

guida operativa

MODULOCOS

Consolidamento per edifici in muratura

www.stacec.com

VEM_{NL}

Software per edifici in muratura



 **STACEC**

COPYRIGHT

Tutto il materiale contenuto nella confezione (CD contenente i file dei software, chiave di protezione, altri supporti di consultazione) è protetto dalle leggi e dai trattati sul copyright, nonché dalle leggi e trattati sulle proprietà intellettuali.

E' vietata la cessione o la sublicenzianzione del software a terzi.

E' altresì vietata la riproduzione del presente manuale in qualsiasi forma e con qualsiasi mezzo senza la preventiva autorizzazione scritta del produttore.

Informazioni e permessi sui prodotti o parti di essi possono essere richiesti a:



Stacec s.r.l.
Software e servizi per l'ingegneria
Corso Umberto I, 358
89034 – Bovalino (RC)

Tel. 0964/67211
Fax. 0964/61708



Data revisione. 10/2014.
VEM 19.0.0



Modulo **CoS**

Consolidamenti per edifici in muratura

Introduzione

Il modulo **CoS – Consolidamento strutturale** di VEM_{NL} consente di effettuare il calcolo di strutture in muratura consolidate. **CoS** si può utilizzare quando si calcola la struttura con l'analisi statica non lineare (metodo pushover) secondo le normative OPCM 3274, DM 2005 e DM 2008.

In questa sezione vengono descritte le tipologie di consolidamento previste in **CoS** che si possono utilizzare all'interno del software VEM nella **versione 10**:

- **Cuci-Scuci**
- **Intonaco armato**
- **Pareti c.a.**
- **Iniezioni di malta**
- **Diatoni artificiali**
- **Telaio metallico**
- **Cerchiature**
- **Tiranti**
- **Consolidamento con FRP**
- **Consolidamento di volte con tiranti**
- **Consolidamento di volte con FRP**

Il software consente di consolidare anche elementi in c.a. (pilastri e travi), solai e fondazioni. Per ulteriori chiarimenti su questi ultimi consolidamenti consultare il documento “Manuale PGA e consolidamenti”.

Cuci-Scuci

L'obiettivo di questa tipologia di consolidamento è quella di ripristinare la resistenza di un muro in prossimità delle lesioni. Il cuci-scuci ripristina la resistenza della muratura attribuendo alla nuova muratura sostituita le caratteristiche meccaniche della muratura esistente.

Negli elaborati grafici la superficie di muratura sostituita è indicativa.

Intonaco armato

Il consolidamento consiste nel realizzare due pareti di materiale cementizio aderenti alla parete in muratura da sanare, armate con una rete metallica e resi solidali da tiranti di acciaio (connettori trasversali) passanti attraverso la muratura. Per essere efficaci i connettori trasversali devono essere ancorati alle pareti in c.a. La miscela con la quale vengono realizzate le lastre possono essere di tre tipi:

- Guinite: mescola di sabbia e cemento con rapporto 4:1 diluita con acqua fino a raggiungere una buona fluidità.
- Intonaco di malta cementizia con alto contenuto di cemento (betoncino).
- Conglomerato cementizio (generalmente si utilizza quando si interviene da un solo lato della parete).



Generalmente nelle miscele si utilizzano prodotti antiritiro o espansivi per evitare fessurazioni indesiderate.

Le operazioni di consolidamento dovrebbero avvenire quanto più possibile in modo simmetrico in pianta in modo da non indurre effetti torsionali. L'intonaco armato altera notevolmente la distribuzione delle rigidezze dell'intero edificio. Quando si esegue questo tipo di consolidamento è opportuno partire dai piani più bassi in modo da creare una continuità fino in fondazione.

La procedura di esecuzione si articola nelle seguenti fasi:

- 1) **Preparazione della parete:** asportazione dell'intonaco, spazzolatura e lavaggio della muratura con getto di aria o acqua a bassa pressione e stuccatura con malta cementizia a presa rapida di fessure e vuoti macroscopici.
- 2) **Perforazioni:** realizzazione dei fori trasversali alla parete per l'alloggiamento delle barre di armatura. Tali fori devono essere distribuiti in modo uniforme su tutta la parete e devono essere leggermente inclinati in modo da agevolare il successivo riempimento con malta cementizia. Generalmente sono richieste 4÷6 perforazioni per metro quadro con diametro di circa 40 mm
- 3) **Inserimento dei tiranti:** Si utilizzano tondini per c.a. ad aderenza migliorata con diametro 6÷8 mm. Una volta collocate le barre è opportuno sigillarle con iniezioni di malta.
- 4) **Posizionamento delle armature:** In genere si utilizzano delle reti elettrosaldate con barre del diametri di 4÷8 mm e con maglia 15x15 oppure 20x20 cm. E' buona norma svoltare la rete di almeno 50÷100 cm in corrispondenza delle intersezioni con le murature ortogonali o in corrispondenza di porte o finestre.
- 5) **Esecuzione delle lastre:** L'ultima fase dell'intervento è quello della posa in opera delle lastre di miscela legante che possono essere realizzate con le miscele viste sopra.

Considerazioni numeriche:

Per il calcolo di pareti consolidate con intonaco armato si ricorre alle sperimentazioni effettuate da alcuni enti universitari. I parametri che entrano in gioco sono:

Spessore delle lastre: Incrementando lo spessore delle lastre in ca, si può verificare che la resistenza della parete diminuisca. Da sperimentazioni fatte (Università di Padova), si è constatato che il massimo incremento di resistenza della parete si raggiunge quando lo spessore delle lastre è di 3 cm. Può anche capitare che spessori maggiori migliorano il comportamento globale della struttura in quanto si ha un incremento dello spessore resistente della parete (anche se diminuisce la resistenza).

Numero di connettori trasversali: Incrementando il numero delle barre, la resistenza della parete aumenta. La massima resistenza si raggiunge quando sono presenti 4 barre di armatura per metro quadro. Un maggiore numero di barre non da alcun contributo di miglioramento alla resistenza. Se si utilizza un numero di barre minore di 4, la resistenza della parete diminuisce. Il numero minimo previsto è di 2 barre per metro quadro.

Diametro dei connettori trasversali: Incrementando il diametro delle barre, aumenta la resistenza della parete. La massima resistenza si raggiunge quando il diametro delle barre è 8 mm. Un diametro maggiore non da alcun contributo di miglioramento alla resistenza. Se si utilizza un diametro minore, la resistenza della parete diminuisce. Il diametro minimo previsto è di 6 mm.

Maglia della rete elettrosaldata: Diminuendo la maglia della rete elettrosaldata, aumenta la resistenza della parete. La massima resistenza si raggiunge quando la maglia è di 15 cm. Una maglia minore non da alcun contributo di miglioramento alla resistenza. Se si utilizza un maglia maggiore, la resistenza della parete diminuisce. La minima resistenza si raggiunge per reti con maglia 30 cm.

Diametro della rete elettrosaldata: Incrementando il diametro della rete, aumenta la resistenza della parete. La massima resistenza si raggiunge quando il diametro della rete è 8 mm. Un diametro maggiore non da alcun contributo di miglioramento alla resistenza. Se si utilizza un diametro minore, la resistenza della parete diminuisce. Il diametro minimo previsto è di 6 mm.

Pareti c.a.

Il consolidamento consiste nel realizzare una o due pareti in cemento armato aderenti alla parete in muratura da consolidare. Per essere efficace il consolidamento i connettori trasversali devono essere ancorati alle pareti in c.a. Le operazioni di consolidamento dovrebbero avvenire quanto più possibile in modo simmetrico in pianta in modo da non indurre effetti torsionali. Le pareti in c.a. altera notevolmente la distribuzione delle rigidezze dell'intero edificio. Quando si esegue questo tipo di consolidamento è opportuno partire dai piani più bassi in modo da creare una continuità fino in fondazione.

