

Edifici in Muratura

Michele Vinci

Analisi pushover per edifici in muratura (parametri che ne influenzano i risultati)

Collana
Calcolo di edifici in muratura
(www.edificiinmuratura.it)

Articolo 3 – Marzo 2014

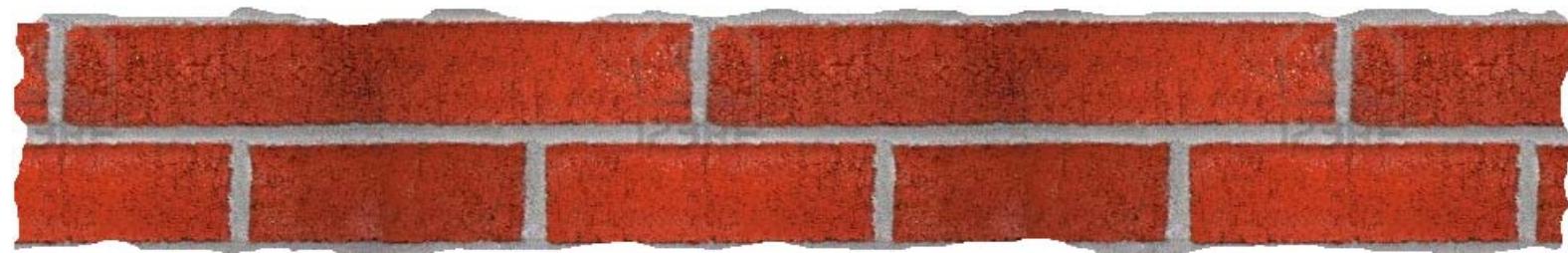
Software utilizzato: VEM_{NL} – STACEC srl

Bibliografia:

Michele Vinci – *Metodi di calcolo e tecniche di consolidamento per edifici in muratura* – Dario Flaccovio – 2012

Michele Vinci – *I tiranti in acciaio nel calcolo delle costruzioni in muratura* – Dario Flaccovio – 2014

R. Marnetto, A. Vari, M. Leonori – *Il sistema CAM - Cuciture attive dei manufatti* – EdizionePreProgetti – 2014.



Analisi pushover per edifici in muratura

L'obiettivo del documento è quello di riportare quali sono i parametri che entrano in gioco nell'analisi e come intervenire su di essi nei casi in cui si vuole migliorare l'esito della verifica. In questo contesto non si ha il fine di essere esaustivi su tutte le problematiche del metodo, come per esempio la definizione del modello di calcolo, della valutazione delle curve di capacità, del sistema equivalente, ecc. Per questo motivo vengono date per scontate molte nozioni e si consiglia la lettura di testi specifici (vedi bibliografia). Tale documento nasce dalla constatazione che spesso consolidando la struttura, si ottengono risultati peggiorativi, circostanza anomala e paradossale per molti tecnici. Si cerca di riportare la giusta procedura per consolidare in maniera efficace le strutture.

La normativa italiana consente per il calcolo di edifici in muratura, sia metodi di tipo lineare (statica e dinamica) che metodi di tipo non lineare (statica e dinamica). In particolare, i metodi lineari sono molto restrittivi per cui inutilizzabili. Rimangono a disposizione i metodi non lineari. L'analisi dinamica non lineare è molto complessa, sia dal punto di vista concettuale che computazionale, per cui l'unica possibile (tra quelle proposte dalla normativa) è quella statica non lineare (pushover). Per i motivi sopra accennati, si concentra l'attenzione solo su quest'ultima tipologia di analisi.

L'analisi statica non lineare, secondo le prescrizioni del D.M. 14/01/2008 e della Circolare 617/2009, si articola nei seguenti passi (per ulteriori approfondimenti si consigliano i testi riportati in bibliografia):

- Individuazione delle parti resistenti della struttura muraria attraverso la definizione del telaio equivalente (maschi murari, fasce di piano e conci rigidi);
- Calcolo delle curve di capacità. Occorre determinare le curve del sistema reale (MDOF – sistema a più gradi di libertà) secondo due diversi profili di carico, uno proporzionale alle masse e l'altro proporzionale alle altezze in entrambe le direzioni principali con il verso positivo e negativo delle forze, ottenendo così otto combinazioni di carico diverse (le combinazioni di carico possono essere 16 o 24 se si considera l'effetto delle eccentricità);
- Trasformazione del sistema a più gradi di libertà (MDOF) in quello ad un solo grado di libertà equivalente (SDOF) attraverso il coefficiente di partecipazione Γ ;
- Valutazione del sistema bilineare equivalente di massa m^* , rigidezza k^* e periodo T^* ;
- Calcolo della capacità di spostamento (u_{max});
- Calcolo della domanda di spostamento (d_{max});
- Confronto tra capacità di spostamento e domanda di spostamento.

L'esito della verifica si considera positivo quando è soddisfatta la seguente relazione:

$$u_{max} \geq d_{max}$$

In altre parole, in termini di coefficienti di sicurezza (s), affinché l'esito della verifica sia positivo, deve essere soddisfatta la (1) per tutte le combinazioni di carico effettuate:

$$s = \frac{u_{max}}{d_{max}} \geq 1 \quad (1)$$

Per aumentare il coefficiente di sicurezza occorre che aumenti la capacità di spostamento (u_{max}) e che diminuisca la domanda di spostamento (d_{max}). Oltre a quanto sopra detto, affinché l'esito della verifica sia positivo, il fattore di struttura q^* deve assumere valore minore di 3 (vedi relazione (11) – punto 7.8.1.6 del D.M 14/01/2008).

