



LINEE GUIDA – CUCITURE ATTIVE PER LA MURATURA

PROCEDURA GENERALE PER LA PROGETTAZIONE, MODELLAZIONE, CALCOLO E VERIFICA DI EDIFICI IN MURATURA RINFORZATI CON IL SISTEMA DI CUCITURA ATTIVA CAM

A cura di

Ing. Roberto Marnetto

Ing. Alessandro Vari



INDICE

1	CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA ALLO STATO ATTUALE	3
2	ANALISI STRUTTURALE	4
3	INDIVIDUAZIONE DEGLI STATI TENSIONALI E DELLE ZONE CRITICHE	8
4	SCELTA DELLE TECNICHE DI RINFORZO (legatura diffusa, confinamento, catene,..)	9
5	DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO.....	11
5.1	DEFINIZIONI GEOMETRICHE DEL RINFORZO MEDIANTE IL CAM	11
5.2	RESISTENZE DI CALCOLO.....	13
5.2.1	Muratura	13
5.2.2	Resistenza nastri CAM.....	15
5.3	SCHIACCIAMENTO (Istruzioni CNR DT200/2004).....	16
5.4	PRESSOFLESSIONE NEL PIANO (DM 2008)	20
5.4.1	Muratura non armata	21
5.4.1.1	Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008).....	21
5.4.1.2	Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)	22
5.4.2	Muratura Rinforzata mediante Sistema CAM.....	23
5.4.2.1	Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008).....	23
5.4.2.2	Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)	25



5.5	PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO – FLESSIONE VERTICALE (DM 2008).....	29
5.5.1	Muratura non armata	29
5.5.1.1	Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008).....	29
5.5.1.2	Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)	30
5.5.2	Muratura rinforzata mediante Sistema CAM	30
5.5.2.1	Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008).....	30
5.5.2.2	Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)	31
5.6	PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO – FLESSIONE ORIZZONTALE (DM 2008)	35
5.6.1	Muratura non armata	35
5.6.2	Muratura rinforzata mediante Sistema CAM	36
5.6.2.1	Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008).....	36
5.6.2.2	Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)	36
5.7	NOTE SULL’EFFICACIA DELL’INTERVENTO DI RINFORZO A PRESSOFLESSIONE.....	39
5.8	INCREMENTO DELLA RESISTENZA A PRESSOFLESSIONE PER EFFETTO DEL PRETENSIONAMENTO	40
5.9	RESISTENZA A TAGLIO	41
5.9.1	Taglio per Scorrimento (Mohr-Coulomb).....	41
5.9.1.1	Incremento della resistenza a taglio per scorrimento della muratura per effetto del pretensionamento.....	43
5.9.2	Taglio per Fessurazione Diagonale (Turnsek-Cacovic).....	44
5.9.2.1	Incremento della resistenza a taglio per fessurazione della muratura per effetto del pretensionamento.....	46
6	NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE	48



1 CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA ALLO STATO ATTUALE

- **Rilievo strutturale**
 - Geometria delle pareti e articolazione dei solai
 - Fondazioni
 - Tipologia del terreno di fondazione
- **Rilievo del quadro fessurativo**
- **Caratterizzazione dei materiali**
 - Indagini di campo
 - **Martinetti piatti:**
 - stato tensionale attuale (*martinetto semplice*)
 - consente di verificare il modello di valutazione dei carichi sulla struttura
 - caratterizzazione del modulo elastico (E) e di Poisson (ν) (*doppio taglio e due martinetti*)
 - caratterizzazione della risposta elastica del materiale e, tramite ν , della deformabilità a taglio (attraverso ν si individua G)
 - tensione di rottura (*doppio taglio e due martinetti*)
 - **rimozione dell'intonaco a campione o totale (mette in luce solo il paramento esterno)**
 - tipologia del tessuto murario
 - tipologia degli inerti
 - caratterizzazione visiva della malta
 - tipologia di tessitura muraria
 - verifica della presenza di eventuali diatoni
 - grado di collegamento tra pareti ortogonali
 - **indagine endoscopica** (foratura e rilievo visivo dell'organizzazione muraria nello spessore)
 - tipologia degli inerti
 - esistenza o meno della malta



- caratterizzazione visiva della malta
 - tipologia di tessitura muraria (vuoti, organizzazione, presenza o meno di legante)
- **indagini soniche**
 - modulo elastico (E)
 - individuazione di eventuali vuoti e/o disuniformità
- riferimenti normativi
 - NTC 2008
 - OPCM 3274 e successive modifiche, allegato 11.D, tabella 11.D.1 e tabella 11.D.2

2 ANALISI STRUTTURALE

- **modellazione della struttura**
 - Scelta preliminare di modellazione
 - Modellazione a shell
 - Schematizzazione a telaio equivalente (elementi beam)
 - inserimento dei parametri meccanici
 - caratteristiche dei materiali
 - vincoli interni
 - connessioni tra pareti
 - connessioni tra pareti e orizzontamenti (coperture, solai, volte, scale, ...)
 - definizione della tipologia di solaio (rigido o deformabile)
 - sconnessioni conseguenti alle eventuali fessurazioni (*dal rilievo del quadro fessurativo*)
 - vincoli esterni
 - schematizzazione del vincolo di base (fondazioni e terreno)
 - eventuali vincoli di continuità con edifici/strutture adiacenti (vd anche i vincoli interni)
 - inserimento dei carichi (con riferimento ai coefficienti parziali (γ_G , γ_Q , ...) allo stato limite)
 - permanenti: strutturali, portati
 - distorsioni
 - termiche (*irrilevante*)
 - accidentali



- d'esercizio sugli orizzontamenti
- vento (vd. anche DM 16.01.96)
- neve (vd. anche DM 16.01.96)
- sismici
 - spettro **elastico** di riferimento
 - zonizzazione:
 - a_g : accelerazione al suolo
 - F_0 : fattore di amplificazione dello spettro
 - tipologia di terreno (A, B, C, D, E: tab. 3.2.II & 3.2.III)
 - coefficienti di caratterizzazione (cap. 3.2)
 - S: topografico (tab. 3.2.V & 3.2.VI)
 - ξ : coefficiente di smorzamento viscoso (in mancanza di più precise valutazioni si assume pari al 5%)
 - η : fattore di alterazione dello spettro in funzione di ξ
 - fattore di struttura: q (coefficiente demoltiplicativo dello spettro) p.to 7.4.3.2
 - differenziato per tipologia di analisi
 - *analisi non lineare (push_over)*: $q=1$;
 - *analisi lineari*: $q>1$;
 - spettro sismico per lo SLU: spettro elastico demoltiplicato del fattore di struttura q
- **analisi numerica (in ordine accuratezza del risultato)**
 - statica lineare equivalente (zona 4, edifici semplici come definito nell'NTC p.to (verificare))
 - dinamica modale a spettro di risposta
 - dinamica lineare al passo con utilizzo di accelerogrammi
 - *NOTA: poco significativa nell'analisi di strutture in muratura*
 - statica non lineare (push-over) → verifica allo SLU nelle due direzioni ortogonali
 - dalla analisi modale mi ricavo i fattori di partecipazione di massa relativi ad ogni modo;
 - individuazione dei due gruppi di distribuzione di forze:
 - *GRUPPO 1 (distribuzioni principali)*:



- *Triangolare come da forze statiche equivalenti (cap. 7.3.3.2) se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non inferiore al 60% (solo per le murature) ed a condizione di utilizzare come 2° gruppo di distribuzione la 2.a*
- *dalla **analisi modale** distribuzione di accelerazioni proporzionale alla forma del 1° modo di vibrare, se superiore al 60% (solo per le murature) di partecipazione in massa – (vd Allegato)*
- *dalla **analisi dinamica lineare modale** (con almeno l'85% di partecipazione di massa): distribuzione dei tagli di piano, quando il 1° modo di vibrare è superiore a T_C – (vd Allegato)*
- **GRUPPO 2** (distribuzioni secondarie)
 - *Distribuzione uniforme di forze intesa come distribuzione uniforme di accelerazioni lungo l'altezza (efficace per la verifica delle pareti fuori dal piano)*
 - *Distribuzione adattiva (a partire da una delle 3 distribuzioni del GRUPPO 1) che cambia in funzione della plasticizzazione della struttura: richiede l'aggiornamento del modello per ogni ulteriore plasticizzazione (ideale e omnicomprendensiva per l'analisi push-over)*
- *Applicazione del gruppo di forze considerato (uno per ogni gruppo) in modo incrementale tale da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale d_c del punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione fino alla riduzione del 20% taglio massimo alla base registrato (F_{bu}).*
 - *NOTA: Il diagramma della variazione del taglio alla base con l'incremento dello spostamento del punto di controllo rappresenta la **curva di capacità** della struttura*
 - *NOTA: Ad ogni step incrementale si verifica lo stato tensionale dei materiali, sezione per sezione, e si valuta il livello di reazione di ogni singolo elemento*
 - *NOTA: Si sommano i contributi di reazione dei vari elementi che lavorano in parallelo e si ottiene il livello di reazione della struttura (contestualmente si evidenziano gli elementi che man mano si plasticizzano)*
 - *NOTA: Si procede fino allo spostamento relativo all'80% della reazione massima*
- *Determinazione della **curva di capacità bilineare** equivalente → determinazione del pendolo equivalente*
 - *NOTA: la curva di capacità della struttura deve essere scalata del fattore di partecipazione modale (Circolare Applicativa al p.to 7.3.4.1) per ottenere la **curva caratteristica forza spostamento** del sistema equivalente*
 - *NOTA: la curva caratteristica forza spostamento del sistema equivalente deve essere approssimata da una bilineare definita in base al criterio di **uguaglianza delle aree**, posta l'individuazione della **rigidezza** e della **forza di snervamento***
 - *NOTA: il ramo elastico (che caratterizza la rigidezza) è la linea che congiunge l'origine con il punto sulla curva caratteristica corrispondente ad un taglio pari a 0.7 (NTC 2008 p.to 7.8.1.6 - nella Circolare Applicativa al p.to 7.3.4.1 il fattore di riduzione è pari a 0.6) del taglio massimo alla base e prosegue fino alla forza di snervamento*