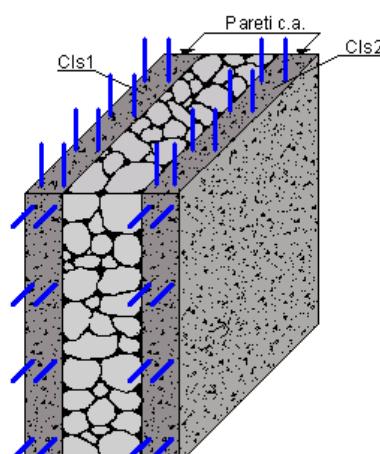
La procedura di esecuzione si articola nelle seguenti fasi:

- 1) **Preparazione della parete:** asportazione dell'intonaco, spazzolatura e lavaggio della muratura con getto di aria o acqua a bassa pressione e stuccatura con malta cementizia a presa rapida di fessure e vuoti macroscopici.
- 2) **Perforazioni:** realizzazione dei fori trasversali alla parete per l'alloggiamento delle barre di armatura. Tali fori devono essere distribuiti in modo uniforme su tutta la parete e devono essere leggermente inclinati in modo da agevolare il successivo riempimento con malta cementizia. Generalmente sono richieste 4÷6 perforazioni per metro quadro con diametro di circa 40 mm
- 3) **Inserimento dei tiranti:** Si utilizzano tondini per c.a. ad aderenza migliorata con diametro 6÷8 mm. Una volta collocate le barre è opportuno sigillarle con iniezioni di malta.
- 4) **Posizionamento delle armature:** In genere si utilizzano delle ferri del diametri di 8÷12 mm per i verticali e ferri con diametri di 8÷10 mm per gli orizzontali.
- 5) **Preparazione delle casseforme:** Preparazione dei casseri per consentire il getto di calcestruzzo.
- 6) **Esecuzione delle pareti:** L'ultima fase dell'intervento è quello della posa in opera delle pareti di calcestruzzo.

Considerazioni numeriche:

La parete in muratura consolidata affiancando pareti in cemento armato viene modellata considerando un comportamento meccanico equivalente tra muratura e c.a. Le grandezze meccaniche calcolate vengono ulteriormente moltiplicate per dei coefficienti riduttivi per tenere conto delle altre condizioni che possono influenzare il calcolo quali:

- Numero di connettori trasversali
- Diametro dei connettori trasversali
- Area di armatura verticale
- Area di armatura orizzontale



Le caratteristiche meccaniche si ottengono dalle seguenti relazioni di equivalenza:

$$E_{eq} = \frac{E_c \cdot I_1 + E_m \cdot I_m + E_c \cdot I_2}{I_1 + I_m + I_2}$$

$$G_{eq} = \frac{G_c \cdot A_1 + G_m \cdot A_m + G_c \cdot A_2}{A_1 + A_m + A_2}$$

$$f_{eq} = \frac{f_{cd} \cdot A_1 + f_m \cdot A_m + f_{cd} \cdot A_2}{A_1 + A_m + A_2}$$

dove

- E_{eq} è il modulo elastico normale della parete consolidata
- G_{eq} è il modulo elastico tangenziale della parete consolidata
- f_{eq} è la tensione normale della parete consolidata
- E_c è il modulo elastico normale della parete in cls
- E_m è il modulo elastico normale della parete in muratura
- I_1 è il momento d'inerzia della parete cls1
- I_2 è il momento d'inerzia della parete cls2
- I_m è il momento d'inerzia della parete in muratura
- G_c è il modulo elastico tangenziale della parete in cls
- G_m è il modulo elastico tangenziale della parete in muratura
- A_1 è l'area della sezione trasversale della parete cls1
- A_2 è l'area della sezione trasversale della parete cls2
- A_m è l'area della sezione trasversale della parete in muratura
- f_{cd} è la tensione normale della parete cls1
- f_m è la tensione normale della parete in muratura

Numero di connettori trasversali: Incrementando il numero dei connettori, la resistenza della parete aumenta. La massima resistenza si raggiunge quando sono presenti 6 barre di armatura per metro quadro. Un maggiore numero di connettori non da alcun contributo di miglioramento alla resistenza. Se si utilizza un numero di connettori minore di 6, la resistenza della parete diminuisce. Il numero minimo previsto è di 2 connettori per metro quadro.

Diametro dei connettori trasversali: Incrementando il diametro delle connettori, aumenta la resistenza della parete. La massima resistenza si raggiunge quando il diametro è 12 mm. Un diametro maggiore non da alcun contributo di miglioramento alla resistenza. Se si utilizza un diametro minore, la resistenza della parete diminuisce. Il diametro minimo previsto è di 6 mm.

Area di armatura verticale ed orizzontale: La resistenza della parete equivalente è legata alla quantità di armatura con la quale vengono armate le pareti.

Iniezioni di malta

Questa tecnica di consolidamento è adatta per le murature che presentano delle lesioni diffuse e per murature in pietra che generalmente sono dotate di grandi percentuali di vuoti interni. In effetti per poter applicare questa tecnica di consolidamento ci deve essere la possibilità fisica di far penetrare all'interno del corpo murario le miscele leganti.

E' un metodo di consolidamento definito **passivo** in quanto non richiede operazioni tali da alterare l'equilibrio o l'aspetto esteriore della struttura. Questa tecnica è molto utilizzata negli edifici con particolare interesse storico-monumentale ed ha lo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche della muratura.



Le miscele sono costituite da acqua e leganti inorganici (calci e cementi) o da miscele organiche (resine). La scelta dei materiali utilizzati comporta delle differenze in termini di resistenza e rigidezza e dipende dalla muratura e malta esistente.

Per essere efficace il consolidamento, le miscele devono essere sufficientemente fruibili in modo da riempire tutti i vuoti presenti nella muratura. I materiali utilizzati devono avere una granulometria fine e non presentare alta viscosità allo stato fluido. Generalmente si fa anche uso di particolari additivi in modo da garantire la giusta fruibilità. Il ritiro deve essere assente o limitato. Le caratteristiche chimiche dei materiali devono rimanere stabili nel tempo, ed è opportuno inoltre che non si instaurino forti legami chimici con i materiali esistenti.

Le miscele attualmente utilizzate per il consolidamento sono divise in due categorie principali:

- Miscele inorganiche (calce e cemento).
- Miscele a base di resine sintetiche.

Miscele inorganiche

Questo tipo di miscele sono generalmente costituite dai comuni leganti che generalmente si trovano in edilizia, quali cemento e calce. Oltre a questi materiali, nella miscela si inseriscono additivi e cariche per ridurre i difetti della miscela stessa.

Generalmente vengono impiegate quando i fori e le lesioni sono abbastanza ampie. Quando è richiesto un incremento di resistenza si utilizzano miscele a base di cemento, mentre quando non si richiedono elevate resistenze o quando le miscele a base di cemento non sono compatibili con la muratura esistente si fa ricorso alle miscele a base di calce.

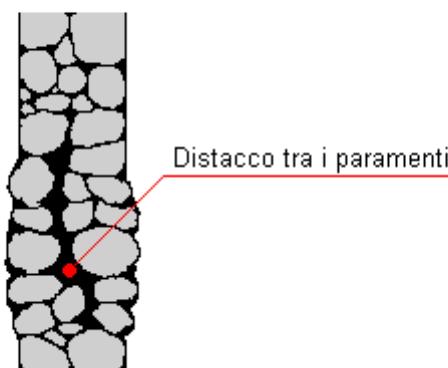
Miscele a base di resine

Questo tipo di miscele possono essere a base organica con le quali si ottengono resistenze finali maggiori e tempi di presa più rapidi o neoplastiche ed hanno elevate proprietà antiritiro.