1.1 – Incremento di resistenza per effetto della riduzione della domanda di spostamento d_{max}

Come accennato sopra, attraverso la (1), si deduce che l'esito dell'analisi migliora se si riduce la domanda di spostamento (d_{max}). La domanda di spostamento si ottiene dalle relazioni (2):

$$d_{max} = \Gamma \cdot d_{max}^* \quad (2)$$

dove Γ è il coefficiente di partecipazione (trasforma il sistema MDOF in quello SDOF). A sua volta, la domanda di spostamento (d_{max}^*) del sistema ad un solo grado di libertà (SDOF) si ottiene dalle relazioni (3) in funzione del periodo T^* del sistema equivalente e del periodo T_C che definisce lo spettro elastico.

$$d_{max}^* = d_{e,max}^* = S_{De}(T^*) \quad \text{se } T^* \geq T_C \quad (3.a)$$

$$d_{max}^* = \frac{S_{De}(T^*)}{q^*} \left[1 + (q^* - 1) \cdot \frac{T_C}{T^*} \right] \geq S_{De}(T^*) \quad \text{se } T^* < T_C \quad (3.b)$$

1.1.1 – Caso in cui il periodo del sistema equivalente T^* è maggiore di T_C

In questo caso (molto raro per edifici in muratura) la domanda di spostamento si ottiene dalla (3.a) ed è funzione dello spettro elastico in termini di spostamento:

$$S_{De}(T^*) = S_e(T^*) \cdot \left(\frac{T^*}{2\pi} \right)^2 \quad (4)$$

Poiché, per ipotesi $T^* \geq T_C$, lo spettro elastico è dato dalla seguente (vedi punto 3.2.3 del D.M. 14/01/2008):

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right) \quad T_C \leq T^* < T_D \quad (5)$$

Sostituendo la (5) nella (4) e semplificando si ottiene:

$$d_{max}^* = S_{De}(T^*) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \left(\frac{T^* \cdot T_C}{4 \cdot \pi^2} \right) \quad (6)$$

Dalla (6) si evince che la domanda di spostamento (d_{max}^*) aumenta all'aumentare del periodo T^* . Per la (1), per migliorare l'esito della verifica occorre far diminuire d_{max} , quindi

d^*_{max} (per la relazione (2)) e quindi di conseguenza il periodo T^* (per la relazione (6)) che a sua volta si ottiene dalla (7):

$$T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad (7)$$

Dalla precedente si deduce che il periodo diminuisce al diminuire della massa partecipante (m^*) ed all'aumentare della rigidità (k^*). Ovviamente, l'unica strada percorribile è quella di far aumentare la rigidità (il metodo prevede valori alti della massa partecipante del primo modo – vedi sotto). La rigidità si ottiene dal tratto lineare del sistema equivalente. Tanto più è grande l'angolo k^* (vedi figura 1), tanto maggiore è la rigidità. Per cui, l'obiettivo è quello di consolidare la struttura in maniera tale che la curva di capacità assuma forma simile a quella riportata in figura (sistema consolidato). La rigidità k^*_c del sistema consolidato, essendo maggiore della rigidità k^* del sistema non consolidato, per quanto visto in precedenza, porta ad una riduzione della domanda di spostamento (vedi relazioni (6) e (7)) e quindi ad un incremento del coefficiente s (vedi relazione (1)).

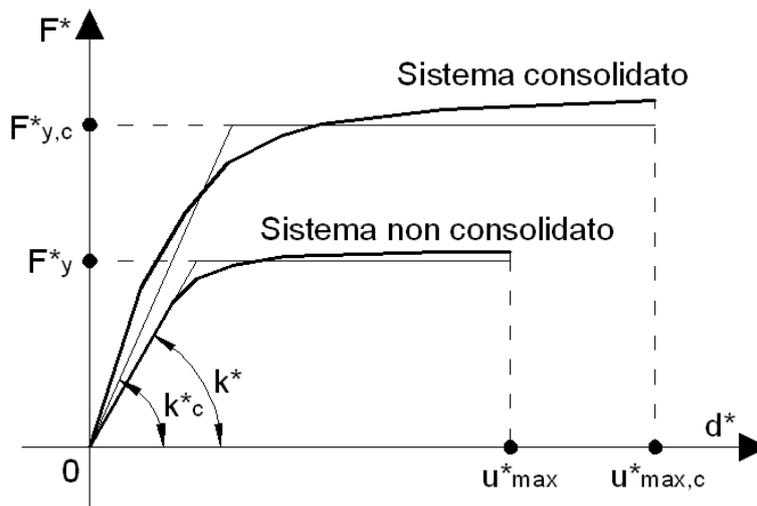


Figura 1 – Curve di capacità con e senza consolidamento

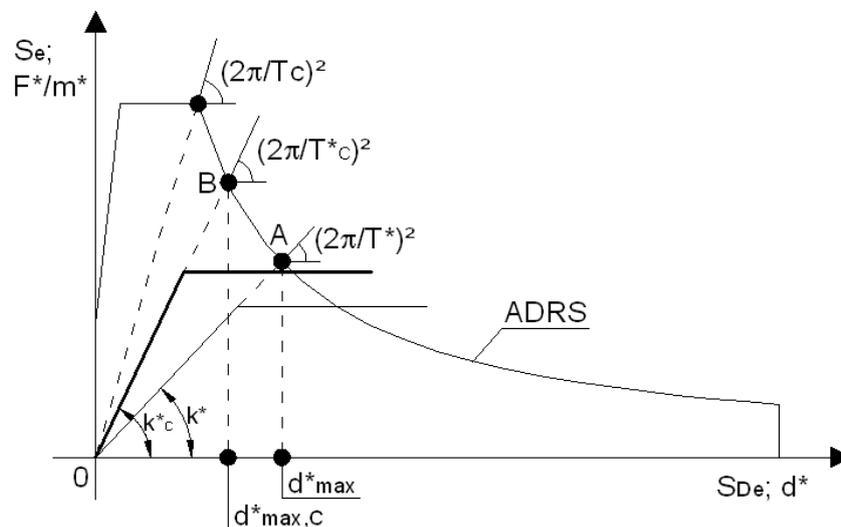


Figura 2 – Domanda di spostamento dei due sistemi (consolidato e non consolidato)

Nel caso del sistema non consolidato (rigidezza k^*), la continuazione del tratto lineare del sistema equivalente (tratto 0-A in figura 2) interseca la curva ADRS nel punto A restituendo una capacità di spostamento pari a d_{max}^* , mentre nel caso consolidato (curva in grassetto con rigidezza k_C^* , con $k_C^* > k^*$) il tratto lineare del sistema interseca la curva ADRS nel punto B, restituendo una capacità di spostamento pari a $d_{max,C}^*$, minore del caso non consolidato.

Modi per incrementare la rigidezza del sistema possono essere quelli di consolidare con intonaco armato, con iniezioni di malta, cerchiando fori, realizzando muri aggiuntivi di nuova costruzione, ecc.