- NOTA: la forza di snervamento si individua imponendo l'uguaglianza dell'area sottesa dalla bilineare equivalente con la curva caratteristica forza spostamento
- *Determinazione delle caratteristiche meccaniche del pendolo equivalente:*
 - *Massa, Forza ultima, Rigidezza, spostamento ultimo, periodo di oscillazione*
 - *Massa: ricavata dalla analisi condotta con la ripartizione delle forze del Gruppo 1*
 - *Spostamento ultimo dalla curva caratteristica forza spostamento*
 - *Rigidezza dalla bilineare equivalente*
 - *Forza ultima coincide con la forza di snervamento della bilineare equivalente*
 - *Determinazione del periodo del pendolo equivalente*
- *Entro con il periodo dentro lo spettro elastico → individuo l'accelerazione corrispondente → la moltiplico per la massa del pendolo → definisco la forza spettrale del pendolo equivalente*
- *Determinazione dello spostamento massimo del pendolo equivalente dallo spettro di spostamento elastico*
- *Confronto tra lo spostamento massimo dallo spettro e lo spostamento ultimo dalla curva bilineare*
 - *Se $d_{max} > d_u$ allora ricominciare (incrementare il CAM o aggiornare la struttura o ...)*
 - *Se $d_{max} \leq d_u$ verifica soddisfatta se: **la forza spettrale del pendolo equivalente deve essere al massimo 3.0 volte la forza resistente ultima (NTC 2008 – p.to 7.8.1.6).***



3 INDIVIDUAZIONE DEGLI STATI TENSIONALI E DELLE ZONE CRITICHE

- **Dall'analisi della struttura devono essere individuate le situazioni critiche evidenziate dal meccanismo di rottura (push over) o dalle zone di sovraccarico (analisi elastica):**
 - Schiacciamento
 - *Definire con quale tipo di controllo/procedura si verifica (es. Push over: superamento della deformazione locale massima (ϵ_u))*
 - (es. Analisi elastica: superamento della resistenza massima (N_{rd}) ...)
 - presso flessione
 - fuori dal piano: tutti gli elementi sismoresistenti (NTC 2008 - tab. 7.8.II) e non devono essere preventivamente verificati nel loro comportamento fuori dal piano (NTC 2008 – p.to 4.5.6.2.). Qualora l'elemento sismoresistente non si verifichi fuori dal piano, tale elemento non può essere considerato nell'analisi della struttura, a meno di non provvedere **preventivamente** al suo rinforzo fuori dal piano (NTC 2008 - p.to 7.8.1.5.2).
 - (es. Analisi elastica: superamento della resistenza massima (M_{rd}) ...)
 - nel piano
 - (es. Push over: superamento della deformazione locale massima (ϵ_u) ...)
 - (es. Analisi elastica: superamento della resistenza massima (M_{rd}) ...)
 - taglio
 - per scorrimento su un piano orizzontale (tranciamento)
 - per fessurazione diagonale



4 SCELTA DELLE TECNICHE DI RINFORZO (legatura diffusa, confinamento, catene,..)

- SHIACCIAMENTO

- Cerchiatura/Confinamento mediante legature orizzontali
 - Parametri: passo, numero legature sovrapposte, dimensioni ed estensione degli angolari;
 - Dimensionamento:
 - Analisi elastica lineare (vd. cap. 5): dimensionamento del confinamento per integrare la **resistenza** disponibile del materiale a quella richiesta dall'analisi;
 - Analisi non lineare: Il materiale viene messo in condizione di potersi deformare maggiormente sotto compressione in conseguenza del confinamento che ne assorbe la dilatazione laterale. Nell'analisi deve essere controllato se, in virtù dell'incremento di cedevolezza, sia sufficiente la corrispondente residua capacità portante.
 - Principio di miglioramento:
 - l'incremento in termini di pressione resistente verticale è pari alla pressione efficace conseguente alla forza di confinamento → pressione laterale sul volume di riferimento individuato dall'interasse delle legature.
 - L'incremento in termini di deformabilità è proporzionale all'incremento di capacità portante nel ramo elastico e alla deformabilità delle legature oltre il loro limite di snervamento che consente un accorciamento dell'elemento a scapito di uno spanciamento laterale.

- PRESSOFLESSIONE

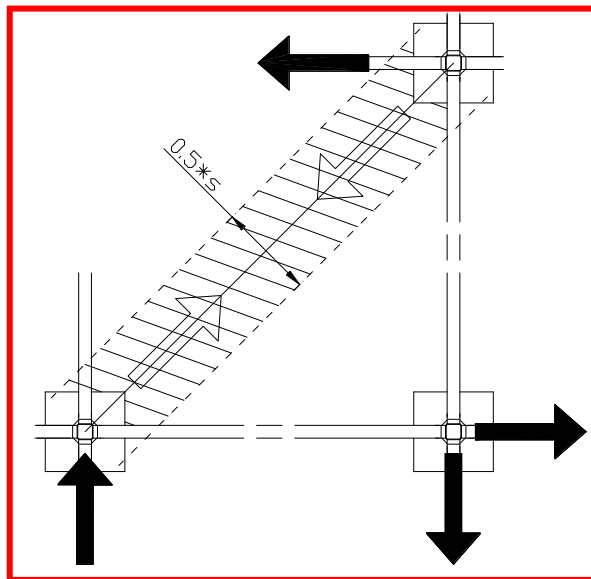
- Inserimento di legature verticali e orizzontali
 - Parametri: passo verticale e passo orizzontale, numero legature sovrapposte
 - Dimensionamento:
 - Analisi elastica lineare (vd. cap. 5): dimensionamento del confinamento per integrare la resistenza disponibile dell'elemento murario a quella richiesta dall'analisi;
 - Analisi non lineare: l'elemento strutturale viene controllato in virtù della sua condizione deformata consentita dalla nuova configurazione resistente: allungamento sul lembo teso, schiacciamento confinato su quello compresso.
 - Principio di miglioramento: le legature verticali conferiscono capacità portante a trazione (incremento diretto del momento ultimo); le legature orizzontali incrementano la duttilità nella sola parte compressa, inoltre se questa contiene almeno una



colonna di maglie (equivalente ad un pilastro confinato) viene incrementata anche la resistenza a compressione (vedi schiacciamento).

- TAGLIO

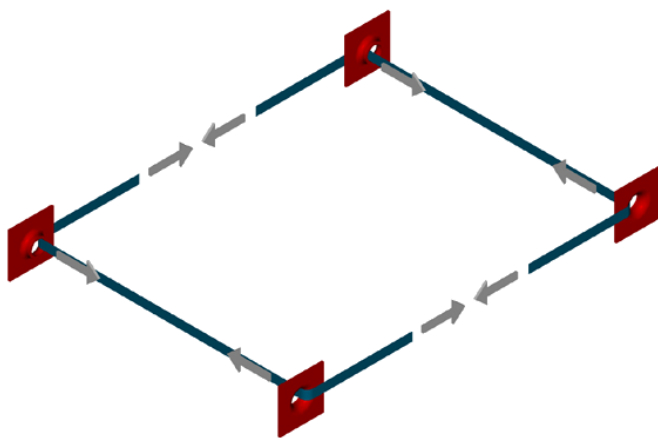
- Scorrimento o fessurazioni diagonale: inserimento di doppio reticolo di nastri (orizzontali e verticali e, eventualmente, anche diagonali)
 - Parametri: passo verticale e passo orizzontale, numero legature sovrapposte
 - Dimensionamento
 - Analisi elastica lineare (vd. cap.5): dimensionamento dell'orditura per contrastare il cinematismo conseguente
 - Principio di miglioramento:
 - Scorrimento: le legature verticali si oppongono allo scorrimento per reazione all'allungamento conseguente; le legature orizzontali interagiscono se lo scorrimento avviene su una superficie scalettata allo stesso modo che per le fessurazioni diagonali.
 - Fessurazioni diagonale: nella doppia orditura i nastri fungono da correnti tesi che equilibrano la reazione a compressione della biella inclinata interna alla muratura.