Diatoni artificiali

Questa tecnica di consolidamento si utilizza quando si verificano distacchi tra i paramenti di una parete:

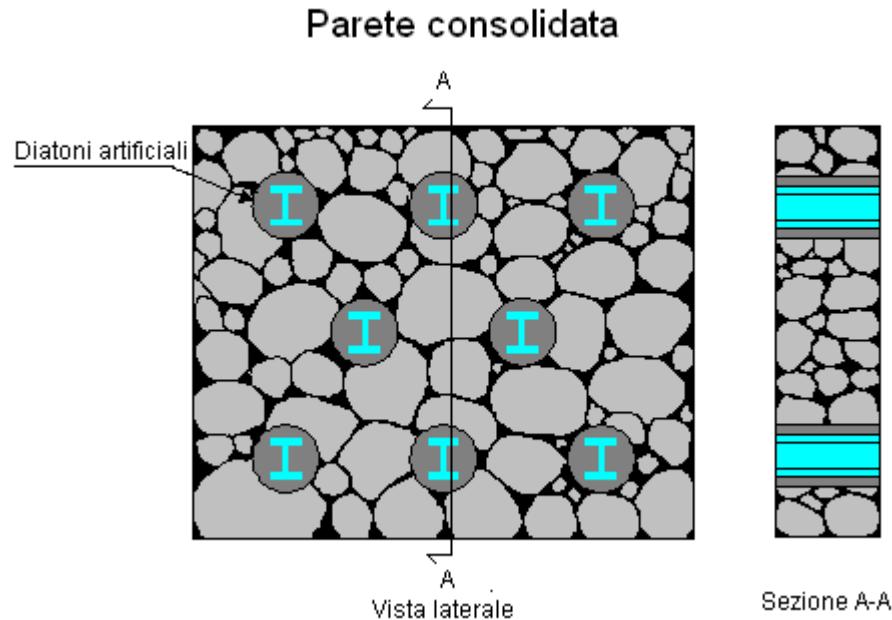
Parete non consolidata



Generalmente i diatoni artificiali sono costituiti da cilindri in cemento del diametro di circa 15 cm con armatura metallica all'interno che attraversa tutto lo spessore del muro. Tale armatura può essere costituita da un profilo metallico o da semplice armatura per cemento armato.

L'obiettivo di questa tipologia di consolidamento è quella di tenere uniti i paramenti di un muro che tendono a distaccarsi (vedi fig. precedente). Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura varia dal 20 al 50 % a seconda della tipologia di muratura.

L'interasse ottimale per tra i diatoni è di circa un metro. Interassi minori rischiano di indebolire la parete, mentre interassi maggiori rischiano di rendere inutile il consolidamento.



Telai metallici

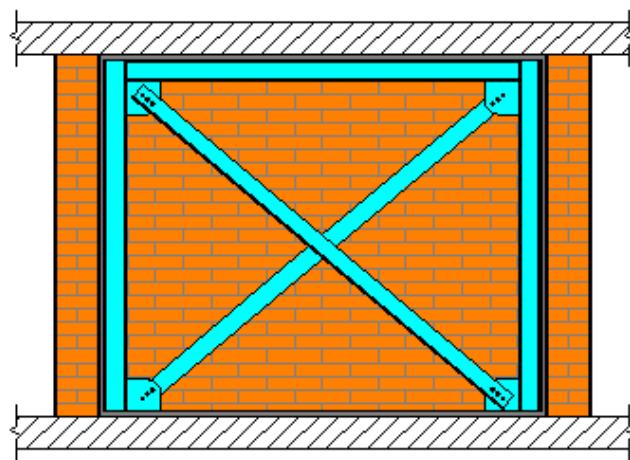
Nel consolidamento di edifici in muratura è usuale ricorrere a telai metallici controventati per rinforzare la struttura nei confronti del sisma.

Utilizzando tale tipologia di consolidamento si possono avere i seguenti vantaggi:

- Semplicità di esecuzione, sia in officina che durante l'assemblaggio in sito.
- Leggerezza della struttura
- In particolari contesti gradevole da vedere
- Reversibilità dell'intervento

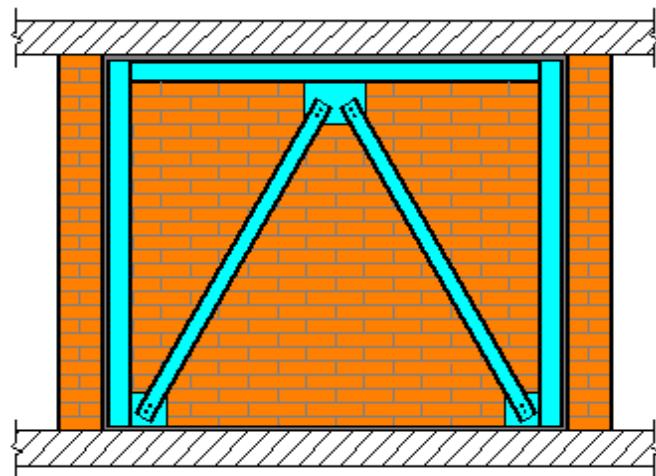
I telai vengono affiancati alle pareti da consolidare e possono essere singoli (da un solo lato della parete) o accoppiati (da entrambi i lati della parete). La resistenza a sisma dei telai è affidata ai controventi per cui alcune delle tipologie proposte sono più efficaci di altri.

Le tipologie più efficaci alla resistenza sismica sono le seguenti:

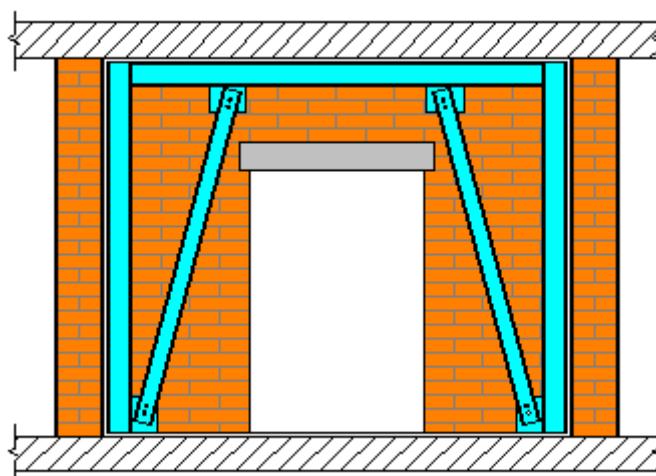


Tipologia 1

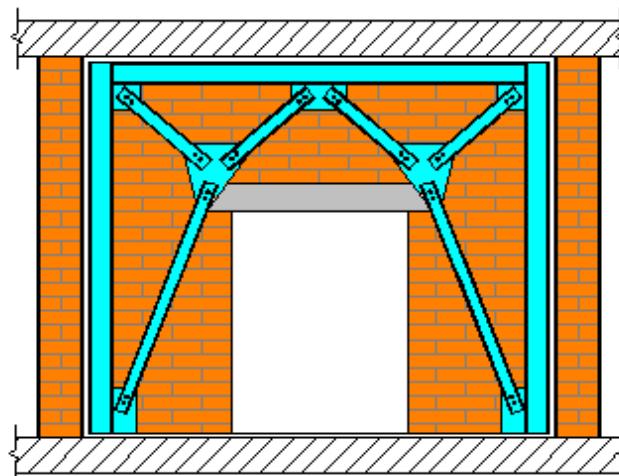
mentre sono meno usate le tipologie seguenti in quanto la disposizione dei controventi non è adatta ad assorbire l'azione sismica. Queste tipologie si utilizzano quando per la presenza di aperture non è possibile utilizzare i precedenti casi (Tipologia 1 e Tipologia 2):



Tipologia 2



Tipologia 3

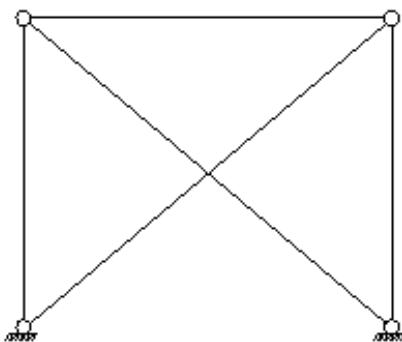


Tipologia 4

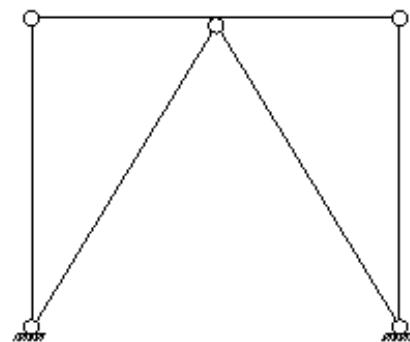
Considerazioni teoriche:

I telai metallici vengono considerati nel calcolo come elementi indipendenti e non collegate ai muri sui quali affiancati. Nella calcolo statico non lineare (pushover) i telai danno il loro contributo di resistenza fino al raggiungimento del limite elastico. Superato tale limite al telaio non si attribuisce più alcuna resistenza aggiuntiva (il limite del telaio si raggiunge quando viene raggiunto la resistenza limite o la stabilità limite).