1.1.2 – Caso in cui il periodo del sistema equivalente T^* è compreso tra T_B e T_C

In questo caso la domanda di spostamento si ottiene dalla (3.b). Poiché dipende da $S_{De}(T^*)$, valgono le stesse considerazioni viste nel punto 1.1.1, per cui l'incremento di rigidezza determina una riduzione della domanda di spostamento (d_{max}).

Inoltre, dipende anche dalle seguenti quantità:

- q^* (fattore di struttura);
- T^* (periodo del sistema bilineare equivalente).

Poiché, per ipotesi $T_B \leq T^* < T_C$, lo spettro elastico è dato dalla seguente (vedi punto 3.2.3 del D.M. 14/01/2008):

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \quad T_B \leq T^* < T_C \quad (8)$$

Sostituendo la (8) nella (4) si ottiene:

$$S_{De}(T^*) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \left(\frac{T^*}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad (9)$$

Come nel caso precedente, diminuendo il periodo T^* si riduce anche la domanda di spostamento.

Nella relazione (3.b), compare anche il fattore di struttura q^* . La suddetta relazione può essere scritta come segue:

$$d_{max}^* = S_{De}(T^*) \left[\frac{T_C}{T^*} + \left(1 - \frac{T_C}{T^*} \right) \frac{1}{q^*} \right] \quad (10)$$

A parità delle altre grandezze, dalla precedente si evince che la domanda di spostamento diminuisce (e quindi migliora l'esito della verifica) al diminuire del fattore di struttura q^* (da tenere presente che la quantità tra parentesi tonda della relazione (10) è minore di 0). Il fattore di struttura, è dato dalla seguente relazione:

$$q^* = \frac{S_e(T^*)}{\frac{F_y^*}{m^*}} \quad (11)$$

Poiché per la (8) $S_e(T^*)$ è costante, il fattore di struttura q^* diminuisce al diminuire della massa m^* ed all'aumentare della forza massima del sistema bilineare equivalente F_y^* . Ovviamente, anche in questo caso, l'unica strada percorribile è quella di far aumentare la forza massima F_y^* (il metodo prevede valori alti della massa partecipante del primo modo – vedi sotto). Per aumentare il valore di F_y^* occorre incrementare il valore del tagliante alla base (occorre incrementare le ordinate della curva di capacità). Per esempio, la curva consolidata riportata in figura 1 può portare ad un miglioramento dell'esito della verifica in quanto si ha $F_{y,c}^* > F_y^*$ (si ricorda che il fattore di struttura deve essere inferiore a 3 affinché l'esito della verifica sia positivo. Nel caso in cui è inferiore ad 1, non entra in gioco nella valutazione di d_{max}^*). Aumentando indefinitivamente (concetto solo teorico) q^* , l'ultimo termine della (10) tende a 0, per cui la domanda di spostamento tende al seguente valore massimo:

$$d_{max}^* = S_{De}(T^*) \frac{T_C}{T^*} \quad (12)$$

Dalla (10) e dalla (12) si evince che per valori alti del fattore di struttura, piccole variazioni di quest'ultimo danno contributi modesti nella variazione della domanda di spostamento. La variazione del suddetto spostamento è più apprezzabile nel caso in cui il fattore di struttura assume valori bassi (inferiori a 3).

Per incrementare le ordinate della curva di capacità occorre incrementare la resistenza dei singoli elementi, consolidando per esempio con intonaco armato, iniezioni di malta, FRP, ecc.

Nel caso in cui si fa variare il periodo T^* e si mantengono costanti le altre quantità, tenendo conto della (9) e della (10) si ottiene la seguente relazione:

$$d_{max}^* = \frac{a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0}{4 \cdot \pi^2 \cdot q^*} \left[(T^*)^2 + (q^* - 1) \cdot T_C \cdot T^* \right] \quad (13)$$

dalla quale si deduce che la domanda di spostamento diminuisce al diminuire del periodo T^* e quindi all'aumentare della rigidezza k^* (vedi punto 1.1.1).

In definitiva, la domanda di spostamento diminuisce all'aumentare della rigidezza (k^*) e della resistenza (F_y^*) del sistema bilineare equivalente.

1.2 – Incremento di resistenza per effetto dell'incremento della capacità di spostamento u_{max}

Dalla relazione (1) si deduce che l'esito della verifica migliora all'aumentare del numeratore del secondo membro, quindi all'aumentare della capacità di spostamento (u_{max}). Generalmente, aumentare la capacità di spostamento di una struttura (soprattutto per strutture di grosse dimensioni) è molto complesso, dovuto specialmente al fatto che la massima deformazione dei singoli elementi (e quindi di tutta la struttura) è regolato dalla normativa. Per i maschi murari sono previsti i seguenti spostamenti massimi:

$$\delta_u = 0.006 \cdot h \quad (\text{per rottura a flessione del maschio - esistenti}) \quad (14.a)$$

$$\delta_u = 0.004 \cdot h \quad (\text{per rottura a taglio del maschio}) \quad (14.b)$$

Una delle tecniche che si può seguire per aumentare la capacità di spostamento è quella di indurre tutti gli elementi a collassare per flessione (secondo le relazioni (14), per questo tipo di rottura è consentito uno spostamento maggiore).

Un'altra tecnica può essere quella di analizzare la rottura degli elementi che collassano e cercare di incrementarne la resistenza (non la rigidezza in quanto ne riduce le capacità di spostamento). In questo modo si richiede una forza alla base maggiore e quindi probabilmente uno spostamento maggiore.

Un modo per incrementare la capacità di spostamento può essere quello di consolidare gli elementi con FRP. Questa tecnica di consolidamento non altera le capacità di rigidezza della struttura, ma solo quelle di resistenza. Inoltre, poiché si possono collocare elementi sia per incrementare la resistenza a flessione che quella a taglio, si può gestire il quantitativo in modo da pilotare la rottura per flessione e quindi, secondo le (14), un maggiore spostamento per i singoli elementi e di conseguenza una maggiore capacità di spostamento.

