza delle travi e l'impalcato stesso non sia rigido nel proprio piano (assenza di soletta rigida).

Qualora invece sia possibile e soprattutto necessaria la realizzazione di una soletta in calcestruzzo rigida nel proprio piano, essa può essere non solo resa collaborante alle travi grazie sempre alla predisposizione di connettori, ma le legature, analoghe alle precedenti, funzioneranno anche come collegamento a trazione/taglio tra la soletta e le murature. In tal modo si è raggiunto il duplice scopo di

incrementare la portanza del solaio a carichi verticali (impiegando una tecnica tradizionale quale l'aggiunta di una soletta in calcestruzzo collaborante) e di realizzare un ammorsamento molto efficace tra elementi verticali ed orizzontamenti (legature contro lo sfilamento, caldana ammorsata contro il punzonamento) assolutamente non invasivo soprattutto nei confronti della conservazione della sezione muraria.

Rispetto ad altri metodi, questo presenta grossi vantaggi in termini di velocità realizzativa, leggerezza e flessibilità di intervento, concetti totalmente opposti a quelli di interventi ben più invasivi (basti pensare al cordolo in breccia o alla 'coda di rondine'), migliorandone peraltro l'efficacia in termini di 'collegamento'.

Il dimensionamento dell'arpionatura sul solaio avviene in modo molto semplice: la forza che le legature disposte secondo un angolo di circa 45° devono assorbire è quella che uguaglia l'azione sismica applicata al solaio sulla base del carico ad esso competente.

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. Tale azione dovrà essere interamente assorbita dall'arpionatura, pertanto il numero di nastri verrà calcolato con la formulazione seguente:

$$n_{nastri} = \frac{S_d(a_g, T) \cdot \frac{W_{sismico, sol}}{n_{travi}}}{A_{nastro} \cdot f_{yd, nastro} \cdot \sqrt{2}}$$

in cui si è posto:

- $S_d(a_g, T)$ accelerazione sismica di progetto, funzione della a_g al suolo e del periodo proprio di riferimento del manufatto nella direzione considerata
- $W_{sismico, sol}$ peso sismico del solaio da incatenare (comprensivo dell'aliquota di carico accidentale)
- n_{travi} numero di travi portanti del solaio
- A_{nastro} sezione resistente del singolo nastro
- $f_{yd, nastri}$ tensione di calcolo del nastro impiegato

4 CALCOLO DEL RINFORZO DEL PANNELLO TRAMITE SISTEMA CAM

Di seguito una trattazione dei principali aspetti che entrano nel calcolo del rinforzo del singolo elemento nei confronti dei meccanismi di collasso tipici del pannello, quindi relativamente alla crisi per compressione, taglio e flessione.

4.1 SCHIACCIAMENTO (ISTRUZIONI CNR DT200/2013)

La verifica di elementi strutturali confinati viene condotta valutando l'azione esercitata dalla fasciatura in funzione della geometria e della tipologia del sistema a base del CAM. Per la valutazione della pressione di confinamento è buona norma disporre i nastri in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento. La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{Sd} \leq N_{Rmc,d}$$

essendo N_{Sd} il valore di progetto dell'azione assiale agente (da valutarsi, per le diverse combinazioni di carico prevedibili, come prescritto dalla Normativa vigente) e $N_{Rmc,d}$ il valore di progetto della resistenza della muratura confinata.

La resistenza assiale di progetto, $N_{Rmc,d}$, è definita come segue:

$$N_{Rmc,d} = A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md}$$

Dove:

f_{md} è la resistenza a compressione della muratura non confinata;

f_{mcd} è la resistenza a compressione della muratura confinata;

A_m è l'area della sezione trasversale della muratura confinata.