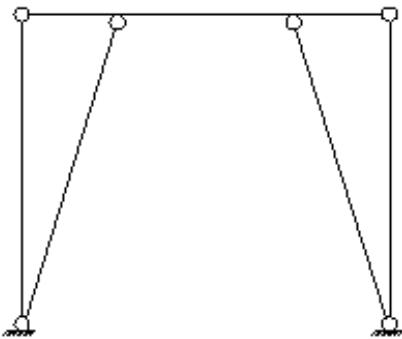
Lo schema statico utilizzato per le quattro tipologie del solaio viene riportato nella figura seguente:



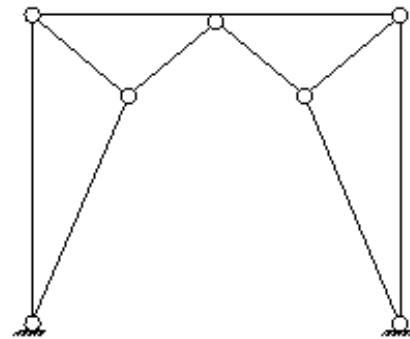
Tipologia 1



Tipologia 2



Tipologia 3



Tipologia 4

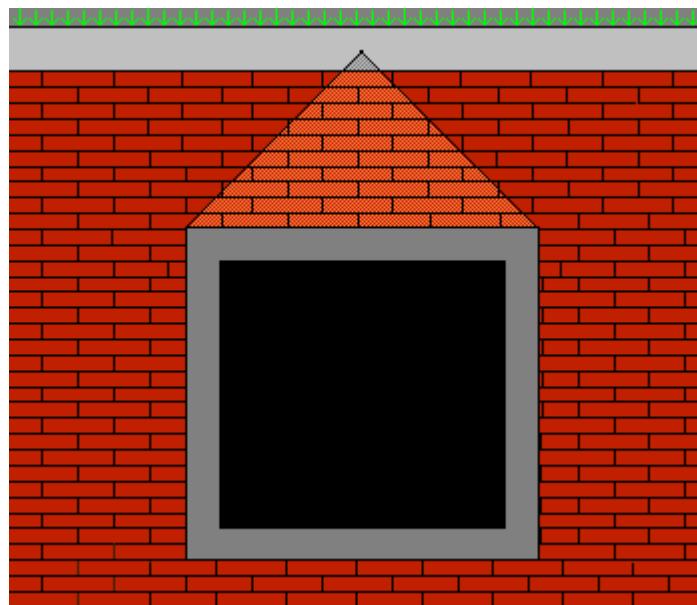
I controventi sono collegati alle altre aste con vincolo cerniera. I Nodi devono essere dimensionati in modo tale da assorbire lo sforzo normale limite che porta alla crisi il telaio.

Cerchiature

Le cerchiature hanno la funzione di dare continuità alla muratura anche in presenza di fori. Infatti la parte di muratura che manca viene sostituita con un telaio (in cemento armato o metallico) che presenta le stesse condizioni di rigidezza della muratura.

Carico indotto da carichi verticali

Il carico derivante dal cordolo viene “conguagliato” sull’architrave in proporzione all’intersezione del cordolo con il triangolo di spinta, in modo da considerare l’effettiva presenza dei carichi sull’effetto arco che si genera sulla cerchiatura.



Schemi di calcolo

Per le cerchiature verranno considerati oltre i carichi verticali, anche i carichi sismici. La combinazione di verifica sarà calcolata simmetricamente nelle due direzioni del sisma. Il sisma può essere modellato sia tramite una forza orizzontale, che come spostamento assegnato.

Verifica Cerchiature

Per questi elementi, nel caso si effettui il controllo della rigidezza elastica, vengono effettuate le seguenti verifiche:

- Verifica a taglio (nelle sezioni critiche delle colonne e dei traversi);
- Verifica a flessione (nelle sezioni critiche delle colonne e dei traversi);
- Verifica di rigidezza traverso/colonna;
- Verifica di rigidezza telaio/parte di muratura asportata.

Il rapporto tra la rigidezza traverso/colonna viene calcolata come:

- Presenza traverso inferiore:

$$rapp. = \frac{EI_{Trav}}{EI_{Col}} \cdot \frac{(H_{Foro} - 2 \cdot H_{Trav})}{(L_{Foro} - 2 \cdot H_{Col})}$$

- Assenza traverso inferiore:

$$rapp. = \frac{EI_{Trav}}{EI_{Col}} \cdot \frac{(H_{Foro} - H_{Trav})}{(L_{Foro} - 2 \cdot H_{Col})}$$

Se si utilizza il modello di rigidezza a flessione e taglio (tipo Timoshenko), la rigidezza della parte in muratura viene calcolata come:

$$K_m = \frac{12EI_{P.Foro}}{H_{P.Foro}^3} + \frac{GA_{P.Foro}}{1.2H_{P.Foro}}$$

Nel caso in cui si usi il modello solo con rigidezza a taglio, verranno utilizzate le seguenti formule:

- Per orizzontamenti rigidi:

$$K_m = \frac{G \cdot spes \cdot \left(\frac{L_{P.Foro}}{H_{P.Foro}} \right)}{\frac{6}{5} + \frac{1}{6} \left(\frac{H_{P.Foro}}{L_{P.Foro}} \right)^2}$$

- Per orizzontamenti flessibili:

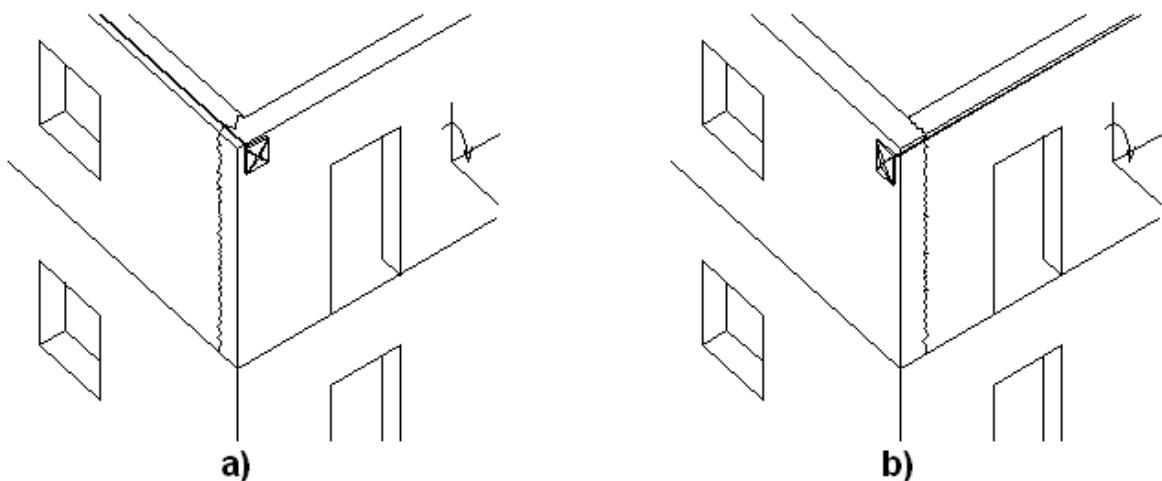
$$K_m = \frac{G \cdot spes \cdot \left(\frac{L_{P.Foro}}{H_{P.Foro}} \right)}{\frac{6}{5} + \frac{2}{3} \left(\frac{H_{P.Foro}}{L_{P.Foro}} \right)^2}$$

Nel caso di orizzontamenti flessibili non sarà condizione obbligatoria rispettare la verifica di rigidezza traverso/colonna. Il software gestisce automaticamente i due casi.