1.3 – Conclusioni

Nei precedenti punti si è discusso di come modificare i parametri ai fini di migliorare l'esito dell'analisi non lineare di una struttura in muratura. Per incrementare il numeratore della relazione (1) occorre incrementare la capacità di spostamento (vedi punto 1.2), mentre per far diminuire il denominatore (domanda di spostamento) occorre incrementare la rigidezza e la resistenza del sistema bilineare equivalente (vedi punto 1.1).

In definitiva, a parità di m^* , l'esito della verifica migliora quando:

- aumenta la capacità di spostamento (u_{max});
- aumenta la rigidezza del sistema bilineare equivalente (k^*);
- aumenta la resistenza del sistema bilineare equivalente (F_y^*).

Se a seguito di un consolidamento si verificano tutte le tre precedenti condizioni, l'esito della verifica migliora sicuramente. Se si verificano alcune delle precedenti, affinché l'esito della verifica migliori, si deve verificare che il contributo migliorativo degli effetti benefici sia maggiore del contributo peggiorativo degli effetti negativi. In "a" di figura 3, a seguito del consolidamento, l'esito della verifica migliora sicuramente in quanto aumenta la capacità di spostamento ($u_{max,c}^* > u_{max}^*$), aumenta la rigidezza del sistema bilineare equivalente ($k_c^* > k^*$) ed aumenta anche la resistenza del sistema ($F_{y,c}^* > F_y^*$). In "b" della stessa figura non si sa se l'esito della verifica migliora o peggiora. In questo caso diminuisce la capacità di spostamento ($u_{max,c}^* < u_{max}^*$), diminuisce la rigidezza del sistema equivalente ($k_c^* < k^*$) ed aumenta la resistenza del sistema ($F_{y,c}^* > F_y^*$). L'esito della verifica migliora se l'effetto positivo dell'incremento della resistenza è maggiore degli effetti negativi della riduzione della rigidezza e della capacità di spostamento.

Da valutare caso per caso il comportamento della struttura nei casi in cui varia la massa partecipante del primo modo m^* . Come si è visto sopra, in molti casi, una riduzione di massa partecipante comporta un miglioramento dell'esito della verifica. In ogni caso, migliorare l'esito della verifica riducendo la massa partecipante non è una strada percorribile in quanto, più è alta la massa partecipante, meglio il metodo (analisi pushover uni-modale) funziona. In molti casi, per poter applicare il metodo viene richiesto un valore minimo per la massa partecipante pari al 75%. Per gli edifici in muratura, visto che non si hanno alternative di calcolo, si può andare in deroga.

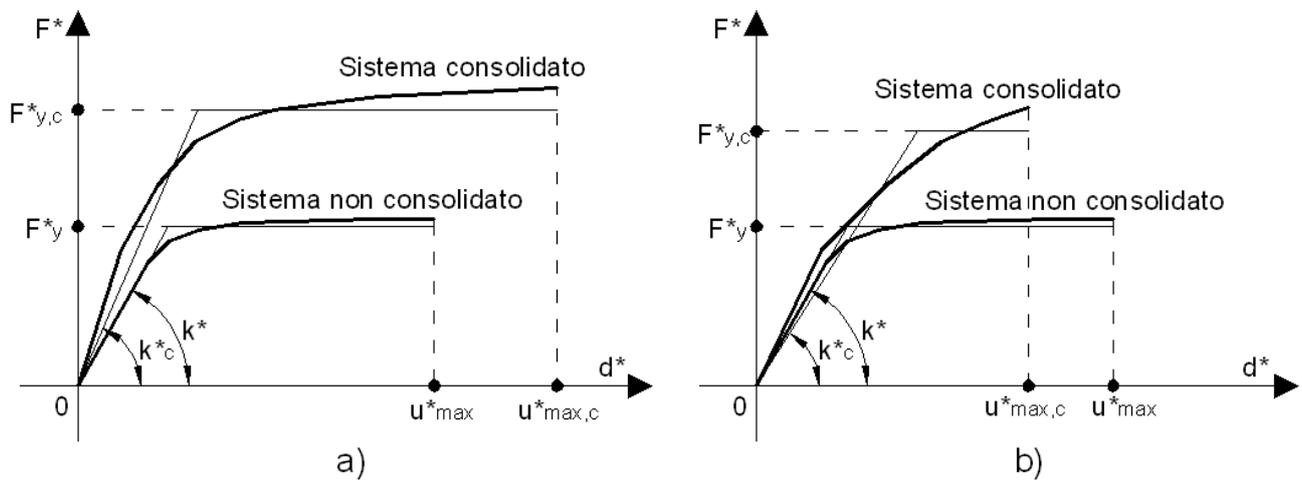


Figura 3 – a) Sistema efficacemente consolidato; b) Sistema con efficacia dubbia dei consolidamenti

Esempio 1

Consolidare la parete in muratura riportata in figura 4.

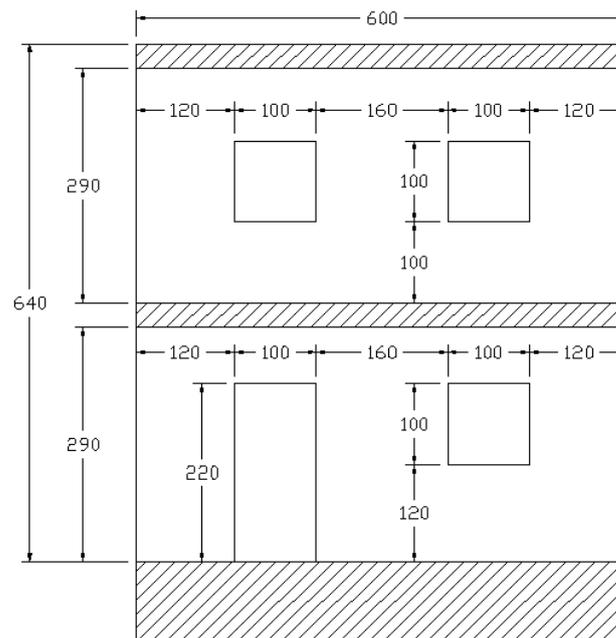


Figura 4 – Parete da esaminare

Dati

- Spessore della muratura (t) = 50 cm
- Solai: $q = 450 \text{ daN/m}^2$; sviluppo 3 m
- Livello di conoscenza = LC1
- Suolo di fondazione = C
- Categoria topografica = T1
- Parametri sismici del sito ($a_g = 0.268$; $F_0 = 2.423$; $T^*_c = 0.365$)
- Muratura in *pietrame disordinata*.