La resistenza dell'elemento confinato soggetto ad un valore f_l della pressione di confinamento può calcolarsi con la seguente:

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

Dove

$f_{l,eff}$ è la pressione efficace di confinamento (funzione della forma del confinamento)

k' coefficiente adimensionale di incremento di resistenza

α_1 coefficiente adimensionale assunto pari a 0.50

$k' = \frac{g_m}{1000}$ con g_m densità di massa della muratura in Kg/m³

La pressione efficace di confinamento è data dalla:

$$f_{1,eff} = k_{eff} \cdot f_1 = k_H \cdot k_V \cdot f_1$$

Dove:

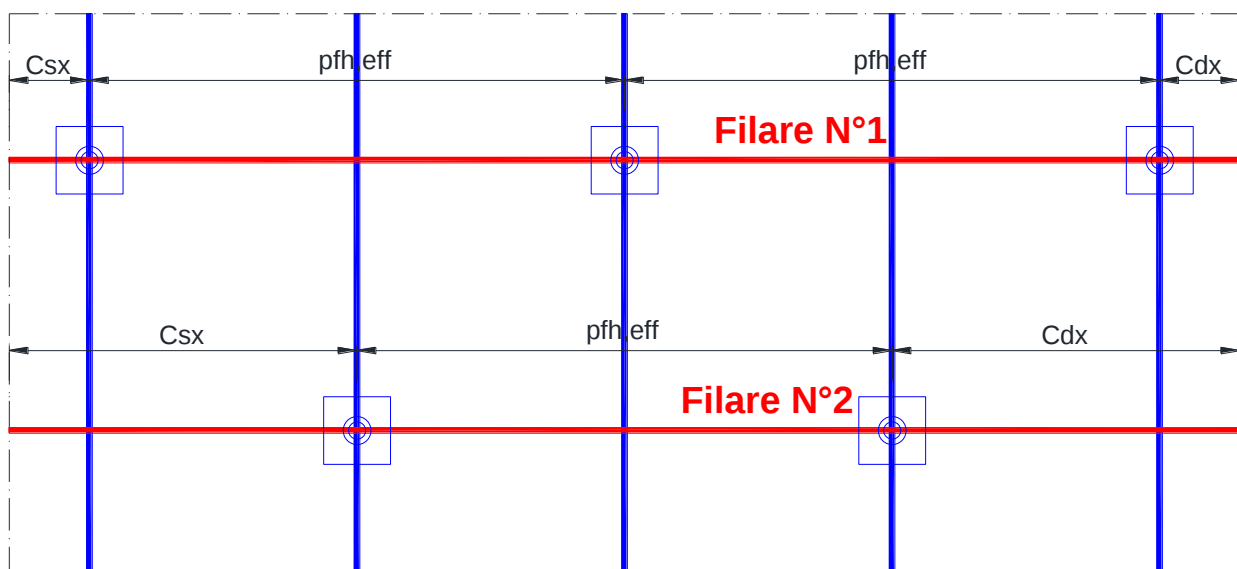
$k_{eff} = k_H k_V$ è il coefficiente di efficienza del confinamento

k_H è il coefficiente di efficienza orizzontale

k_V è il coefficiente di efficienza verticale

Per il calcolo dei parametri f_1 , k_H e k_V si precisa quanto segue:

- Il confinamento è trattato secondo le formulazioni riportate nel caso di fasciatura esterna discontinua e barre intermedie;
- La **fasciatura esterna** è costituita dalle nastrature perimetrali considerate come continue a vantaggio di sicurezza. In realtà nel caso di almeno una foratura trasversale la singola maglia esterna composta da più maglie chiuse è senz'altro più efficiente del considerarla come unica.
- Le **barre interne** come descritte nella DT-200 sono costituite dal totale di nastri passanti nel singolo foro prendendo sia i nastri orizzontali che verticali omogeneizzati in termini di resistenza a quelli orizzontali
- Il **passo orizzontale delle barre** è pari ovviamente a quello dei nastri verticali ovvero a quello efficace nel caso di disposizione a Quinconce.