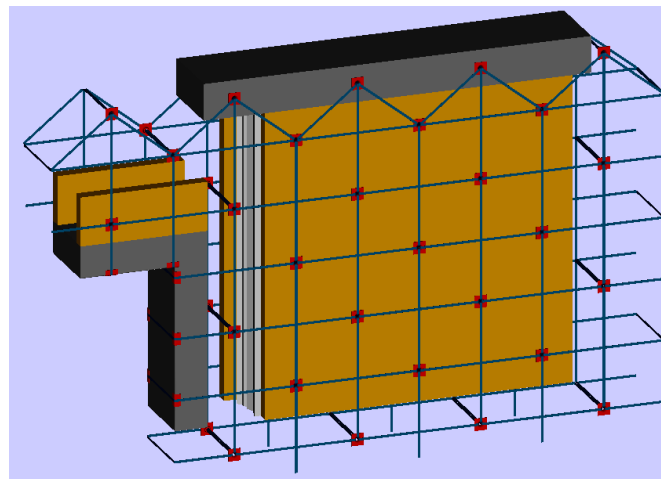


5 DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO

5.1 DEFINIZIONI GEOMETRICHE DEL RINFORZO MEDIANTE IL CAM



Schema statico elementare di riferimento



Disposizione su pannello murario

b_f = larghezza singolo nastro

t_{fs} = spessore singolo nastro

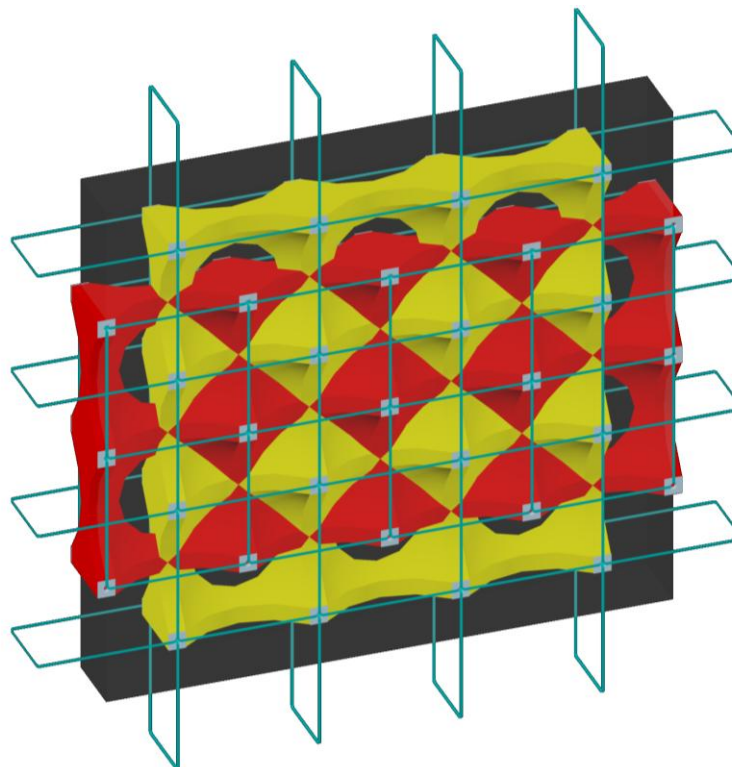
n_{str} = numero nastri sovrapposti

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

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

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

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*.



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:

$$p_{fhQ} = 2 \times p_{fh}$$

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

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_{fh} , p_{fv}



5.2 RESISTENZE DI CALCOLO

5.2.1 Muratura

Nella tabella C8A.2.1 della Circolare Applicativa alle NTC2008 sono forniti i valori medi di resistenza a compressione e taglio ed i moduli elastici delle murature più diffuse.

Tabella C8A.1.1 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti valori dei fattori di confidenza per edifici in muratura

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1		verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.35
LC2			Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete. Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ esaustive -caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a). -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).	Tutti	1.00

Tabella C8A.2.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte, f_m = resistenza media a compressione della muratura, τ_0 = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura

Tipologia di muratura	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14



Tali valori vanno di norma ridotti mediante i Fattori di Confidenza definiti al capitolo C8A.1.A.4 della Circolare e riportati schematicamente nella tabella C8A.1.1 in funzione del Livello di Conoscenza raggiunto.

Nel caso di analisi elastica con il fattore q (analisi lineare statica ed analisi dinamica modale con coefficiente di struttura), i valori di calcolo delle resistenze sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza e per il coefficiente parziale di sicurezza dei materiali.

Nel caso di analisi non lineare, i valori di calcolo delle resistenze da utilizzare sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza.

Il valore del coefficiente di sicurezza del materiale γ_M è riportato in tabella 4.5.II delle NTC in funzione della Classe di Esecuzione e della categoria degli elementi resistenti.

Tabella 4.5.II. Valori del coefficiente γ_M in funzione della classe di esecuzione e della categoria degli elementi resistenti

Materiale	Classe di esecuzione	
	1	2
Muratura con elementi resistenti di categoria I, malta a prestazione garantita	2,0	2,5
Muratura con elementi resistenti di categoria I, malta a composizione prescritta	2,2	2,7
Muratura con elementi resistenti di categoria II, ogni tipo di malta	2,5	3,0

Nel caso di analisi elastica in condizione sismica il valore di γ_M deve essere posto pari a 2 (capitolo 7.8.1.1 delle NTC2008).



5.2.2 Resistenza Nastri CAM

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

- spessore 0.9 – 1.0 mm e larghezza 19 mm
- resistenze a snervamento $f_{yk} = 240 \text{ N/mm}^2$ e a rottura $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$
- allungamento a rottura almeno pari al 40%.

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 $\gamma_{M0} = 1,05$ e $\gamma_{M2} = 1,25$

Si considera quindi una tensione di calcolo pari a

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 228 \text{ N/mm}^2$$



5.3 SCHIACCIAMENTO (*Istruzioni CNR DT200/2004*)

NOTA: I nastri degli avvolgimenti orizzontali e verticali realizzano un diatono metallico artificiale la cui efficacia è aumentata dal tensionamento dei nastri ad un valore prossimo a quello di snervamento e dalla presenza di una piastra imbutita di contrasto.

Le normative vigenti esprimono la presenza di un collegamento trasversale dei paramenti con l'applicazione di un coefficiente moltiplicativo riportato in tabella C8A.2.1. applicato ai soli parametri di resistenza (f_m e τ_0).

Il coefficiente moltiplicativo della norma potrebbe avere delle variazioni legate al numero di diatoni trasversali presenti.

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:

$$N_{Rmc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md}$$

Dove:

$\gamma_{Rd} = 1.1$ è il coefficiente parziale della muratura confinata;

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:

$$f_{mcd} = f_{md} + k' \cdot f_{l,eff}$$



Dove

$f_{1,eff}$ è la pressione efficace di confinamento (funzione della forma del confinamento)

k' coefficiente adimensionale di incremento di resistenza

$$k' = \frac{g_m}{1000} \text{ con } g_m \text{ densità di massa della muratura in Kg/m}^3$$

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:

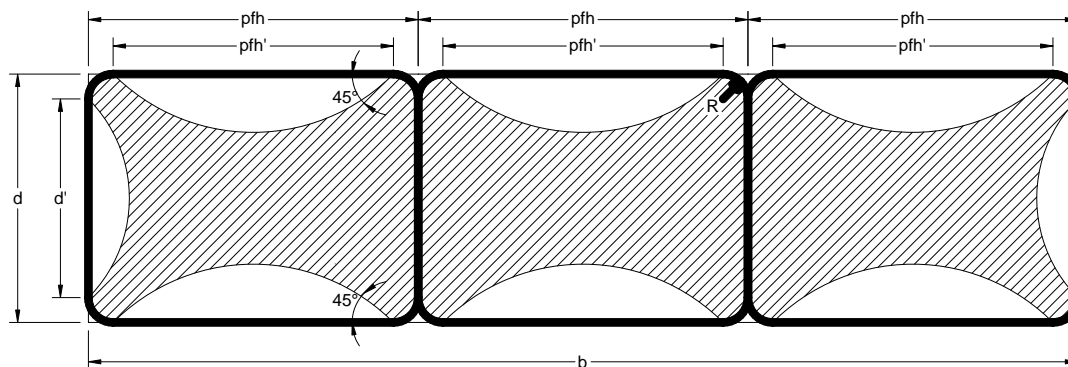
$k_{eff} = k_H k_V$ è il coefficiente di efficienza del confinamento

k_H è il coefficiente di efficienza orizzontale

k_V è il coefficiente di efficienza verticale

La pressione di confinamento f_1 , di un pannello murario di larghezza b e spessore d confinato con nastri CAM con passo orizzontale p_{fh} è dato da