Soluzione

In funzione dei dati sismici del sito e del suolo di fondazione, è possibile determinare le grandezze che definiscono lo spettro elastico che vengono riassunte nella tabella 1.

Parametri sismici							
S_s	S_t	S	C_c	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]	$S_{e,max}$ [cm/s ²]
1.31	1.0	1.31	1.46	0.178	0.534	2.672	834.2

Tabella 1 – Dati che definiscono lo spettro elastico

Per semplificare notevolmente l'esempio, affidiamo la resistente ai soli maschi murari (si trascura l'effetto delle fasce di piano). Poiché la tipologia di muratura è *pietrame disordinata* ed il livello di conoscenza è LC1, secondo quanto riportato nel punto C8.A.2 della Circolare 617/2009, si possono determinare i parametri meccanici che sono riassunti nella tabella 2.

Tipologia di muratura	f_d [daN/cm ²]	τ_0 [daN/cm ²]	E [daN/cm ²]	G [daN/cm ²]	γ [daN/m ³]
Pietrame disordinata	10.00	0.20	8700	2900	1900

Tabella 2 – Parametri meccanici di calcolo della muratura

Gli elementi deformabili di cui è costituita la parete sono riassunti nella tabella 3 (la numerazione degli elementi in tabella coincide con quella di figura 5), dove E è il modulo elastico normale, G è il modulo elastico tangenziale, A è l'area della sezione trasversale, I è il momento d'inerzia rispetto all'asse baricentrico orizzontale ortogonale alla lunghezza dell'elemento ed h è l'altezza dell'elemento. L'elemento deformabile si considera alla Timoshenko.

n° elemento	E [daN/cm ²]	G [daN/cm ²]	A [cm ²]	I [m ⁴]	h [cm]
1	8700	2900	6000	0.072	290
2	8700	2900	8000	0.171	290
3	8700	2900	6000	0.072	290
4	8700	2900	6000	0.072	290
5	8700	2900	8000	0.171	290
6	8700	2900	6000	0.072	290

Tabella 3 – Caratteristiche meccaniche e geometriche degli elementi

Il primo passo dell'analisi è quello di definire la curva di capacità della struttura (nelle ascisse viene rappresentato lo spostamento del punto di controllo, mentre nelle ordinate il tagliante alla base della struttura – esempi di curve di capacità sono riportati nelle figure 1 e 3). Si assume come punto di controllo il baricentro delle masse dell'ultimo piano. Per semplicità si analizza la parete secondo un solo profilo di carico, quello proporzionale alle altezze con verso positivo delle forze orizzontali. Incrementando i carichi orizzontali, alcuni elementi di cui è composta la parete passano dallo stato elastico a quello plastico. L'incremento dei carichi orizzontali avviene fino a quando la struttura è in grado di

sopportarli (per esempio, fino a quando non risulta essere labile). A questo punto, si arresta l'analisi e rimane determinata la curva di capacità. Si riportano in tabella 4 l'andamento delle plasticizzazioni degli elementi, in tabella 5 i risultati numerici dell'analisi ed in figura 6 quelli grafici.

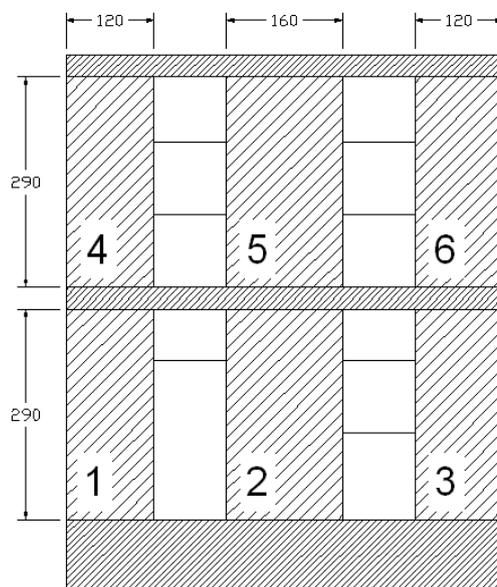


Figura 5 – Maschi murari

Plasticizzazione degli elementi											
n°	P	S	l [cm]	h [cm]	t [cm]	V _u [daN]	δ ₀ [cm]	δ _u [cm]	R	V _b [daN]	d _c [cm]
2	1	P	160	290	50	4206	0.121	1.160	T	7157	0.193
1	1	P	120	290	50	2552	0.134	1.160	T	7566	0.211
3	1	P	120	290	50	3715	0.195	1.160	T	8452	0.278
1	1	C	120	290	50	2552	0.134	1.160	T	8452	1.245
2	1	C	160	290	50	4206	0.121	1.160	T	8452	1.245
3	1	C	120	290	50	3715	0.195	1.160	T	8452	1.245

Tabella 4 – Plasticizzazione degli elementi

Nella tabella 4 si indica con n° il numero dell'elemento (coincide con la numerazione di figura 5), con P il piano in cui si trova, con S lo stato in cui si trova (P = plastico; C = collasso), con l la lunghezza, con h l'altezza, con t lo spessore, con V_u la resistenza, con δ₀ lo spostamento elastico, con δ_u lo spostamento ultimo, con R il tipo di rottura (T = taglio; F = flessione), con V_b il tagliante alla base all'atto della plasticizzazione dell'elemento e con d_c lo spostamento del punto di controllo. Come si può vedere dalla tabella, si plasticizzano solo gli elementi del primo piano, mentre gli elementi del secondo, al collasso della struttura, sono tutti ancora in fase elastica. Inoltre tutti gli elementi si plasticizzano per rottura a taglio.