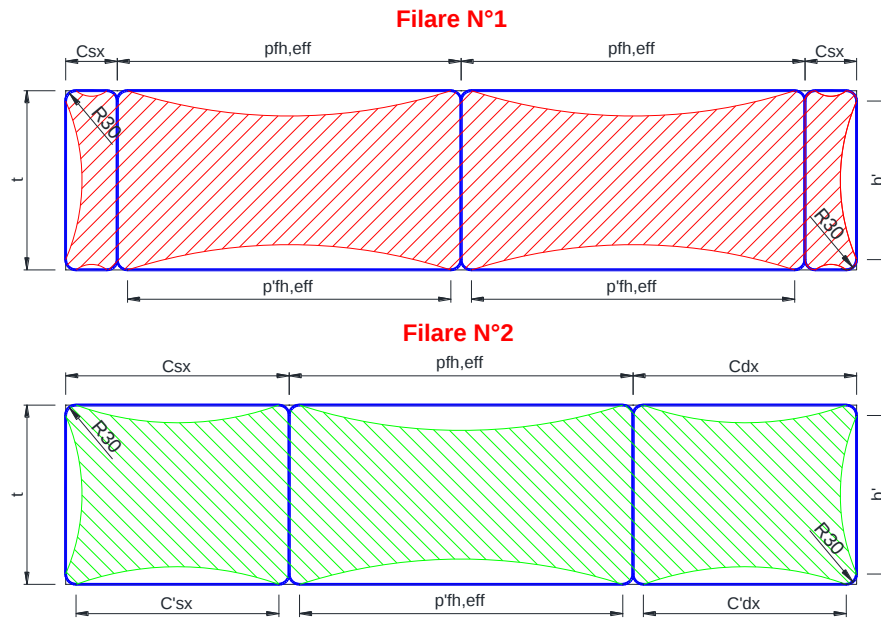


Fig. 13 - Schema grafico di riferimento

Nel caso della maglia a Quinconce, come evidenziato dalle precedenti figure, ogni maglia/filare orizzontale si alterna in due configurazioni geometriche, sia in termini di numero di forature trasversali, sia in termini di distanza dal bordo delle stesse. Queste in particolare possono assumere anche valori differenti tra lato sinistro e destro.

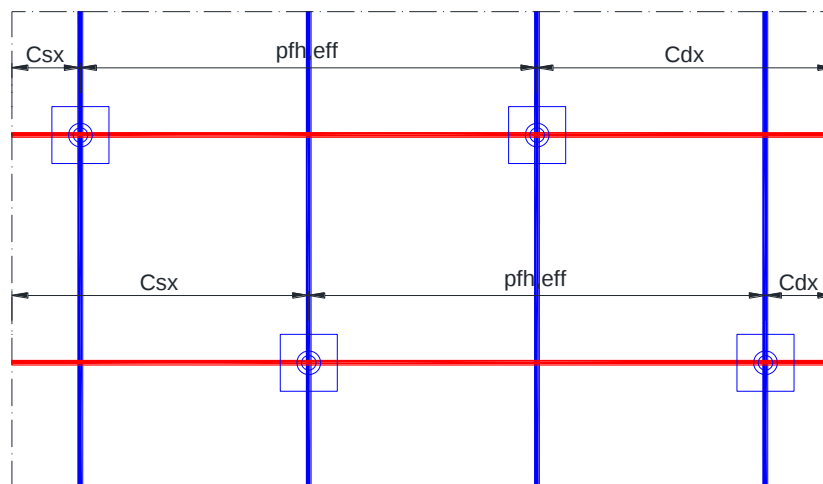


Fig. 14 - Schema grafico di riferimento

Le formulazioni riportate invece nelle Istruzioni DT-200 comprendono unicamente situazioni di simmetria, pertanto verranno adattate al nostro caso particolare.