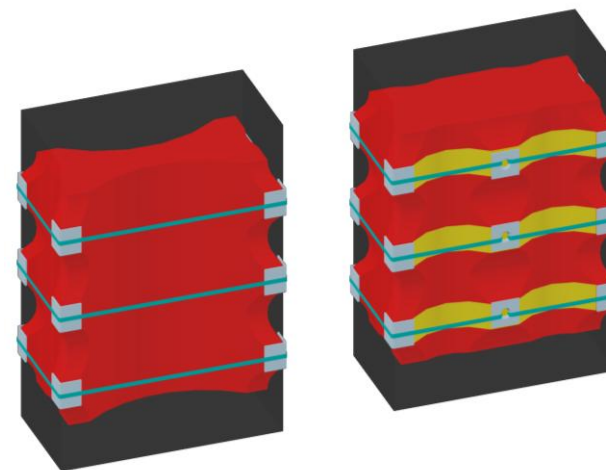
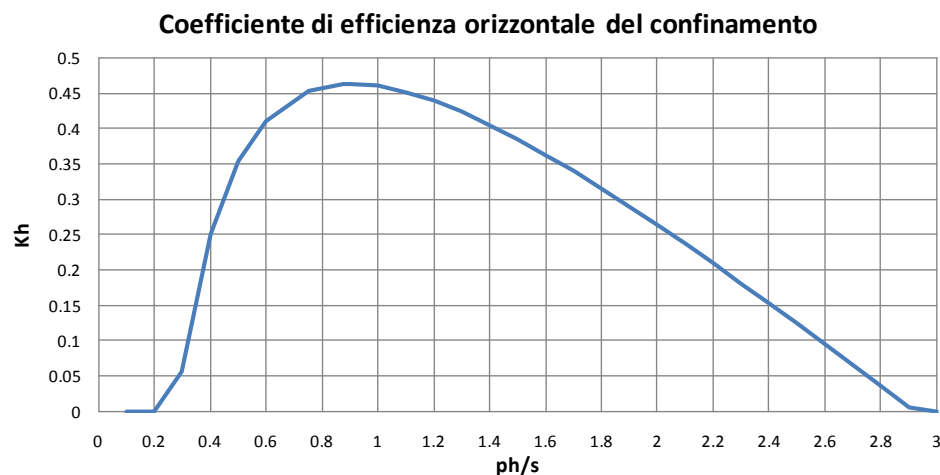
$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_s \cdot f_{yd}, \quad \rho_s = \frac{4 \cdot t_{ft} \cdot b_f}{\max(p_{fh}, d) \cdot p_{fv}}$$





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

$$k_H = 1 - \frac{p_{fh}'^2 + d'^2}{3 \cdot A_m} = 1 - \frac{(p_{fh} - 2R)^2 + (d - 2R)^2}{3 \cdot p_{fh} \cdot d},$$



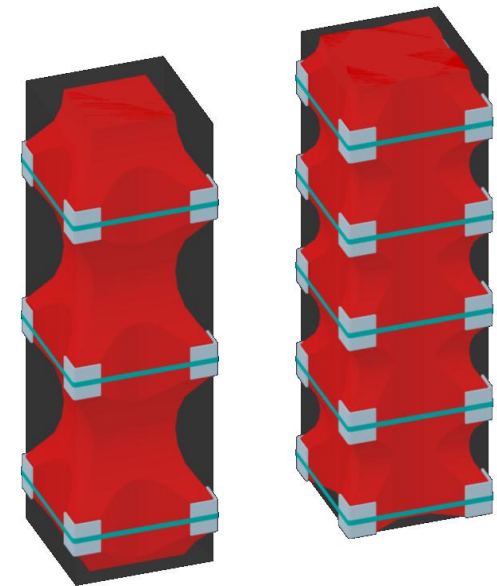
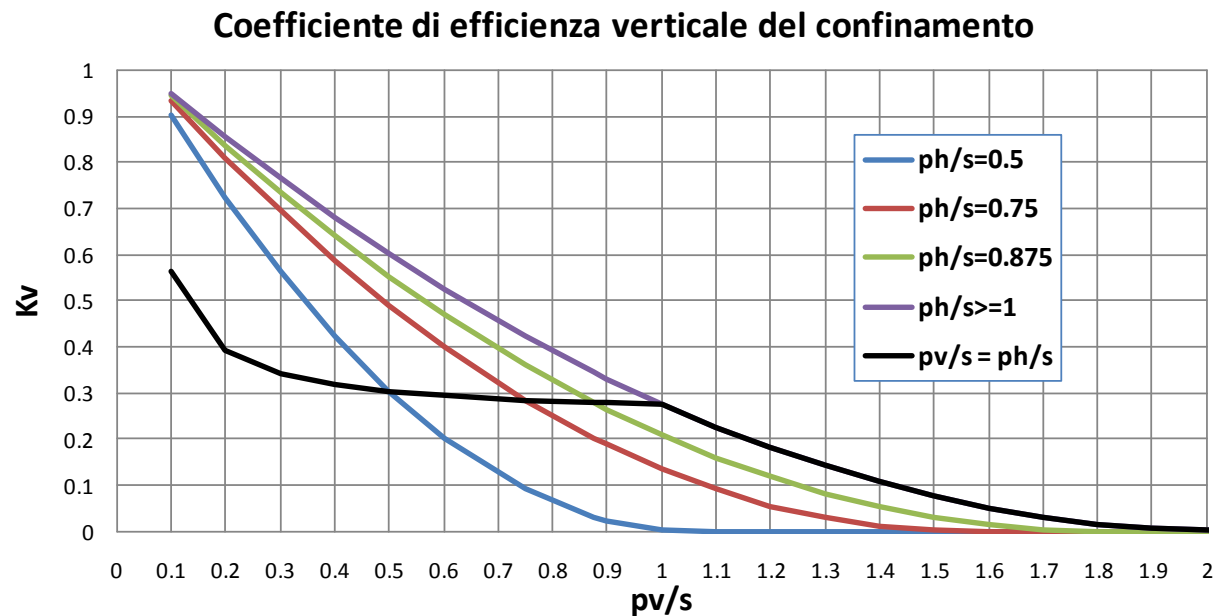
Dall'andamento del grafico del coefficiente di efficienza si evince come si abbia un massimo quando il rapporto $ph/s=1$ che corrisponde ad una geometria confinata quadrata, geometria dunque di massima “efficienza” del confinamento. Questa condizione è facilmente realizzabile per spessori di muratura importanti (>60-70cm) mentre lo è molto meno per spessori ridotti (30-40cm) visto il numero elevato di forature necessarie.

Da notare inoltre come il coefficiente diminuisca velocemente anche per un passo minore dello spessore (diversamente da quanto si possa attendere) poiché la geometria confinata tende sempre più verso un rettangolo allungato (geometria meno “efficiente”).



Il **coefficiente di efficienza verticale** vale:

$$k_v = \left(1 - \frac{p'_{fv}}{2 \cdot \min\{p_{fh}, d\}} \right)^2 = \left(1 - \frac{p_{fv} - b_f}{2 \cdot \min\{p_{fh}, d\}} \right)^2$$



Il grafico del coefficienta verticale dipende dai valori del passo orizzontale dei nastri poiché questi definiscono la geometria in pianta confinata. Sono state dunque diagrammate diverse curve di K_v relative a diversi passi ph . In particolare si nota come K_v aumenti all'aumentare di ph fino a raggiungere il massimo non appena ph risulti maggiore dello spessore.



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:

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

5.4 PRESSOFLESSIONE NEL PIANO (DM 2008)

La verifica a pressoflessione della muratura, analogamente al calcestruzzo, può essere eseguita sia con analisi lineare che non lineare. Nel caso di verifica non lineare è fondamentale la scelta del diagramma tensione-deformazione. 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}

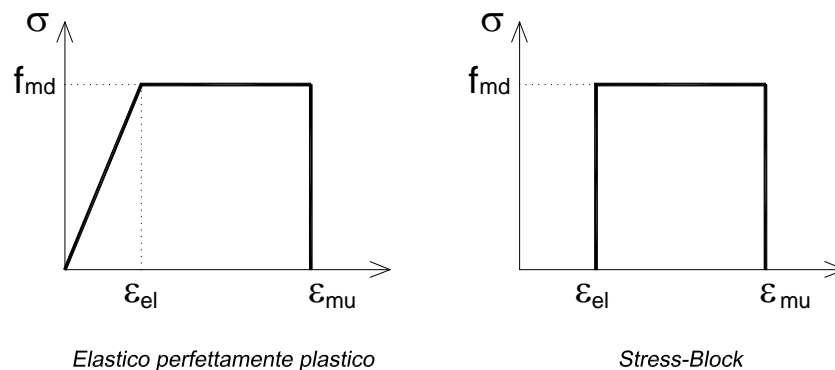
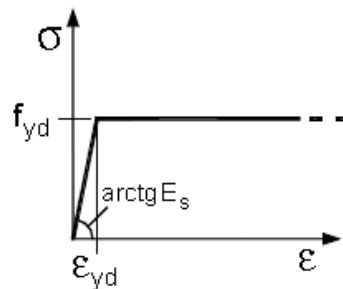




Diagramma di calcolo tensione-deformazione dell'acciaio dei nastri inox



5.4.1 Muratura non armata

5.4.1.1 Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008)

Le normative vigenti esprimono la resistenza a pressoflessione di una muratura non rinforzata come:

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

dove

L è la lunghezza del pannello

t è lo spessore del pannello

f_m resistenza media a compressione della muratura non rinforzata ridotta per il fattore di conoscenza FC

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



5.4.1.2 Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)

Nel caso di comportamento della muratura di tipo elastico perfettamente plastico si ha:

$$M_{Rm} = \frac{f_{md} \cdot t}{2} \left[(x - x_{el}) \cdot (L - (x - x_{el})) + \frac{x_{el}}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} - x + \frac{2}{3} x_{el} \right) \right]$$

Dove

$$x_{el} = \frac{x \cdot f_{md}}{\varepsilon_{mu} \cdot E_m} \quad \text{posizione della fibra da cui parte la plasticità nella muratura}$$

$$x = \frac{\sigma_0 \cdot L}{f_{md} \cdot \left(1 - \frac{f_{md}}{2 \cdot \varepsilon_{mu} \cdot E_m} \right)} \quad \text{posizione dell'asse neutro rispetto al lembo compresso}$$



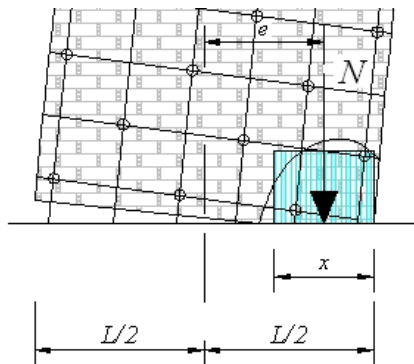
5.4.2 Muratura Rinforzata mediante Sistema CAM

5.4.2.1 Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008)

La resistenza a pressoflessione di una muratura armata, a cui il sistema CAM è assimilato, viene valutata secondo quanto previsto dalle nuove NTC2008 al punto 7.8.3.2.1 e cioè assumendo un diagramma delle compressioni rettangolare, con profondità $0.8 x$, dove x rappresenta la profondità dell'asse neutro, e sollecitazione pari a $0.85f_m$. Le deformazioni massime considerate sono pari a ϵ_{mc} della muratura compressa confinata ($>$ rispetto alla $\epsilon_m = 0.0035$ della muratura originaria) e $\epsilon_s = 0.01$ per l'acciaio teso.