Nella tabella 5 si indica con m* la massa partecipante del primo modo di vibrare, con m la massa totale, con %m*/m la percentuale di massa partecipante, con k*, T* ed F*_y rispettivamente la rigidezza, il periodo e la resistenza del sistema equivalente, con q* il fattore di struttura, con Γ il fattore di partecipazione modale, con d_{max} la domanda di spostamento, con u_{max} la capacità di spostamento e con s il coefficiente di sicurezza.

m^* [daNm]	m [daNm]	$\%m^*/m$	k^* [daN/cm]	T^* [s]	F_y^* [daN]	q^*	Γ	d_{max} [cm]	u_{max} [cm]	s
35.90	45.76	78.46	37067	0.196	6974	4.29	1.21	2.27	1.24	0.55

Tabella 5 – Risultati analisi

Poiché il periodo T^* è compreso tra T_B e T_C (vedi tabella 1), la relazione che governa la domanda di spostamento è la (3.b). Dai risultati riportati in tabella si evince che l'esito della verifica è negativo in quanto la capacità di spostamento (pari a 1.24 cm – vedi figura 6) è inferiore alla domanda di spostamento (pari a 2.27 cm). Inoltre anche il fattore di struttura q^* assume valore superiore al massimo ammesso.

Visto l'esito negativo della verifica occorre consolidare la parete in modo tale da far aumentare la capacità di spostamento (u_{max}), la rigidezza (k^*) e la resistenza (F_y^*) del sistema equivalente, cercando di mantenere, per quanto possibile, invariata la massa partecipante del primo modo (m^*). Naturalmente, se aumentano tutte le suddette quantità, sicuramente migliora anche l'esito della verifica. Se alcune delle suddette quantità aumentano ed altre diminuiscono bisogna fare in modo che l'effetto positivo delle grandezze che aumentano sia maggiore dell'effetto negativo di quelle che diminuiscono. Nella figura 6 si riporta la curva di capacità del sistema MDOF (nera), del sistema SDOF (blu) e del sistema bilineare equivalente (rossa). Inoltre si riporta anche la domanda di spostamento (d_{max}) e la capacità di spostamento (u_{max}). La distanza colorata di rosso evidenzia di quanto d_{max} è maggiore di u_{max} .

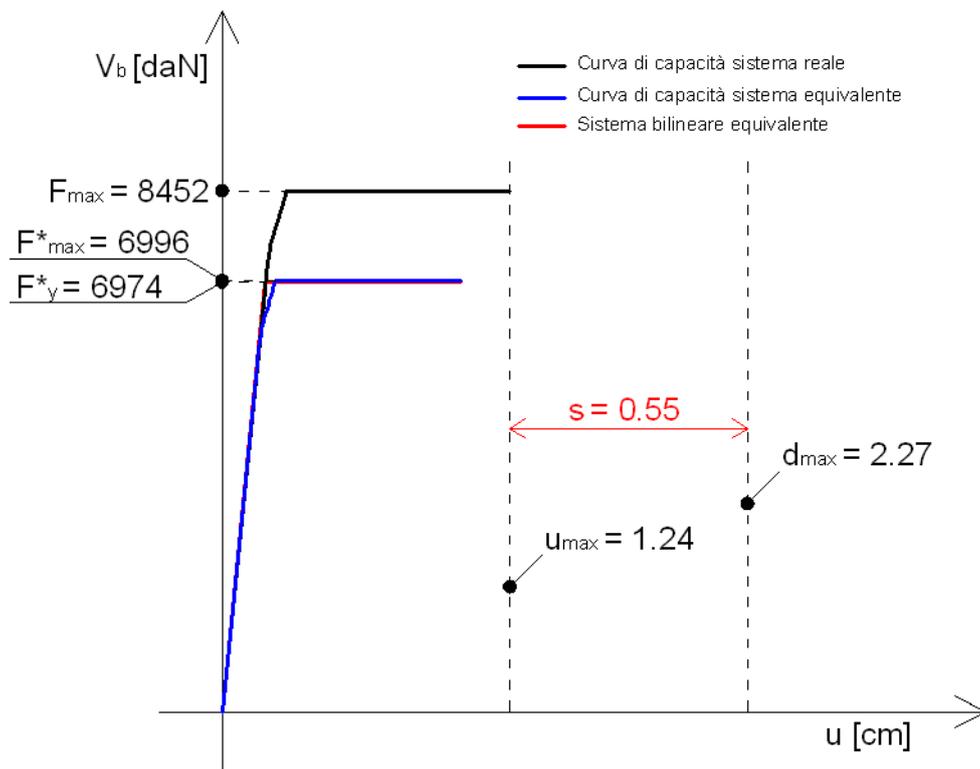


Figura 6 – Risultati grafici

La capacità di spostamento u_{max} si ottiene direttamente dalla curva di capacità del sistema (massima ascissa della curva nera riportata in figura 6). Come detto sopra, la domanda di spostamento d_{max} si ottiene dalla (3.b). Sostituendo i valori numerici ha:

$$S_{De}(T^*) = 834.2 \cdot \left(\frac{0.196}{2\pi} \right)^2 = 0.812 \text{ cm}$$

$$d_{\max}^* = \frac{0.812}{4.29} \left[1 + (4.29 - 1) \cdot \frac{0.534}{0.196} \right] = 1.88 \text{ cm}$$

$$d_{\max} = \Gamma \cdot d_{\max}^* = 2.27 \text{ cm}$$

$$s = \frac{1.24}{2.27} = 0.55 \quad (\text{esito negativo della verifica}) \quad (15)$$

Per migliorare l'esito della verifica, si procede a consolidare la parete attraverso l'applicazione di FRP con lo scopo di incrementare sia la resistenza a flessione che a taglio dei maschi murari. Si collocano le fibre sui maschi per come riportato in figura 7 su entrambe le facce.¹ Poiché si plasticizzano soltanto elementi appartenenti al piano 1, si procede a consolidare solo questi ultimi. Per esempio, consolidare gli elementi del secondo piano può indurre ad un peggioramento delle condizioni generali della parete in quanto il piano debole continua ad essere tale, per cui si raggiunge il collasso senza alcun incremento della forza alla base della struttura. Di contro, il secondo piano, a seguito del consolidamento, può risultare più rigido e quindi meno deformabile, con la conseguenza di una probabile minore capacità di spostamento. Gli elementi verticali servono ad incrementare la resistenza a flessione della parete, mentre gli elementi orizzontali per la resistenza a taglio (in analogia con un pilastro in c.a., i ferri verticali servono per la flessione mentre le staffe per il taglio). Si utilizzano fasce in FRP di larghezza pari a 20 cm. In un primo tentativo di consolidamento, le fasce orizzontali vengono collocate con interasse di 80 cm. Il peso delle fibre è di 300 g/m².