La pressione di confinamento f_r , di un pannello murario di larghezza b e spessore d confinato con nastri CAM con passo orizzontale p_m è dato da

$$f_1 = \frac{1}{2} \min \{ f_{ydh} \cdot \rho_{sx}; f_{ydv} \cdot (\rho_{sy} + 2 \cdot \rho_{by}) \}$$

$$\rho_{sx} = \frac{4 \cdot t_{fht} \cdot b_f}{L \cdot p_{fv}} \quad \text{incidenza d'armatura CAM in direzione parallela al pannello}$$

$$\rho_{sy} = \frac{4 \cdot t_{fht} \cdot b_f}{t \cdot p_{fv}} \quad \text{incidenza d'armatura CAM in direzione ortogonale al pannello}$$

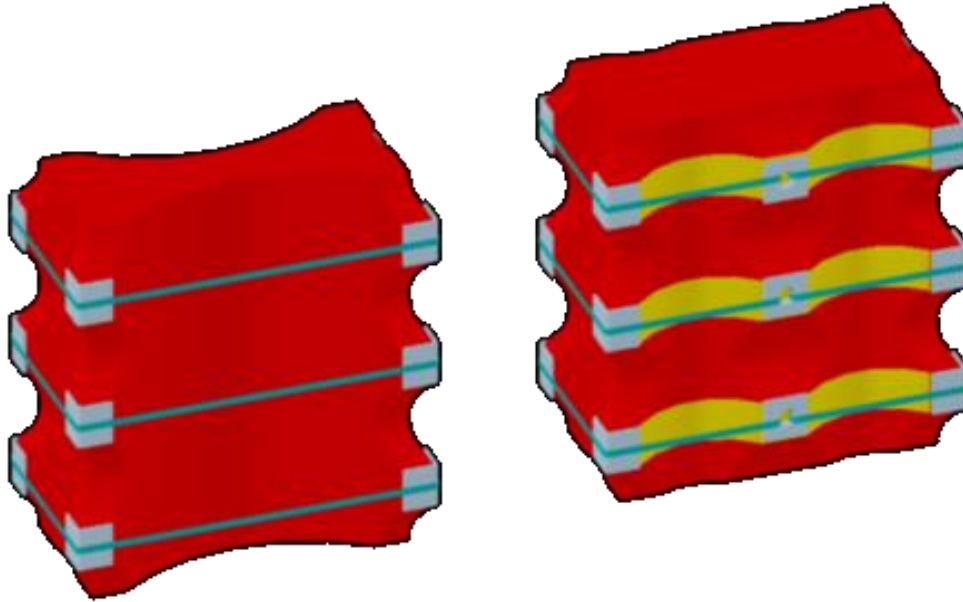
$$\rho_{by} = \frac{n_{fori} \cdot A_b}{t \cdot p'_{fh,eff}} \quad \text{incidenza d'armatura CAM equivalente a barre trasversali}$$

dove A_b rappresenta l'area totale dei nastri passanti per ogni foro trasversale equivalenti a barre. Tale area può essere convenientemente posta:

$$A_b = n_{fori} \cdot \left(2 \cdot t_{fht} + 2 \cdot t_{fvt} \cdot \frac{f_{ydv}}{f_{ydh}} \right)$$

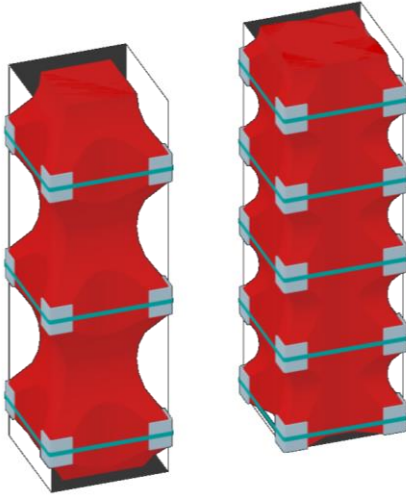
Il coefficiente di efficienza orizzontale è fornito dal rapporto tra l'area confinata e quella totale, A_m :

$$k_H = \left[1 - \frac{1}{3 \cdot L \cdot t} \cdot \left((c_{sx} - 2 \cdot R)^2 + (p_{fh,eff} - 2 \cdot R)^2 \cdot (n_{fori} - 1) + (L - 2 \cdot R)^2 + (c_{dx} - 2 \cdot R)^2 \right) \right]$$



Il coefficiente di efficienza verticale vale:

$$k_V = \left(1 - \frac{p'_{fv}}{2 \cdot \min\{L, t\}} \right)^2 = \left(1 - \frac{p_{fv} - b_f}{2 \cdot \min\{L, t\}} \right)^2$$



Il grafico del coefficiente di efficienza verticale dipende ovviamente dal passo verticale (tanto minore è il passo verticale tanto maggiore è l'efficienza).