Tiranti metallici

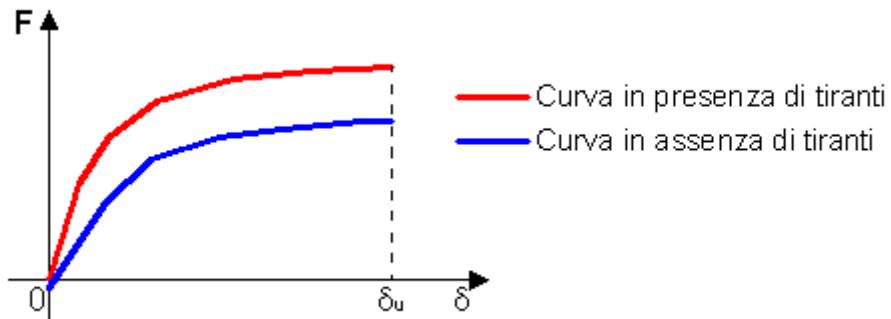
I tiranti metallici rappresentano una tecnica di consolidamento più antica e di indubbia efficacia per gli edifici in muratura. Generalmente sono costituiti da cavi circolari in acciaio con capochiave agli estremi.

I vantaggi forniti dai tiranti sono molteplici. Consentono di aumentare il grado di vincolo tra pareti ortogonali, riducendo la possibilità di meccanismi locali fuori dal piano (vedi "a" della successiva figura). Se si applica una pretensione forniscono un aumento di resistenza a taglio tra due pareti ortogonali (vedi "b" della successiva figura).



Consentono di aumentare la resistenza nel piano della parete in quanto forniscono una resistenza a trazione alle fasce di piano. Nella figura successiva viene evidenziato come la presenza

di tiranti fa aumentare la resistenza della struttura: la curva di capacità registra una forza alla base superiore rispetto al caso in cui non si hanno tiranti.



Nel calcolo strutturale, il software calcola il tiro del tirante assumendo il valore minimo tra la resistenza a trazione del cavo e la resistenza a taglio o attrito della muratura in prossimità del capochiave.

La resistenza a trazione del tirante è data da:

$$T_1 = n \cdot f_{yd} \cdot A_s$$

dove

- n è il numero di tiranti inseriti nello stesso muro (uno o due);
- f_{yd} è la resistenza a trazione del tirante;
- A_s è l'area della sezione trasversale del tirante;

Per il calcolo della resistenza del muro in prossimità del capochiave occorre distinguere il caso di capochiave circolare e rettangolare. Nel primo caso si ha:

$$T_2 = \pi \cdot f_{vd0} \cdot (t + 2 \cdot R) \cdot t \quad (\text{Resistenza per coesione})$$

$$T_3 = 2 \cdot f \cdot \sigma_0 \cdot t \cdot (t + 2 \cdot R) \quad (\text{Resistenza per attrito})$$

dove

- f_{vd0} è la resistenza a taglio in assenza di carichi verticali della muratura;
- t è lo spessore della parete;
- R è il raggio del capochiave;
- f è il coefficiente di attrito assunto pari a 0.75;
- σ_0 è la tensione normale media esercitata dai carichi verticali in prossimità della posizione del tirante;

Nel caso di capochiave rettangolare si ha:

$$T_2 = 2 \cdot f_{vd0} \cdot t \cdot (a + b + 2 \cdot t) \quad (\text{Resistenza per coesione})$$

$$T_3 = 2 \cdot f \cdot \sigma_0 \cdot t \cdot (a + t) \quad (\text{Resistenza per attrito})$$

dove

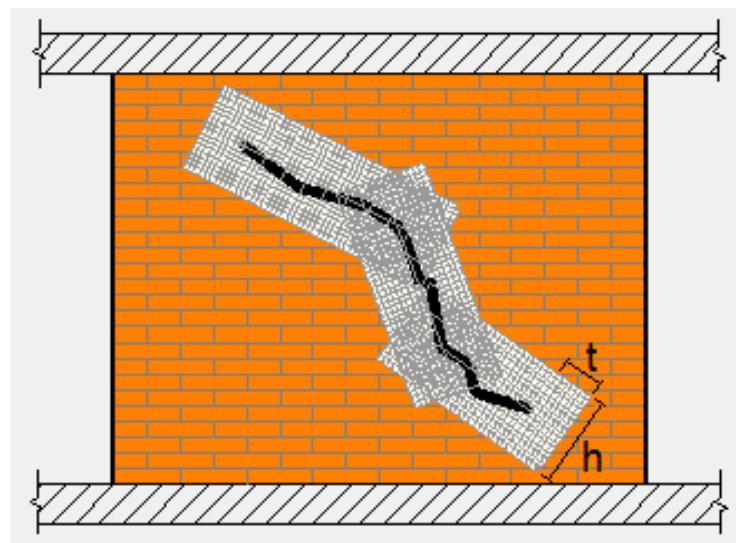
- “a” è la base del capochiave rettangolare;
- “b” è l’altezza del capochiave rettangolare;

Il massimo sforzo di trazione che il tirante riesce ad offrire è dato dalla seguente:

$$T = \min(T_1, T_2, T_3)$$

FRP – Rinforzo su fessura

Consente di applicare reti in FRP sulle fessure. L’obiettivo è quello di ripristinare la continuità tra le parti contigue alla lesione. Il criterio di funzionamento è simile a quello del cuci-scuci. Il software effettua la verifica delle reti per assicurarsi che siano idonee a trasmettere gli sforzi tra le parti e garantire la continuità

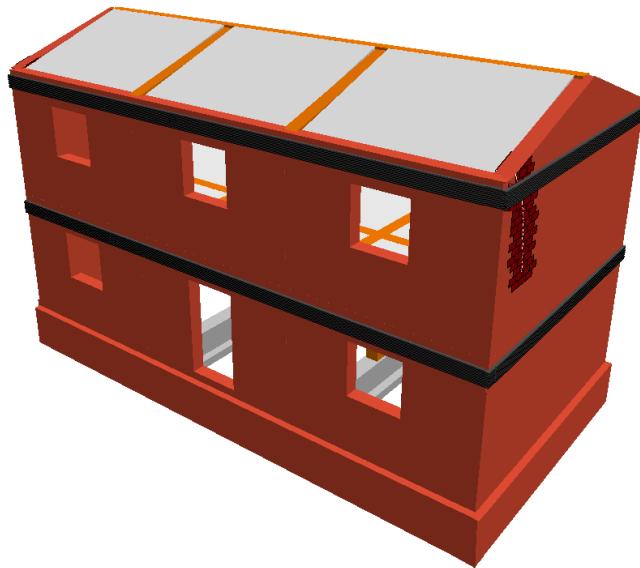


FRP – Intonaco armato

Consente di consolidare la parete con intonaco armato utilizzando reti in FRP in alternativa a quella metallica (rete elettrosaldata). La tecnica di esecuzione è analoga a quella vista per le reti metalliche. In genere, utilizzare le reti in FRP consente di realizzare lastre in calcestruzzo più sottili (circa 2 cm).