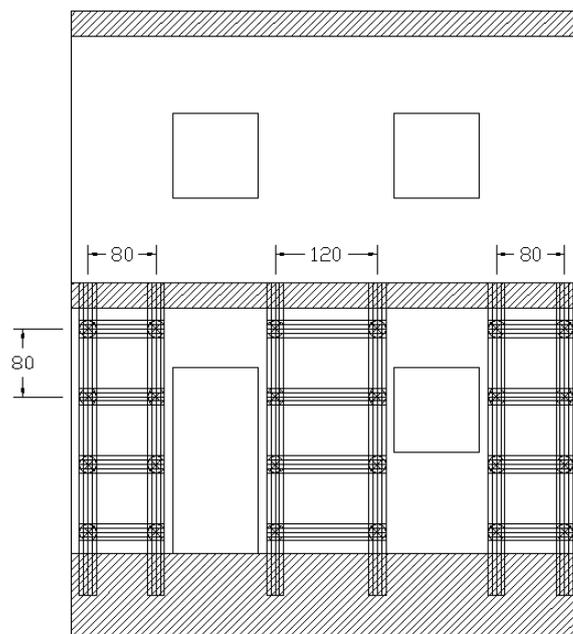


Figura 7 – Disposizione FRP

¹ In questo contesto, per evitare di rendere eccessivamente lungo il documento, si danno per scontati i concetti teorici legati al calcolo delle murature con FRP. Per ulteriori chiarimenti sull'argomento si consiglia il testo "Metodi di calcolo e tecniche di consolidamento per edifici in muratura – Michele Vinci – Dario Flaccovio Editore"

I parametri meccanici del materiale FRP sono riassunti nella tabella 6.

Tipo Fibre	Tipo Applicazione	Tipo Esposizione	E_f [GPa]	ϵ_{fk} [‰]	f_{fk} [MPa]	α_{fE}	α_{ff}	η_a	E_{fd} [GPa]	γ_f	γ_{fd}	f_{fd} [MPa]	PS [g/cm ³]
Carbonio (alta resistenza)	Tipo B	Esterna	260.00	16.70	4342.00	0.90	0.90	0.85	234.00	1.25	1.50	2657.30	1.75

Tabella 6 – Materiale fibre di carbonio

Si rielabora la struttura tenendo conto del consolidamento riportato in figura 7. Nelle successive tabelle e nei successivi grafici si discutono i risultati (per il significato dei simboli si rimanda alle analoghe tabelle precedenti).

Nella tabella 7 si riportano gli elementi che si plasticizzano.

Plasticizzazione degli elementi											
n°	P	S	l [cm]	h [cm]	t [cm]	V_u [daN]	δ_0 [cm]	δ_u [cm]	R	V_b [daN]	d_c [cm]
5	2	P	160	290	50	3119	0.089	1.160	T	8929	0.241
4	2	P	120	290	50	2069	0.108	1.740	F	9951	0.278
6	2	P	120	290	50	2592	0.136	1.160	T	10633	0.312
4	2	C	120	290	50	3119	0.089	1.160	T	10633	1.160
5	2	C	160	290	50	3119	0.089	1.160	T	10633	1.160
6	2	C	120	290	50	2592	0.136	1.160	T	10633	1.160

Tabella 7 – Plasticizzazione degli elementi

Dalla tabella si deduce che a plasticizzarsi non sono più gli elementi del primo piano, ma quelli del secondo. Il consolidamento ha incrementato la resistenza degli elementi tale che siano più resistenti di quelli del livello superiore. Come si può notare, aumenta il tagliante alla base, passando dal valore 8452 daN (vedi tabella 4) al valore 10633 daN (effetto positivo). Di contro, diminuisce (se pur di poco) la capacità di spostamento, passando dal valore 1.245 cm al valore 1.160 cm (effetto negativo).

Nella tabella 8 si riportano i risultati numerici dell'analisi.

m^* [daNm]	m [daNm]	% m^*/m	k^* [daN/cm]	T^* [s]	F_y^* [daN]	q^*	Γ	d_{max} [cm]	u_{max} [cm]	s
35.90	45.76	78.46	37067	0.196	8729	3.43	1.21	2.17	1.16	0.53

Tabella 8 – Risultati analisi

Nella figura 8 si riportano i risultati grafici (nella figura, per le dimensioni limitate della struttura, la curva di capacità del sistema equivalente ed il sistema bilineare sono praticamente coincidenti).

Dal confronto delle tabelle 5 e 8 e dei grafici 6 e 8 si deduce che aumenta la resistenza del sistema equivalente (F_y^*), passando dal valore 6974 daN al valore 8729 daN (migliorativo per la verifica), si riduce la capacità di spostamento passando dal valore 1.24 cm al valore 1.16 cm (peggiorativo per la verifica), mentre la rigidezza (k^*) e la massa partecipante (m^*) si mantengono costanti nei due casi. Poiché aumenta la resistenza del sistema equivalente ed m^* e T^* si mantengono costanti, per la relazione (11), diminuisce il fattore di struttura q^* passando dal valore 4.29 al valore 3.43 (vedi tabelle 5 ed 8). Quest'ultimo, anche se ancora oltre il limite massimo consentito dalle norme, assume un valore più basso e quindi più accettabile.