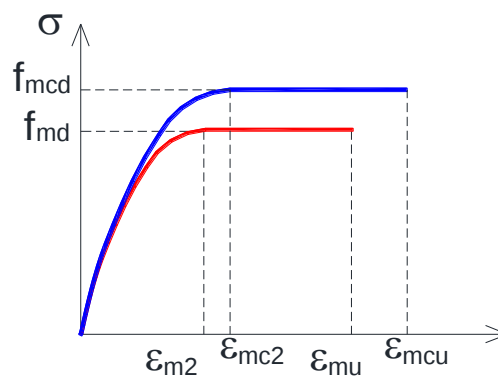
Calcolo dell'aumento di duttilità a compressione della muratura confinata mediante il C.A.M.

Il confinamento effettuato con il CAM aumenta la capacità resistente a compressione centrata dell'elemento murario e ne aumenta anche la deformazione ultima migliorandone la duttilità a compressione.

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

$$\varepsilon_{mur} = 0.0035 + 0.015 \cdot \sqrt{\frac{f_{1,eff}}{f_{md}}}$$

L'effetto di entrambi i contributi è un diagramma costitutivo della muratura incrementato come riportato nel grafico seguente:



Modello costitutivo muratura confinata

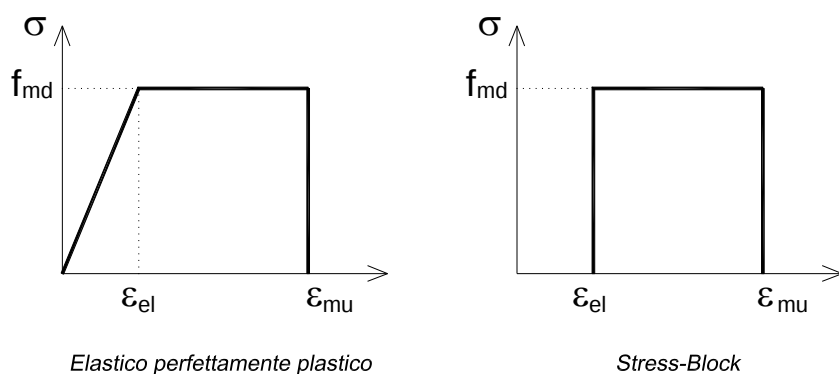
4.2 PRESSOFLESSIONE NEL PIANO (DM 2018)

La verifica a pressoflessione della muratura è analoga a quella di una sezione in C.A.

Le tensioni nella muratura e nell'armatura si dedurranno, a partire dalle deformazioni, utilizzando i rispettivi diagrammi tensione-deformazione.

Diagrammi di calcolo tensione-deformazione della muratura

Per il diagramma tensione-deformazione della muratura è possibile adottare opportuni modelli rappresentativi del reale comportamento del materiale, modelli definiti in base alla resistenza di calcolo f_{md} ed alla deformazione ultima ε_{mu}

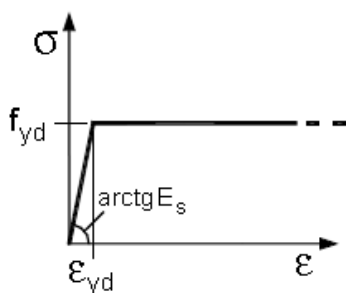


In cui si assume:

$$\varepsilon_{mu} = 0.0035$$

$$\varepsilon_{el} = f_{md} / E_m$$

Diagramma di calcolo tensione-deformazione dell'acciaio dei nastri



La verifica del pannello non rinforzato o rinforzato può avvenire in ipotesi di comportamento del materiale muratura di tipo rigido plastico (stress-block) – ipotesi 1- o elastico perfettamente plastico – ipotesi 2- .