Per ϵ_{mc} vd. aumento duttilità per confinamento trasversale – SCHIACCIMENTO.

NOTA: Nel caso in cui il passo verticale dei nastri sia inferiore alla profondità dell'asse neutro nella zona compressa, la resistenza ultima della muratura può essere incrementata per la presenza del confinamento realizzato dalle legature orizzontali purché nella fascia verticale di interesse non siano a quince ma richiuse su ogni singolo incrocio (vd. aumento resistenza per confinamento trasversale – SCHIACCIMENTO) (dettagliare meglio anche in figura).



Schema di calcolo della resistenza a Pressoflessione



Nella determinazione della resistenza a pressoflessione influiscono quindi

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

s_{vert} interasse degli avvolgimenti verticali

Con la seguente formulazione del momento resistente:

$$M_{Rd} = (0.85 \cdot f_{mr}) \cdot 0.8x \cdot t \cdot \left(\frac{L}{2} - 0.4x \right) + f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot (L - x) \cdot \frac{x}{2}$$

Dove

f_{mc} resistenza di calcolo a compressione della muratura confinata (vd. SCHIACCIAMENTO)

f_{yd} tensione di calcolo del nastro

$$x = \frac{\sigma_0 \cdot L \cdot t + A_s / s_{vert} \cdot f_{yd} \cdot L}{0.8 \cdot (0.85 \cdot f_m) \cdot t + A_s / s_{vert} \cdot f_{yd}}$$

NOTA: la valutazione del momento resistente ultimo in questo caso è determinata con l'ipotesi di diagramma a blocchi e pertanto risente dell'approssimazione sulla effettiva tensione di snervamento delle maglie eventualmente più prossime all'asse neutro

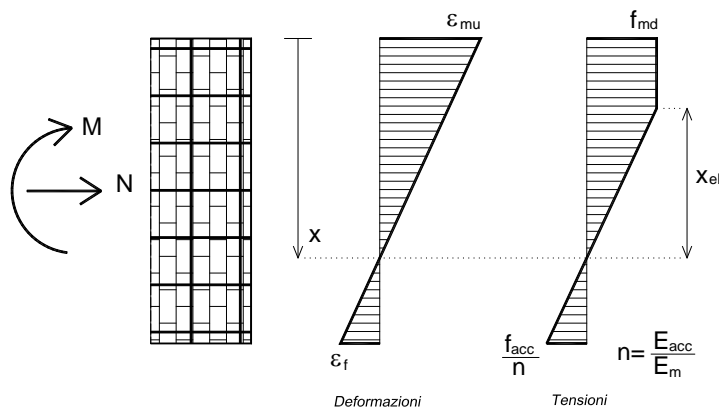


5.4.2.2 Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)

Nel caso di muratura rinforzata, analogamente al calcestruzzo, utilizzando il modello triangolo-rettangolo per la muratura e per l'acciaio nascono diverse regioni in cui il comportamento è diversificato dal fatto che l'acciaio o la muratura siano o meno plasticizzati. Nel caso in esame visto il basso tenore di armatura e l'elevato rapporto tra i moduli elastici tra la muratura e l'acciaio il caso in cui la muratura non sia plasticizzata non verrà preso in considerazione. Pertanto si distingueranno solo due regioni.

- **Regione 1.** Muratura plasticizzata e acciaio elastico;
- **Regione 2.** Muratura ed acciaio plasticizzati.

REGIONE 1



La posizione dell'asse neutro può essere ricavata per equilibrio alla traslazione tramite la seguente:

$$N = C - T$$

Dove

$$N = \sigma_o \cdot L \cdot t$$



Dove in σ_0 è compresa sia la tensione dovuta ai carichi verticali sia all'effetto di pretensionamento verticale dei nastri. In pratica si ha:

$$\sigma_0 = \frac{N}{Lt} + \frac{\frac{A_s}{s_{vert}} \cdot \sigma_{pv} \cdot L}{L \cdot t}$$

T e C sono rispettivamente l'integrale delle componenti a trazione e compressione date dall'acciaio e dalla muratura. In particolare si ha:

$$T = \frac{\varepsilon_{mu}}{2x} \cdot (L-x)^2 \cdot E_f \cdot A_s / s_{vert}$$

$$C = f_{md} \cdot t \cdot \left(x - \frac{x_{el}}{2} \right)$$

Dalle quali si ottiene

$$\sigma_o \cdot L \cdot t = f_{md} \cdot t \cdot \left(x - \frac{x_{el}}{2} \right) - \frac{\varepsilon_{mu}}{2x} \cdot (L-x)^2 \cdot E_f \cdot A_s / s_{vert}$$

Da questa equazione risolvendo la funzione su x di secondo grado si ricava la posizione dell'asse neutro. Pertanto per il momento ultimo si ottiene:

$$M_{Rd} = \frac{f_{md} \cdot t}{2} \cdot \left(x^2 - \frac{x_{el}^2}{3} \right) + \frac{\varepsilon_{mu}}{3x} \cdot (L-x)^3 \cdot E_f \cdot A_s / s_{vert} + \sigma_0 \cdot L \cdot t \left(\frac{L}{2} - x \right)$$

E' bene notare come il momento ultimo può essere calcolato in Regione 1 solo se la tensione dell'acciaio rimane inferiore a quella massima di calcolo, scontata del pretensionamento effettuato in fase di posa, ovvero vale la disuguaglianza:

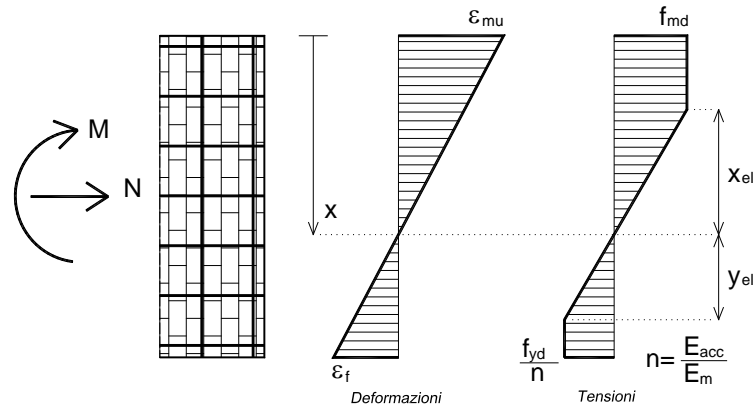


$$f_y = \frac{\varepsilon_{mu}}{x} \cdot (L - x) \cdot E_f \leq (f_{yd} - f_p)$$

Dove

f_p = tensione di pretensionamento dei nastri

REGIONE 2



La posizione dell'asse neutro può essere ricavata per equilibrio alla traslazione tramite la seguente:

$$N = C - T$$

Dove

$$N = \sigma_o \cdot L \cdot t$$

T e C sono rispettivamente l'integrale delle componenti a trazione e compressione date dall'acciaio e dalla muratura. In particolare si ha:

$$T = f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot \left(L - x \cdot \left(1 + \frac{(f_{yd} - f_p)}{2 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{mu}} \right) \right)$$



Dove si è posto

$$y_{el} = \frac{x \cdot (f_{yd} - f_p)}{\varepsilon_{mu} \cdot E_f} \quad \text{posizione della fibra da cui parte la plasticità nell'acciaio}$$

$$C = f_{md} \cdot t \cdot x \cdot \left(1 - \frac{f_{mu}}{2 \cdot E_m \cdot \varepsilon_{mu}} \right)$$

Dalle quali si ottiene per l'asse neutro la seguente espressione:

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L + \sigma_o \cdot L \cdot t}{f_{md} \cdot t \cdot \left(1 - \frac{f_{mu}}{2 \cdot E_m \cdot \varepsilon_{mu}} \right) + f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot \left(1 + \frac{(f_{yd} - f_p)}{2 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{mu}} \right)}$$

Per il momento ultimo si ottiene dunque:

$$M_{Rd} = \frac{f_{md} \cdot t}{2} \cdot \left(x^2 - \frac{x_{el}^2}{3} \right) + \frac{f_{yd} \cdot A_s / s_{vert}}{2} \cdot \left[(L - x)^2 - \frac{y_{el}^2}{3} \right] + \sigma_o \cdot t \cdot L \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right)$$



5.5 PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO – FLESSIONE VERTICALE (DM 2008)

Relativamente alle verifiche fuori piano è possibile ricavare il valore di resistenza allo SLU della sezione pressoinflessa in muratura. Il calcolo delle sollecitazioni agenti fuori dal piano, come previsto dalla normativa, costituiscono verifiche locali e devono essere eseguite a parte senza coinvolgere il comportamento globale dell'intera struttura. Per tale motivo non è necessario effettuare un calcolo non lineare (pushover) delle sollecitazioni ma è sufficiente un calcolo lineare per equilibrio.