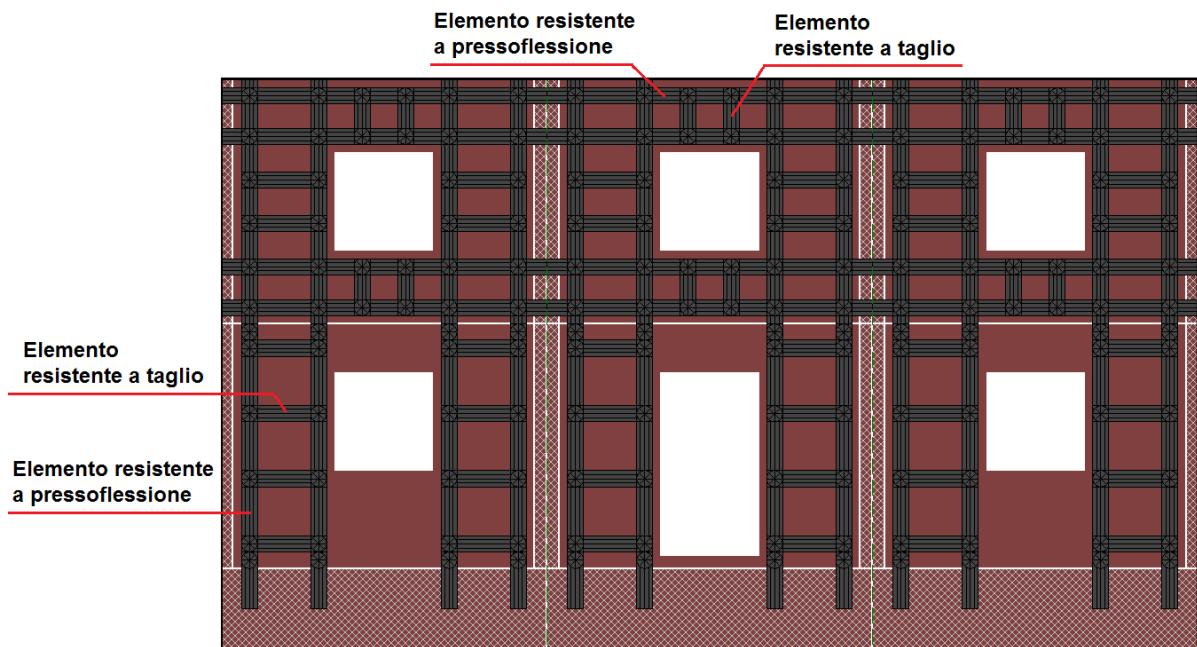
FRP – Cerchiature esterne

Le cerchiature esterne sono elementi in FRP che avvolgono la struttura in orizzontale e poste generalmente a quota solaio con lo scopo di aumentare la connessione trasversale tra le pareti ortogonali (vedi figura successiva). Il funzionamento è simile a quello dei cordoli: impedire il ribaltamento fuori dal piano della parete, ed aumentare la resistenza nel piano delle fasce e quindi dell’intera parete. La resistenza delle fasce in FRP viene calcolata tenendo conto della resistenza del composito e della delaminazione.

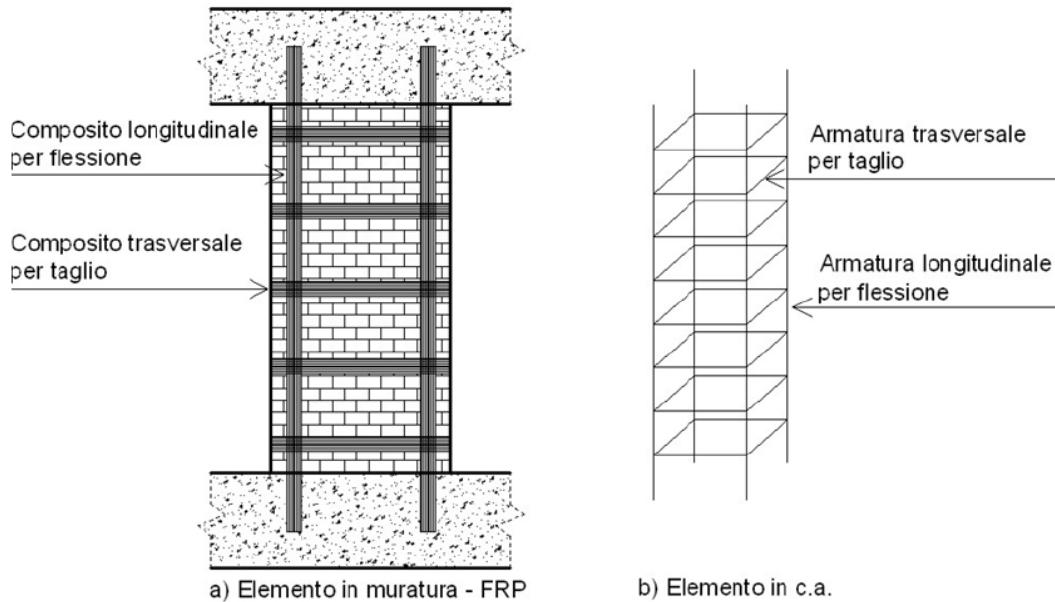


FRP – Incremento di resistenza per flessione e taglio

Il consolidamento consente di incrementare la resistenza degli elementi (maschi murari e fasce di piano) sia a pressoflessione che a taglio.

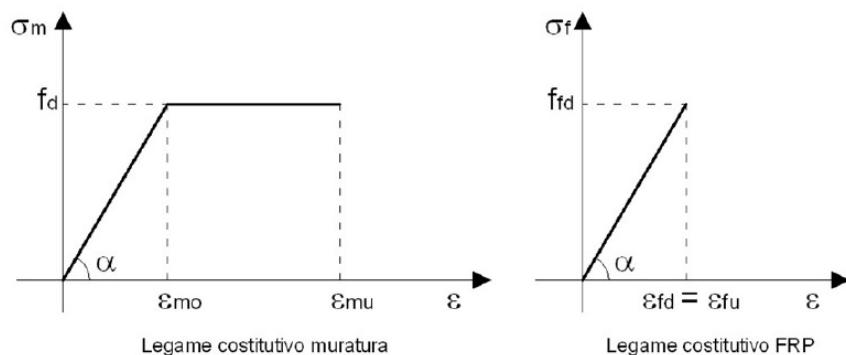


Il funzionamento degli elementi in muratura consolidati con FRP è simile a quello degli elementi in c.a. (cambiano i legami costitutivi), dove la muratura assume la stessa funzione del calcestruzzo, le fasce longitudinali la stessa funzione delle armature longitudinali e le fasce trasversale la stessa funzione delle staffe (vedi immagine successiva).



Rispetto alla formulazione a pressoflessione per c.a. cambiano i legami costitutivi dei materiali. La muratura assume un comportamento *elastico - perfettamente plastico* (il calcestruzzo assume un comportamento *parabola-rettangolo*), mentre le fibre assumono un comportamento *elastico lineare* fino a collasso (l'acciaio assume un comportamento *elastico - perfettamente plastico*).

Legame costitutivo dei materiali



Muratura

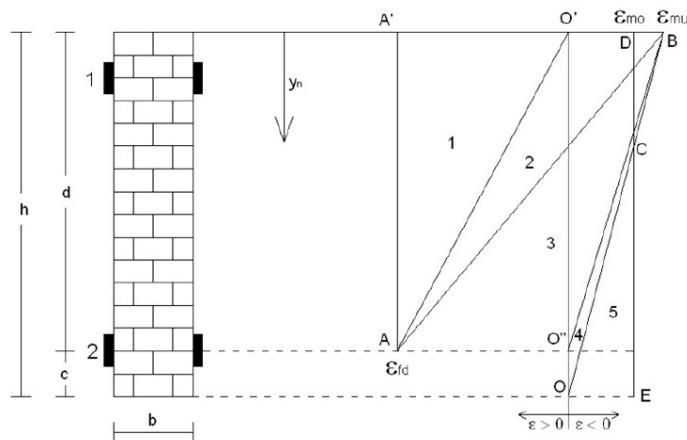
$$\begin{cases} \sigma = E_m \cdot \varepsilon & \text{per } \varepsilon \leq \varepsilon_{m0} \\ \sigma = f_d & \text{per } \varepsilon_{m0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{mu} \end{cases}$$

Composito

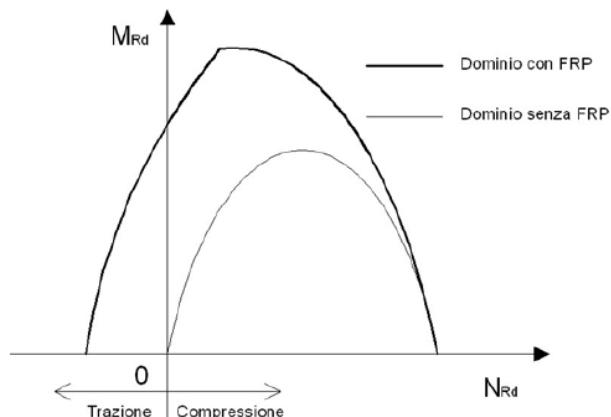
$$\sigma = E_f \cdot \varepsilon \quad \text{per } \varepsilon \leq \varepsilon_{fd}$$

La formulazione è quella classica degli stati limite con 5 campi di rottura (vedi immagine sotto riportata).