IPOTESI 1

MURATURA NON RINFORZATA

$$M_u = \frac{L^2 \cdot t \cdot \sigma_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{0,85 \cdot f_{md}} \right)$$

dove

L è la lunghezza del pannello

t è lo spessore del pannello

f_{md} resistenza di calcolo a compressione della muratura non rinforzata già ridotta per il fattore di conoscenza FC

$\sigma_0 = N / (L \cdot t)$ tensione verticale media

MURATURA RINFORZATA

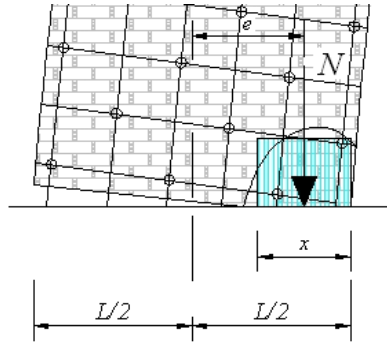


Fig. 15– Meccanismo di rottura a flessione

$$M_{Rd} = (0,85 \cdot f_{mcd}) \cdot 0,8x \cdot L \cdot \left(\frac{t}{2} - 0,4x \right) + f_{yd,v} \cdot A_{s,vert} / s_{vert} \cdot L \cdot \frac{t}{2} + f_{yi,sp} \cdot A_{s,spigolo} \cdot \frac{t}{2}$$

Dove

f_{mcd} resistenza di calcolo a compressione della muratura confinata (vd. Cap.5.3)

f_{yd} tensione di calcolo del nastro

$$x = \frac{\sigma_0 \cdot t + A_{s,vert} / s_{vert} \cdot f_{yd,v} + f_{yi,sp} \cdot A_{s,spigolo}}{0,8 \cdot (0,85 \cdot f_{mcd})}$$

Per brevità si ometteranno le formulazioni relative alla ipotesi 2,

4.3 RESISTENZA A TAGLIO

La rottura per taglio presenta notevoli difficoltà interpretative legate alla dispersione dei valori della resistenza sperimentale del pannello (effetto tipico delle rotture fragili) e alla difficoltà di prevedere la distribuzione delle tensioni locali all'atto della rottura. Per questi motivi, la valutazione della resistenza a taglio si basa essenzialmente su metodologie semplificate. Tipicamente, gli approcci maggiormente utilizzati sono basati sul criterio del massimo sforzo di trazione e sul criterio di Mohr-Coulomb. Il primo

criterio di resistenza a taglio considera la rottura per fessurazione diagonale, mentre il secondo la rottura per scorrimento.

La resistenza da considerare nelle verifiche sarà la minore tra le due.

4.3.1 Taglio per Scorrimento (Mohr-Coulomb)

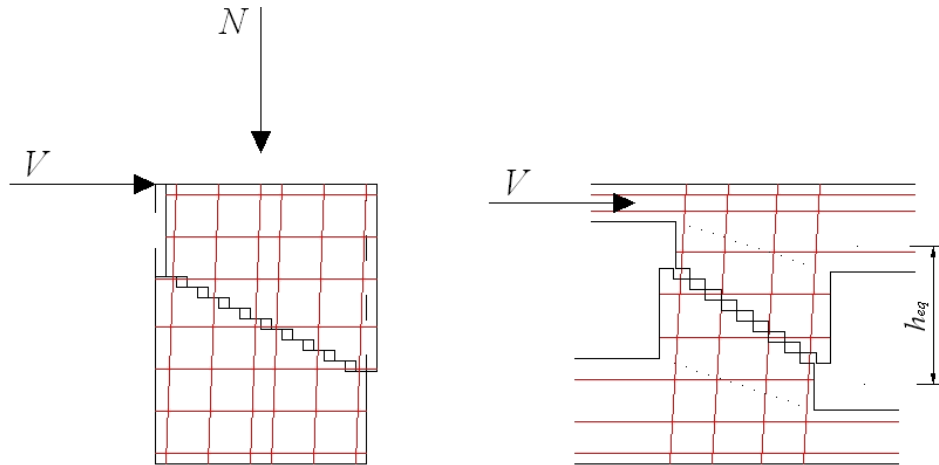


Fig. 16 - Meccanismo di rottura per taglio-scorrimento

Le NTC 2018 esprimono la resistenza a taglio-scorrimento di una muratura **non rinforzata** come:

$$V_{tf} = l \cdot t \cdot f_{vd}$$

dove

$$f_{vd} = f_{vm0} + 0.4 \sigma_n$$

t è lo spessore del pannello

l è la lunghezza della sola **parte compressa** della parete ricavata dal calcolo a pressoflessione

$$\sigma_n = N / l \cdot t$$

Le NTC 2018 per la muratura armata degli edifici nuovi esprimono la **resistenza a taglio** di una muratura armata, a cui si può assimilare il **Sistema CAM**, con un contributo aggiuntivo dell'armatura alla resistenza espressa mediante formazione di un traliccio resistente garantito dalle armature nelle due direzioni la resistenza a taglio della muratura nei maschi murari si esprime come

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

dove

$$f_{vd} = f_{vm0} + 0.4 \sigma_n$$

$$\sigma_n = N / d \cdot t$$

$A_{s,orizz}$ è pari a due volte l'area di un nastro per il numero di avvolgimenti orizzontali

s_{orizz} è l'interasse degli avvolgimenti orizzontali;

d è la distanza tra il lembo compresso e il baricentro dell'armatura tesa verticale

Si evidenzia come il valore di f_{vm0} vada diviso per il **fattore di confidenza FC** e per analisi elastica anche **per il coefficiente di sicurezza del materiale**.

Nella formulazione presentata si differenziano due contributi:

$V_{t,M} = d \cdot t \cdot f_{vd}$ che rappresenta il contributo relativo alla resistenza della muratura

$V_{t,S} = \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,orizz} \cdot f_{yd}}{s_{orizz}}$ che rappresenta il contributo delle armature

4.3.2 Taglio per Fessurazione Diagonale (Turnsek-Cacovic)

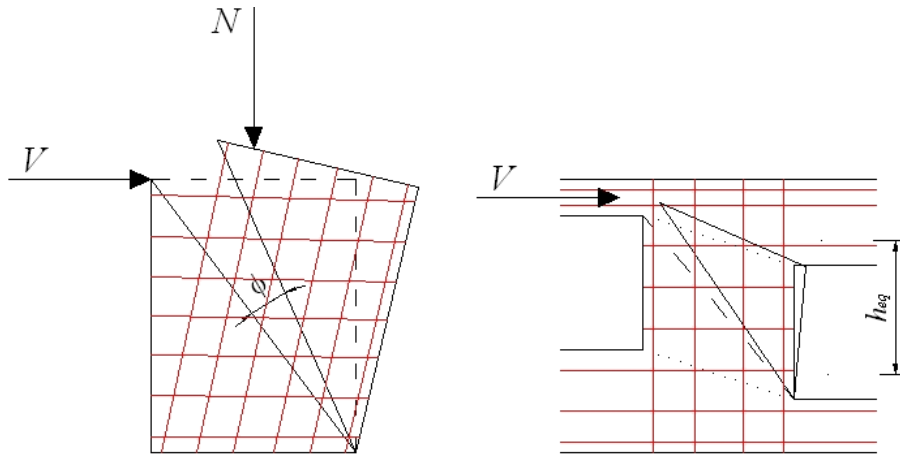


Fig. 17 - Meccanismo di rottura per taglio-fessurazione

Le NTC 2018 esprimono la resistenza a taglio-fessurazione di una muratura **non rinforzata** come:

$$V_t = L \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}}$$

dove

il coefficiente b assume il seguente valore:

$$b = \begin{cases} 1.5 & \frac{H_{eq}}{L} \geq 1.5 \\ 1.0 & \frac{H_{eq}}{L} \leq 1.0 \\ \frac{H_{eq}}{L} & 1.0 \leq \frac{H_{eq}}{L} \leq 1.5 \end{cases}$$