Le verifiche di sicurezza vengono pertanto eseguite confrontando direttamente il momento resistente con quello agente.

Il calcolo del momento resistente, che di seguito si espone, può essere effettuato mediante una opportuna scelta del diagramma tensione-deformazione. Le tensioni nella muratura e nell'armatura si dedurranno, a partire dalle deformazioni, utilizzando i rispettivi diagrammi tensione-deformazione.

5.5.1 Muratura non armata

5.5.1.1 Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008)

Le normative vigenti esprimono la resistenza a pressoflessione di una muratura non rinforzata come:

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

dove

L è la lunghezza del pannello

t è lo spessore del pannello

f_m resistenza media a compressione della muratura non rinforzata ridotta per il fattore di conoscenza FC

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



5.5.1.2 Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)

Nel caso di comportamento della muratura di tipo elastico perfettamente plastico si ha:

$$M_{Rm} = \frac{f_{md} \cdot L}{2} \cdot \left(x^2 - \frac{x_{el}^2}{3} \right) + \sigma_0 \cdot L \cdot t \cdot \left(\frac{t}{2} - x \right)$$

Dove

$$x_{el} = \frac{x \cdot f_{md}}{\varepsilon_{mu} \cdot E_m} \quad \text{posizione della fibra da cui parte la plasticità nella muratura}$$

$$x = \frac{\sigma_0 \cdot t}{f_{md} \cdot \left(1 - \frac{f_{md}}{2 \cdot \varepsilon_{mu} \cdot E_m} \right)} \quad \text{posizione dell'asse neutro rispetto al lembo compresso}$$

5.5.2 Muratura rinforzata mediante Sistema CAM

5.5.2.1 Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008)

La formulazione del momento resistente è la seguente:

$$M_{Rd} = (0.85 \cdot f_{mr}) \cdot 0.8x \cdot L \cdot \left(\frac{t}{2} - 0.4x \right) + f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L \cdot \frac{t}{2}$$

Dove

f_{mc} resistenza di calcolo a compressione della muratura confinata (vd. SCHIACCIAMENTO)

 f_{yd} tensione di calcolo del nastro

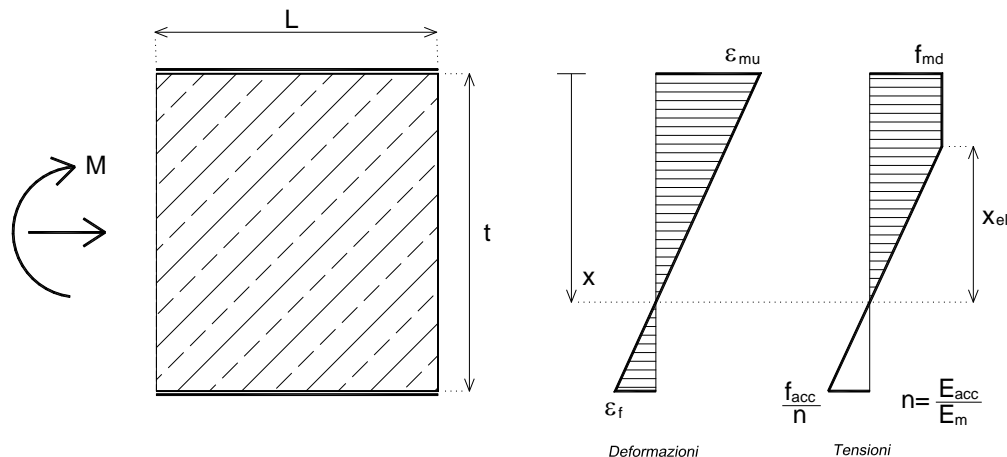
$$x = \frac{\sigma_0 \cdot t + A_s / s_{vert} \cdot f_{yd}}{0.8 \cdot (0.85 \cdot f_m)}$$

5.5.2.2 Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)

Nel caso di muratura rinforzata, analogamente al calcestruzzo, utilizzando il modello triangolo-rettangolo per la muratura e per l'acciaio nascono diverse regioni in cui il comportamento è diversificato dal fatto che l'acciaio o la muratura siano o meno plasticizzati. Nel caso in esame visto il basso tenore di armatura e l'elevato rapporto tra i moduli elastici tra la muratura e l'acciaio il caso in cui la muratura non sia plasticizzata non verrà preso in considerazione. Pertanto si distingueranno solo due regioni.

- **Regione 1.** Muratura plasticizzata e acciaio elastico;
- **Regione 2.** Muratura ed acciaio plasticizzati.

REGIONE 1





La posizione dell'asse neutro può essere ricavata per equilibrio alla traslazione tramite la seguente:

$$N = C - T$$

Dove

$$N = \sigma_o \cdot L \cdot t$$

Dove in σ_o è compresa sia la tensione dovuta ai carichi verticali sia all'effetto di pretensionamento verticale dei nastri. In pratica si ha:

$$\sigma_o = \frac{N}{Lt} + \frac{\frac{2 \cdot A_s}{s_{vert}} \cdot \sigma_{pv} \cdot L}{L \cdot t}$$

T e C sono rispettivamente l'integrale delle componenti a trazione e compressione date dall'acciaio e dalla muratura. In particolare si ha:

$$T = \frac{\varepsilon_{mu}}{2x} \cdot L \cdot (t - x) \cdot E_f \cdot \frac{A}{s_{vert \ s}}$$

Ponendo

$$x_{el} = \frac{x \cdot f_{md}}{\varepsilon_{mu} \cdot E_m}, \text{ posizione della fibra da cui parte la plasticità nella muratura}$$

Si ha

$$C = f_{md} \cdot L \cdot x \cdot \left(1 - \frac{f_{md}}{2 \cdot \varepsilon_{mu} \cdot E_m} \right)$$

Dalle quali si ottiene



$$\sigma_o \cdot L \cdot t = f_{md} \cdot L \cdot \left(x - \frac{x_{el}}{2} \right) - \frac{\varepsilon_{mu}}{2x} \cdot L \cdot (t - x) \cdot E_f \cdot \frac{A}{s_{vert}}$$

Da questa equazione risolvendo la funzione su x di secondo grado si ricava la posizione dell'asse neutro. Pertanto per il momento ultimo si ottiene:

$$M_{Rd} = \frac{f_{md} \cdot L}{2} \cdot \left(x^2 - \frac{x_{el}^2}{3} \right) + \frac{\varepsilon_{mu}}{x} \cdot L \cdot (t - x)^2 \cdot E_f \cdot A_s / s_{vert} + \sigma_o \cdot L \cdot t \cdot \left(\frac{t}{2} - x \right)$$

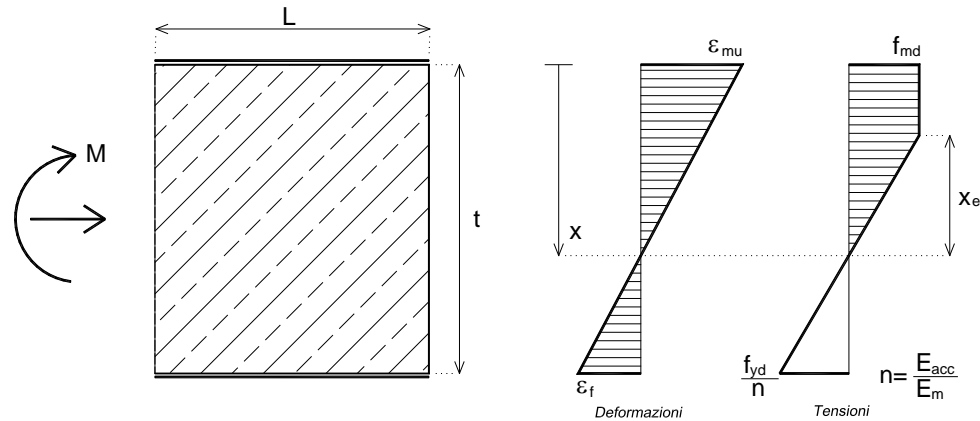
E' bene notare come il momento ultimo può essere calcolato in Regione 1 solo se la tensione dell'acciaio rimane inferiore a quella massima di calcolo, scontata del pretensionamento effettuato in fase di posa, ovvero vale la disuguaglianza:

$$f_y = \frac{\varepsilon_{mu}}{x} \cdot (L - x) \cdot E_f \leq (f_{yd} - f_p)$$

Dove

f_p = tensione di pretensionamento dei nastri

REGIONE 2



La posizione dell'asse neutro può essere ricavata per equilibrio alla traslazione tramite la seguente:

$$N = C - T$$

Dove

$$N = \sigma_o \cdot L \cdot t$$

T e C sono rispettivamente l'integrale delle componenti a trazione e compressione date dall'acciaio e dalla muratura. In particolare si ha:

$$T = f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L$$

$$C = f_{md} \cdot L \cdot x \cdot \left(1 - \frac{f_{mu}}{2 \cdot E_m \cdot \epsilon_{mu}} \right)$$

Dalle quali si ottiene per l'asse neutro la seguente espressione:

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} + \sigma_o \cdot t}{f_{md} \cdot \left(1 - \frac{f_{mu}}{2 \cdot E_m \cdot \epsilon_{mu}} \right)}$$



Per il momento ultimo si ottiene dunque:

$$M_{Rd} = \frac{f_{md} \cdot L}{2} \cdot \left(x^2 - \frac{x_{el}^2}{3} \right) + f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L \cdot (t - x) + \sigma_0 \cdot L \cdot t \cdot \left(\frac{t}{2} - x \right)$$

Dove si è posto:

$$x_{el} = \frac{x \cdot f_{md}}{\varepsilon_{mu} \cdot E_m} \quad \text{posizione della fibra da cui parte la plasticità nella muratura}$$

5.6 PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO – FLESSIONE ORIZZONTALE (DM 2008)

Relativamente alle verifiche fuori piano è possibile ricavare il valore di resistenza allo SLU della sezione inflessa in muratura. Il calcolo delle sollecitazioni agenti fuori dal piano, come previsto dalla normativa, costituiscono verifiche locali e devono essere eseguite a parte senza coinvolgere il comportamento globale dell'intera struttura. Per tale motivo non è necessario effettuare un calcolo non lineare (pushover) delle sollecitazioni ma è sufficiente un calcolo lineare per equilibrio.