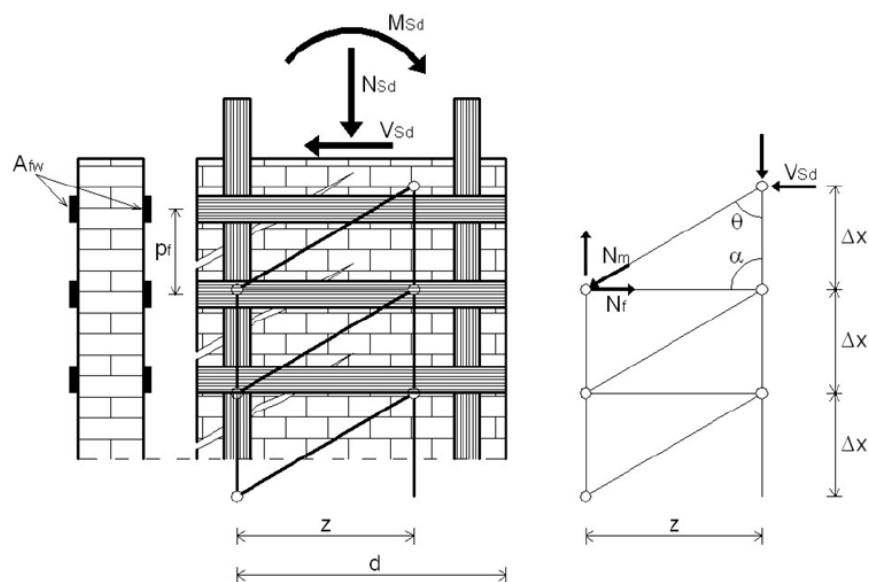
Campi di rottura



La presenza delle fibre rendono possibili anche sforzi normali di trazione. Nella figura che segue si riporta un tipico dominio M-N per un maschio murario consolidato con FRP. Come si vede dalla figura, per valori alti dello sforzo normale, il consolidamento è pressoché inefficace (in accordo con l'ipotesi di non resistenza a compressione delle fibre), mentre per valori bassi (o negativi) dello sforzo normale, il consolidamento risulta essere molto efficace (considerazioni valide per la pressoflessione).

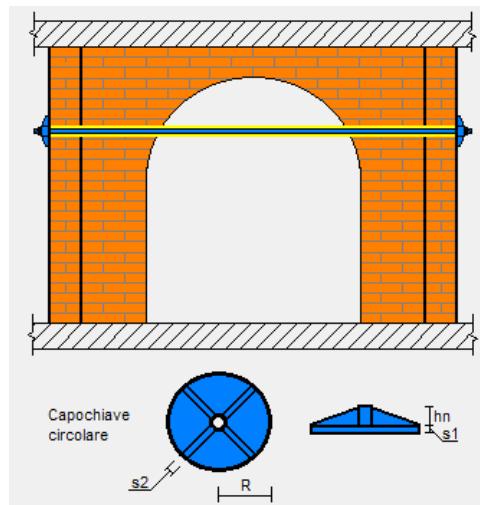


Per quanto riguarda la verifica a taglio si sfrutta sempre la teoria di Ritter_Morsch del traliccio isostatico (vedi figura successiva).



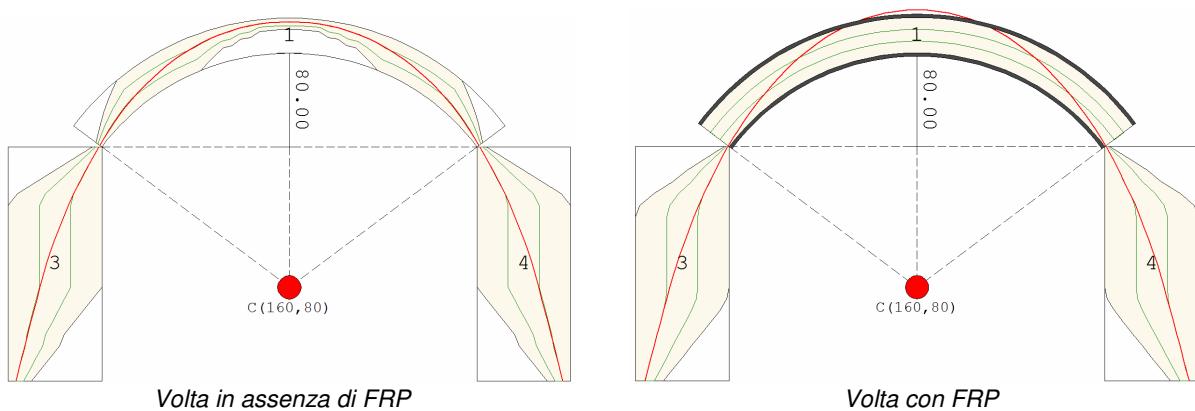
Consolidamento di volte con tiranti

Il consolidamento consente di incrementare la stabilità delle volte e di aumentare le risorse sismiche dei piedritti su cui poggiano le stesse volte. La resistenza dei tiranti si valuta in maniera analoga a quanto visto per i tiranti collocati nella pareti.



Consolidamento di volte con FRP

Il consolidamento consente di incrementare la stabilità delle volte, consentendo di ridurre le parzializzazioni dei conci di cui è costituita. La presenza degli FRP consente posizioni della curva delle pressioni anche al di fuori dell'ombra della volta (vedi figura successiva)



Esempio di calcolo

Confrontiamo i risultati di calcolo della struttura riportata di seguito nell'ipotesi di presenza e di assenza dei consolidamenti.



L'edificio oggetto di studio è costituito da tre piani f.t. più sottotetto ed è sito in una zona sismica di prima categoria, con categoria suolo di fondazione B.

La struttura è composta da una sola tipologia di muratura:

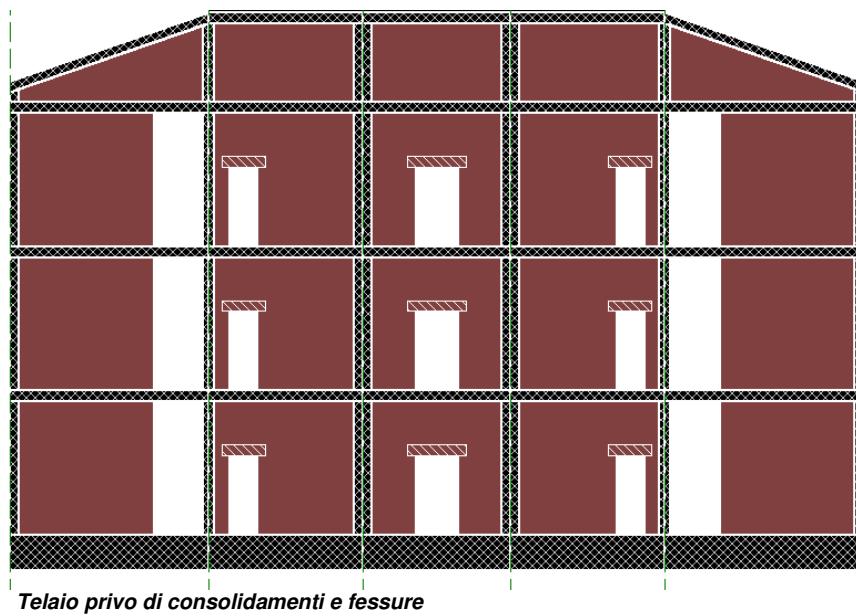
Tipologia	E (kg/cmq)	G (kg/cmq)	fm (kg/cmq)	t0 (kg/cmq)	Peso (kg/mc)
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	18000	3000	18	0.60	1800

Risultati di calcolo in assenza di consolidamenti e fessure

Calcolo della struttura senza consolidamenti. Il coefficiente minore si ottiene per sisma negativo in direzione Y con distribuzione delle azioni sismiche proporzionali alle masse ($s = 0.67$).