L è la lunghezza del pannello

t è lo spessore del pannello

$\sigma_0 = N / L \cdot t$ è la tensione media per compressione nella muratura

Anche in tale formulazione, l'effetto dell'intervento con Sistema CAM si stima con il contributo riportato nella formula:

$$V_{t,S} = \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,orizz} \cdot f_{yd}}{s_{orizz}} \quad \text{che rappresenta il contributo delle armature}$$

Anch'esso si somma al contributo della muratura, pertanto la resistenza a taglio-fessurazione di una muratura **rinforzata** come:

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

5 IMMAGINI DELLE REALIZZAZIONI DELL'INTERVENTO CAM SU EDIFICI IN MURATURA



Figura 18: Una parete di sottotetto, trattata con nastri diagonali



Figura 19: Dettaglio dell'intervento in facciata e conservazione delle cornici in marmo



Figura 20: La maglia CAM su una parete



Figura 21 : La cucitura CAM in un angolo



Figura 22 : Confinamento colonne circolari



Figura 23 : vista di dettaglio.



Figura 24 : Passaggio dei nastri in conservazione di un capitello.



Figura 25 : Passaggio dei nastri in conservazione di un bassorilievo



Figura 26 : Un intervento mirato a ridurre le carenze del pannello nei confronti della sollecitazione tagliante.



Figura 27 : Un intervento mirato a ridurre le carenze del pannello nei confronti della sollecitazione flettente.



Figura 28 : Il rinforzo applicato su una parete curva



Figura 29 : La realizzazione della cucitura CAM diffusa sull'edificio



Figura 30 : il particolare del rinforzo sulle aperture ad arco.



Figura 31 : Particolare passaggio in prossimità delle volte



Figura 32 : il particolare del rinforzo a conservazione dei fregi.



Figura 33 : Particolare passaggio in prossimità delle volte



Figura 34 : il particolare.

6 L'INTERVENTO TRAMITE SISTEMA CAM

Le carenze ante operam del fabbricato sede della scuola in oggetto sono le seguenti.

- Limitata resistenza a taglio della muratura (fenomeni di rottura per fessurazione diagonale);
- Limitata resistenza a pressoflessione della muratura (fenomeni di rottura per schiacciamento o ribaltamento dentro e fuori dal piano);
- Mancanza di ammorsamento tra pannelli murari ortogonali (ribaltamento fuori dal piano);
- Carenza di collegamento tra i solai e i pannelli murari e di rigidità dei solai stessi (mancanza di una buona ripartizione delle azioni sismiche tra le pareti resistenti)

Sulla base delle carenze riscontrate ante operam si è ipotizzato un rinforzo CAM che consentirà di

- Applicare uno stato di precompressione tridimensionale, particolarmente utile in direzione trasversale;
- Realizzare un sistema continuo di tirantatura, in grado di ripercorrere le irregolarità della muratura, sia in orizzontale, lungo tutta la parete rinforzata,
- Assicurare il miglioramento della resistenza a taglio ed a pressoflessione dei maschi murari e delle fasce di piano sia per azioni nel piano della muratura sia per azioni fuori del piano
- Impedire la formazione di meccanismi locali di collasso mediante il collegamento fra pareti ortogonali e fra parete in muratura e cordolo sovrastante.
- Migliorare fortemente la resistenza a taglio dei singoli pannelli che passano da una resistenza di un elemento non armato ad armato a taglio;
- fornire un immediato aumento di resistenza a compressione (grazie al pretensionamento) e migliorare il comportamento di duttilità a compressione della muratura (i nastri verticali costituiscono una armatura a trazione nei confronti delle azioni di pressoflessione e pertanto ne migliorano notevolmente la resistenza)