Le verifiche di sicurezza vengono pertanto eseguite confrontando direttamente il momento resistente con quello agente.

Il calcolo del momento resistente, che di seguito si espone, può essere effettuato mediante una opportuna scelta del diagramma tensione-deformazione. Le tensioni nella muratura e nell'armatura si dedurranno, a partire dalle deformazioni, utilizzando i rispettivi diagrammi tensione-deformazione.

5.6.1 Muratura non armata

Per la muratura non armata considerando la muratura non reagente a trazione non è possibile scrivere le equazioni di equilibrio, pertanto l'unico metodo è quello della valutazione dello stato compresso dell'arco ideale che viene a generarsi all'interno dello spessore t della parete.



Una volta ricavato il valore di compressione e verificata l'ammissibilità delle tensioni devono essere eseguite le verifiche ad espulsione delle pareti di bordo, che in questo caso funzionano anche da controvento per la parete in esame, e quella a taglio mediante la $f_{vd} = f_{vmo}$ o, tenendo conto dello stato di compressione orizzontale che si genera, anche di una resistenza incrementata grazie alla σ_h , mediante l'espressione:

$$f_{vd} = f_{vmo} + 0.4 \sigma_h$$

5.6.2 Muratura rinforzata mediante Sistema CAM

5.6.2.1 Comportamento rigido-plastico (Stress-Block – DM2008)

La formulazione del momento resistente vale:

$$M_{Rd} = (0.85 \cdot f_{mr}) \cdot 0.48 \cdot x^2 \cdot L + f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L \cdot \frac{t}{2}$$

Dove

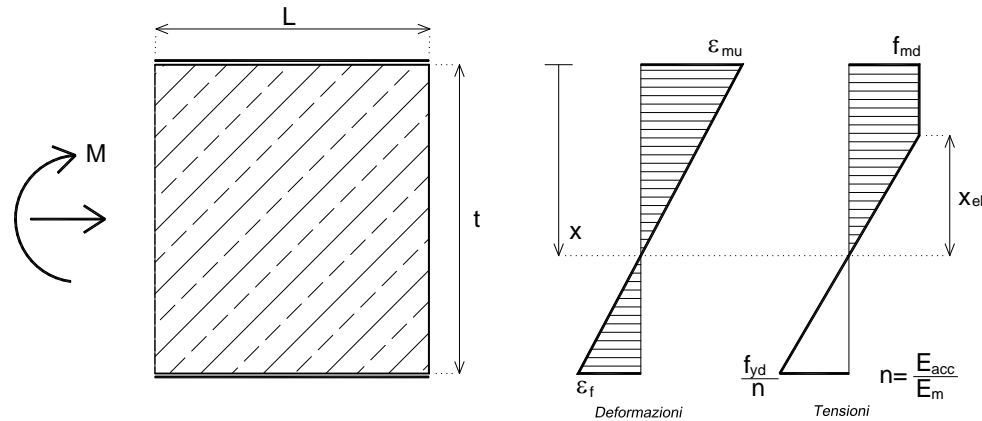
f_{mc} resistenza di calcolo a compressione della muratura confinata (vd. SCHIACCIAMENTO)

f_{yd} tensione di calcolo del nastro

$$x = \frac{A_s / s_{vert} \cdot f_{yd}}{0.8 \cdot (0.85 \cdot f_m)}$$

5.6.2.2 Comportamento elastico-perfettamente plastico (consentito dal DM2008)

Nel caso di muratura rinforzata, analogamente al calcestruzzo, utilizzando il modello triangolo-rettangolo per la muratura e per l'acciaio nascono diverse regioni in cui il comportamento è diversificato dal fatto che l'acciaio o la muratura siano o meno elasticizzati. Nel caso in esame non essendoci compressione il calcolo verrà effettuato nell'unica condizione di muratura ed acciaio plasticizzati.



La posizione dell'asse neutro può essere ricavata per equilibrio alla traslazione tramite la seguente:

$$0 = C - T$$

T e C sono rispettivamente l'integrale delle componenti a trazione e compressione date dall'acciaio e dalla muratura. In particolare si ha:

$$T = f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L$$

$$C = f_{md} \cdot L \cdot x \cdot \left(1 - \frac{f_{mu}}{2 \cdot E_m \cdot \varepsilon_{mu}} \right)$$

Dalle quali si ottiene per l'asse neutro la seguente espressione:

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s / s_{vert}}{f_{md} \cdot \left(1 - \frac{f_{mu}}{2 \cdot E_m \cdot \varepsilon_{mu}} \right)}$$

Per il momento ultimo si ottiene dunque:



$$M_{Rd} = \frac{f_{md} \cdot L}{2} \cdot \left(x^2 - \frac{x_{el}^2}{3} \right) + f_{yd} \cdot A_s / s_{vert} \cdot L \cdot (t - x)$$

Dove si è posto:

$$x_{el} = \frac{x \cdot f_{md}}{\varepsilon_{mu} \cdot E_m} \quad \text{posizione della fibra da cui parte la plasticità nella muratura}$$



5.7 NOTE SULL'EFFICACIA DELL'INTERVENTO DI RINFORZO A PRESSOFLESSIONE

Per rendere efficace il ruolo delle armature verticali anche al piano di spiccato dell'intervento (solitamente piano terra), occorre che siano opportunamente prolungate in profondità nella zona sottoterra, eventualmente ancorando lo stesso nastro ripiegato a cappio all'interno del foro di ancoraggio successivamente riempito di legante. In tale modo all'atto della chiusura della legatura di ancoraggio in prima approssimazione si ha la contestuale verifica della sua capacità portante.

La profondità ed il diametro di inghisaggio devono essere dimensionati per trasferire la forza di snervamento delle relative legature.

In prima approssimazione la profondità di ancoraggio deve essere tale da coinvolgere una massa di muratura equivalente alla forza indotta dalla legatura secondo la formulazione seguente

$$L_{\text{foro}} = \frac{f_{yd} \cdot A_{nv}}{p_v \cdot \gamma_M \cdot \frac{t}{2}}$$

Qualora tale intervento non possa essere effettuato, l'incremento a trazione delle legature, nelle verifiche locali a pressoflessione, non potrà essere considerato.



5.8 INCREMENTO DELLA RESISTENZA A PRESSOFLESSIONE PER EFFETTO DEL PRETENSIONAMENTO

Con il sistema CAM, e comunque in generale nel caso sia presente una pretensione delle armature, si può considerare nella formula di resistenza **a pressoflessione**, anche l'incremento di tensione σ_v dovuto ad una possibile pretensione σ_{pv} delle armature verticali $A_{s,vert}$ poste ad interasse s_v .
Si ha quindi che:

$$\sigma_v = \frac{\frac{A_s}{s_{vert}} \cdot \sigma_{pv} \cdot L}{L \cdot t}$$

Con una formula finale della tensione verticale media che vale quindi

$$\sigma_0 = \frac{N}{Lt} + \frac{\frac{A_s}{s_{vert}} \cdot \sigma_{pv} \cdot L}{L \cdot t}$$

NOTA: σ_0 rappresenta la tensione media a compressione del pannello murario ottenuta come somma dello sforzo normale agente più il contributo dovuto all'azione di compattazione delle legature verticali.

σ_{pv} = tensione di tesatura dei nastri

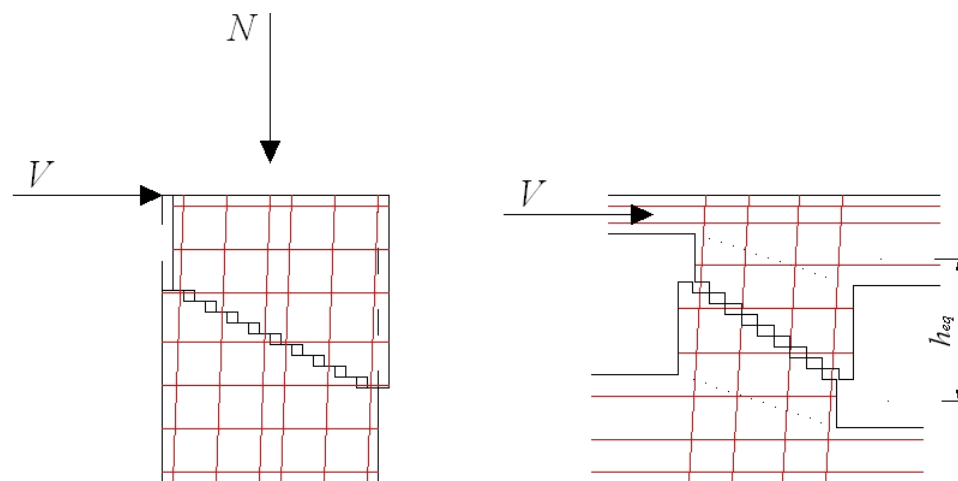


5.9 RESISTENZA A TAGLIO

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.