	F _{max} [daN]	u _{max} [cm]	G	F [*] _{max} [daN]	u [*] _{max} [cm]	q [*]	u _{cs} [cm]	d [*] _{max} [cm]	S	Esito
Cond_X_1(+)	649127	0.6229	1.2317	527029	0.5057	1.6755	0.6229	0.7892	0.79	NV
Cond_X_1(-)	649127	0.6229	1.2317	527029	0.5057	1.6762	0.6229	0.7894	0.79	NV
Cond_X_2(+)	644108	0.7028	1.2317	522954	0.5706	1.6937	0.7028	0.8841	0.79	NV
Cond_X_2(-)	644108	0.7028	1.2317	522954	0.5706	1.6937	0.7028	0.8841	0.79	NV
Cond_Y_1(+)	595591	0.6449	1.2302	484146	0.5242	1.8466	0.6449	0.9535	0.68	NV
Cond_Y_1(-)	588899	0.6475	1.2302	478699	0.5264	1.8735	0.6475	0.9672	0.67	NV
Cond_Y_2(+)	585553	0.7704	1.2302	475987	0.6263	1.8900	0.7704	1.0746	0.72	NV
Cond_X_2(-)	578861	0.7565	1.2302	470539	0.6150	1.9149	0.7565	1.0950	0.69	NV

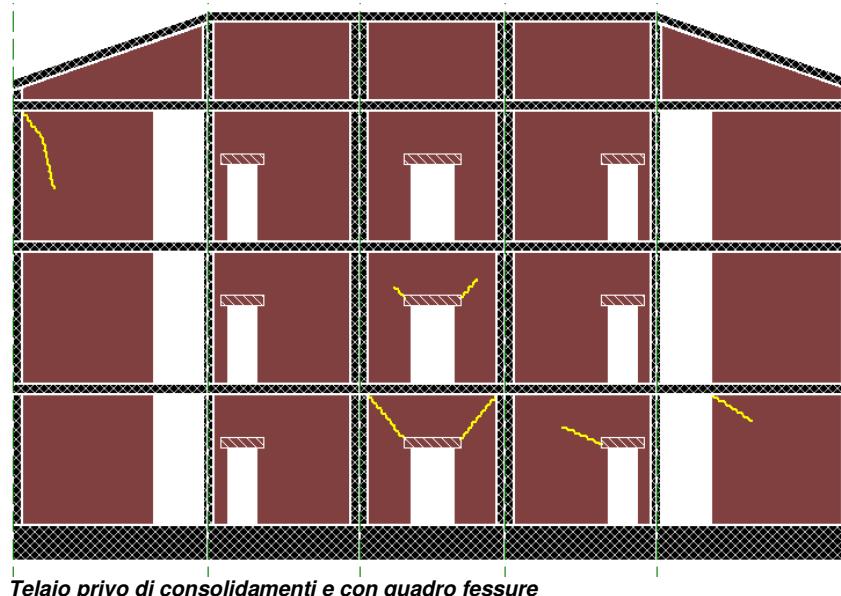
Nell'immagine successiva si riporta una parete di cui è costituito l'edificio senza considerare il quadro fessurativo.



Risultati di calcolo in assenza di consolidamenti e con quadro fessurativo

Calcolo della struttura senza consolidamenti e con quadro fessurativo. Il coefficiente minore si ottiene per sisma negativo in direzione Y con distribuzione delle azioni sismiche proporzionali alle altezze ($s = 0.52$).

	F_{\max} [daN]	u_{\max} [cm]	G	F^*_{\max} [daN]	u^*_{\max} [cm]	q^*	u_{cs} [cm]	d^*_{\max} [cm]	S	Esito
Cond_X_1(+)	564825	0.5033	1.2146	465016	0.4143	1.9492	0.5033	0.9256	0.54	NV
Cond_X_1(-)	568119	0.5318	1.2146	467728	0.4378	1.9406	0.5318	0.9237	0.58	NV
Cond_X_2(+)	563178	0.6558	1.2146	463661	0.5399	1.9410	0.6558	1.0132	0.65	NV
Cond_X_2(-)	566472	0.5440	1.2146	466372	0.4479	1.9556	0.5440	1.0165	0.54	NV
Cond_Y_1(+)	498956	0.6175	1.2086	412841	0.5110	2.2555	0.6175	1.1484	0.54	NV
Cond_Y_1(-)	485783	0.6140	1.2086	401934	0.5080	2.3264	0.6140	1.1601	0.53	NV
Cond_Y_2(+)	489076	0.6651	1.2086	404666	0.5503	2.3056	0.6651	1.2589	0.53	NV
Cond_X_2(-)	475902	0.6653	1.2086	393759	0.5504	2.3774	0.6653	1.2759	0.52	NV



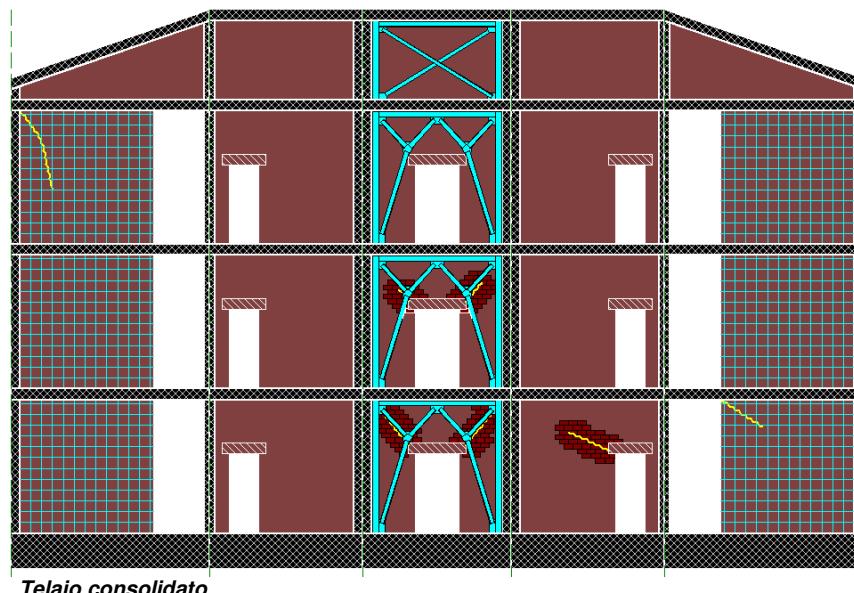
Coefficiente di sicurezza minimo = 0.52

Risultati di calcolo in presenza di consolidamenti

Calcolo della struttura con consolidamenti. Il coefficiente minore si ottiene per sisma negativo in direzione Y con distribuzione delle azioni sismiche proporzionali alle masse ($s = 1.00$).

	F_{\max} [daN]	u_{\max} [cm]	G	F^*_{\max} [daN]	u^*_{\max} [cm]	q^*	u_{cs} [cm]	d^*_{\max} [cm]	S	Esito
Cond_X_1(+)	785624	0.6023	1.2407	633218	0.4854	1.4157	0.6023	0.5424	1.11	V
Cond_X_1(-)	785624	0.6023	1.2407	633218	0.4854	1.4157	0.6023	0.5424	1.11	V
Cond_X_2(+)	783839	0.7075	1.2407	631779	0.5703	1.4841	0.7075	0.6638	1.07	V
Cond_X_2(-)	783839	0.7075	1.2407	631779	0.5703	1.4841	0.7075	0.6638	1.07	V
Cond_Y_1(+)	758842	0.6058	1.2402	611866	0.4885	1.5025	0.6058	0.5963	1.02	V
Cond_Y_1(-)	757056	0.6098	1.2402	610415	0.4916	1.5154	0.6098	0.6088	1.00	V
Cond_Y_2(+)	748129	0.7406	1.2402	603228	0.5971	1.5839	0.7406	0.7168	1.03	V
Cond_X_2(-)	746343	0.7350	1.2402	601777	0.5926	1.5871	0.7350	0.7303	1.01	V

Coefficiente di sicurezza minimo = 1.00



Conclusioni

Esaminando la struttura oggetto di studio si evince che in assenza di consolidamenti il coefficiente di sicurezza sismico minore è $s=0.52$, mentre in presenza di consolidamenti il coefficiente di sicurezza sismico aumenta fino al valore $s=1.00$

Riferimenti bibliografici

Metodi di calcolo e tecniche di consolidamento per edifici in muratura

Michele Vinci – Dario Flaccovio Editore

<http://www.edificiinmuratura.it/Pagina/10/metodi-calcolo-tecniche-consolidamento-per-edifici-in-muratura>

I tiranti in acciaio nel calcolo delle costruzioni in muratura

Michele Vinci – Dario Flaccovio Editore

<http://www.edificiinmuratura.it/Pagina/123/I3-i-tiranti-in-acciaio-nel-calcolo-delle-costruzioni-in-muratura>