5.9.1 Taglio per Scorrimento (Mohr-Coulomb)



Meccanismo di rottura per taglio-scorrimento



Le NTC 2008 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 2008 per la muratura armata degli edifici nuovi ed il DT 200 per le murature rinforzate con i compositi 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

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

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

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

$A_{s,orizz}$ 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

5.9.1.1 Incremento della resistenza a taglio per scorrimento della muratura per effetto del pretensionamento

Con il sistema CAM, e comunque in generale nel caso sia presente una pretensione delle armature, si può considerare nella formula di resistenza **taglio per scorrimento** anche l'incremento di tensione verticale σ_v dovuti ad una possibile pretensione σ_{pv} delle armature verticali $A_{s,vert}$ poste ad interasse s_v .

E' da sottolineare che tale incremento può essere considerato solo nel contributo della resistenza della muratura.

Si ha quindi che:

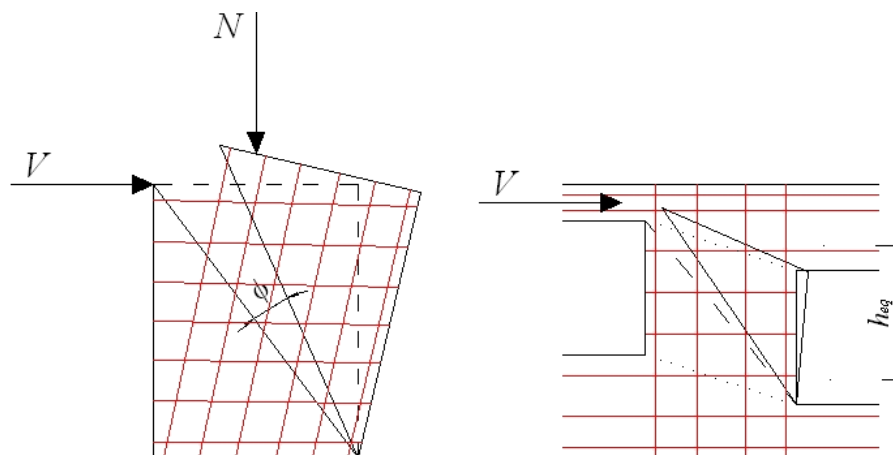
$$\sigma_v = \frac{\sigma_{pv} \cdot A_{s,vert}}{t \cdot s_{vert}} \quad \sigma_v \text{ è parallela all'asse dell'elemento (verticale) e si somma a } \sigma_n \text{ dovuta ad N}$$

Con una formula finale del taglio per scorrimento che vale

$$V_t = d \cdot t \cdot (f_{vd} + 0.4 \cdot (\sigma_v + \sigma_n)) + \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,orizz} \cdot f_{yd}}{s_{orizz}}$$



5.9.2 Taglio per Fessurazione Diagonale (Turnsek-Cacovic)



Meccanismo di rottura per taglio-fessurazione

Nota: occorre osservare che una rottura a scaletta a 45° comporta che nei pannelli alti non tutti i nastri orizzontali vengono interessati dalla lesione e, quindi, non tutti sono efficaci per contrastare gli scorrimenti. Per tale motivo nella formulazione che segue viene ridotta l'influenza dei nastri orizzontali mediante il fattore b .

Le NTC 2008 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

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

Nel punto 7.8.3.2.2 dell'NTC 2008¹ la resistenza a taglio di una muratura armata, a cui si può assimilare il sistema CAM, considerando il contributo aggiuntivo dell'armatura, è espressa dalla formula del taglio-fessurazione come:

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

Dove:

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

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

s_{orizz} è l'interasse degli avvolgimenti orizzontali

Si evidenzia come il valore di τ_0 vada diviso per il **fattore di confidenza FC** e per analisi elastica anche **per il coefficiente di sicurezza del materiale**.

¹ Vedi anche l'articolo di Francesca da Porto, Claudio Modena, Flavio Mosele "Comportamento ciclico nel piano di un sistema di muratura armata"



Nella formulazione presentata si differenziano due contributi:

$$V_{t,M} = L \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}} \quad \text{che rappresenta il contributo relativo alla resistenza della muratura}$$

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

5.9.2.1 Incremento della resistenza a taglio per fessurazione della muratura per effetto del pretensionamento

Con il sistema CAM, e comunque in generale nel caso sia presente una pretensione delle armature, si può considerare nella formula di resistenza **taglio-fessurazione** anche l'incremento di tensione verticale σ_v e di tensione orizzontale σ_H dovuti ad una possibile pretensione σ_{pv} delle armature verticali $A_{s,vert}$ poste ad interasse s_v e ad una possibile pretensione σ_{po} delle armature orizzontali $A_{s,orizz}$ poste ad interasse s_o .
E' da sottolineare che tale incremento può essere considerato solo nel contributo della resistenza della muratura.

Per i **maschi murari** si ha che:

$$\sigma_v = \frac{\sigma_{pv} \cdot A_{s,vert}}{t \cdot s_{vert}} \quad \sigma_v \text{ è parallela all'asse dell'elemento (verticale) e si somma a } \sigma_0 \text{ dovuta ad N}$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{po} \cdot A_{s,orizz}}{t \cdot s_{orizz}} \quad \sigma_H \text{ è ortogonale all'asse dell'elemento}$$



Con una formula finale del taglio resistente per i maschi pari a

$$V_{t,maschi} l \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{(\sigma_0 + \sigma_V) + (\sigma_H)}{1.5 \cdot \tau_{0d}} + \frac{(\sigma_0 + \sigma_V) \cdot (\sigma_H)}{(1.5 \cdot \tau_{0d})^2}} + \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,orizz} \cdot f_{yd}}{s_{orizz}}$$

Per le **fasce o travi di accoppiamento in muratura**² (secondo la dizione del NTC 2008) si ha che:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{pv} \cdot A_{s,vert}}{t \cdot s_{vert}} \quad \sigma_H \text{ è parallela all'asse dell'elemento (orizzontale) e si somma a } \sigma_0 \text{ dovuta ad N}$$

$$\sigma_V = \frac{\sigma_{po} \cdot A_{s,orizz}}{t \cdot s_{orizz}} \quad \sigma_V \text{ è ortogonale all'asse dell'elemento}$$

Con una formula finale del taglio resistente per le fasce pari a:

$$V_{t,fasce} = l \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{(\sigma_0 + \sigma_H) + (\sigma_V)}{1.5 \cdot \tau_{0d}} + \frac{(\sigma_0 + \sigma_H) \cdot (\sigma_V)}{(1.5 \cdot \tau_{0d})^2}} + \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,vert} \cdot f_{yd}}{s_{vert}}$$

Per le fasce, il contributo esplicito dell'armatura al taglio resistente come area di acciaio è la seguente

$$\frac{0.6 \cdot d \cdot A_{s,vert} \cdot f_{yd}}{s_{vert}}$$

NOTA: In alcuni codici di calcolo può non essere preso in considerazione.

² Per fascia o trave in muratura si intende la porzione di muratura al di sopra o al di sotto dei profili orizzontali delle aperture di larghezza pari all'apertura stessa.



6 NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- **DM 14 Gennaio 2008:** *“Norme tecniche per le costruzioni”* (Testo Unico 2008).
- **Circolare 617 del 02/02/2009:** *‘Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.’*
- **UNI EN 1990:2006 Aprile 2006 Eurocodice:** *“Criteri generali di Progettazione generale”*.
- **UNI EN 1992-1-1:2005 Novembre 2005 Eurocodice 2:** *“Progettazione delle strutture di calcestruzzo”*.
- **UNI EN 1993-1-1:2005 Agosto 2005 Eurocodice 3:** *“Progettazione delle strutture di acciaio”*.
- **UNI EN 1996-1-1:2006 Gennaio 2006 Eurocodice 6:** *“Progettazione delle strutture di muratura - Parte 1-1: Regole generali per strutture di muratura armata e non armata”*.
- **UNI EN 1998-1:2005 Marzo 2005 Eurocodice 8:** *“Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici”*.
- **UNI EN 1998-3:2005 Agosto 2005 Eurocodice 8:** *“Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 3: Valutazione e adeguamento degli edifici”*.
- **Decreto 20 Novembre 1987:** *“Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento”*
- **CNR DT 200/2004:** *“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”*;
- **Dolce,M. Cacosso, A. Ponzo, F.C. Marnetto, R. (2002).** *New Technologies for the Structural Rehabilitation of Masonry Constructions: Concept, Experimental Validation and Application of the CAM System, Seminar “The Intervention On Built Heritage: Conservation and Rehabilitation Practices”, Porto, 2-4 October 2002. Invited lecture.*