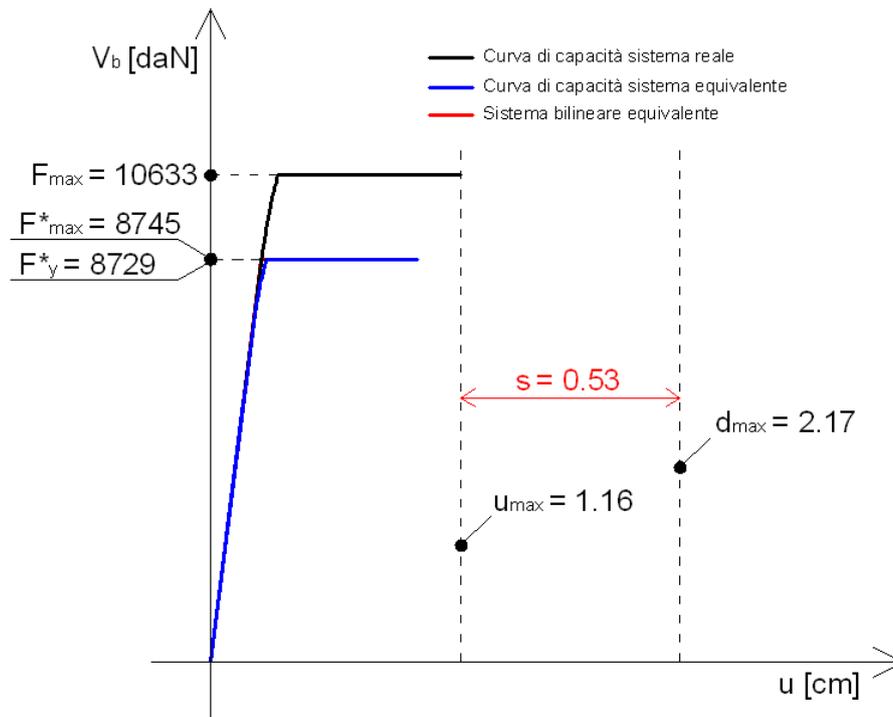


Figura 8 – Risultati grafici

Ai fini della valutazione del coefficiente di sicurezza s (relazione (1)), occorre valutare se gli effetti dell'incremento di F^*_y sono maggiori degli effetti della riduzione di u_{max} . A tal proposito analizziamo dettagliatamente le formule che governano il problema. Analizzando le relazioni si ottiene:

$$d^*_{max} = \frac{0.812}{3.43} \left[1 + (3.43 - 1) \cdot \frac{0.534}{0.196} \right] = 1.804 \text{ cm}$$

$$d_{max} = \Gamma \cdot d^*_{max} = 2.17 \text{ cm}$$

La domanda di spostamento diminuisce passando dal valore 2.27 cm al valore 2.17 cm. Dal rapporto dei due spostamenti si ottiene:

$$s = \frac{1.16}{2.17} = 0.53 \quad (\text{esito negativo della verifica}) \quad (16)$$

Dal confronto tra la (15) e la (16) si deduce che l'esito della verifica è peggiorato (se pur di poco). La leggera riduzione di u_{max} e di d_{max} porta ad una leggera riduzione del coefficiente di sicurezza s .

In definitiva il consolidamento non ha portato il beneficio atteso. Si ha un miglioramento in termini di fattore di struttura q^* , ma non si hanno significative variazioni per quanto riguarda il coefficiente di sicurezza s .

Dalle tabelle 4 e 7 si deduce che il piano debole è diventato il secondo (si plasticizzano tutti gli elementi del piano 2). In questa fase del consolidamento, rafforzare ulteriormente gli elementi del primo piano è del tutto inutile in quanto non rappresentano più il punto di debolezza della parete.

Si passa ad una seconda ipotesi di consolidamento: si estende il consolidamento al piano superiore della parete con la stessa disposizione di FRP del piano inferiore (vedi figura 9).

Rielaborando la struttura tenendo conto della nuova disposizione di consolidamenti, si ottiene la sequenza di plasticizzazioni riportate in tabella 9.

Plasticizzazione degli elementi											
n°	P	S	l [cm]	h [cm]	t [cm]	V _u [daN]	δ ₀ [cm]	δ _u [cm]	R	V _b [daN]	d _c [cm]
2	1	P	160	290	50	8719	0.250	1.160	T	14791	0.399
1	1	P	120	290	50	4529	0.270	1.740	F	15404	0.425
3	1	P	120	290	50	4692	0.279	1.740	F	15540	0.430
1	1	C	120	290	50	8719	0.250	1.160	T	15540	1.316
2	1	C	160	290	50	8719	0.250	1.160	T	15540	1.316
3	1	C	120	290	50	4692	0.279	1.740	F	15540	1.316

Tabella 9 – Plasticizzazione degli elementi

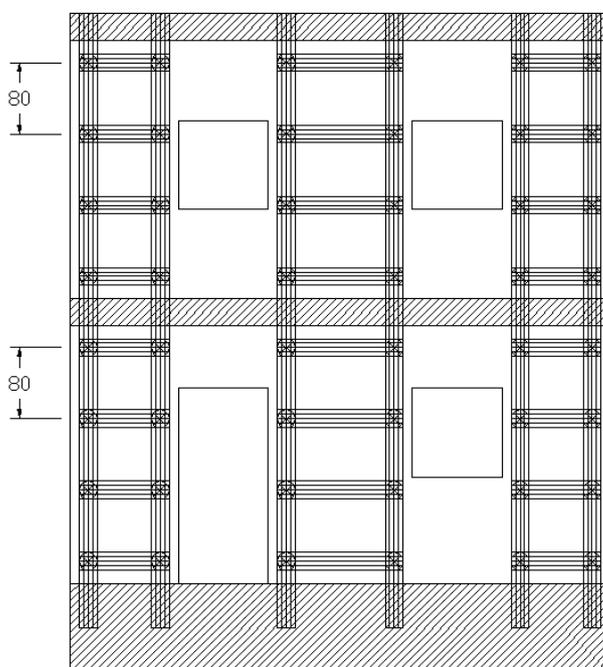


Figura 9 – Disposizione FRP

Dalla tabella si evince che a plasticizzarsi sono nuovamente gli elementi del primo piano. Come si può notare, aumenta ancora il tagliante alla base, raggiungendo il valore 15540 daN (vedi tabella 9).

Nella tabella 10 e nella figura 10 si riassumo i risultati, sia numerici che grafici.

m* [daNm]	m [daNm]	%m*/m	k* [daN/cm]	T* [s]	F* _y [daN]	q*	Γ	d _{max} [cm]	u _{max} [cm]	s
35.90	45.76	78.46	37067	0.196	12803	2.34	1.21	1.94	1.32	0.68

Tabella 10 – Risultati analisi

Dai risultati si deduce che aumenta ancora la resistenza del sistema equivalente (F*_y), raggiungendo il valore 12803 daN (migliorativo per la verifica). Questo dato comporta una riduzione del fattore di struttura (m* si mantiene costante) rientrando nei limiti previsti dalla normativa (inferiore a 3):

$$q^* = \frac{S_e(T^*)}{\frac{F_y^*}{m^*}} = \frac{834.2}{\frac{12803}{35.90}} = 2.34$$

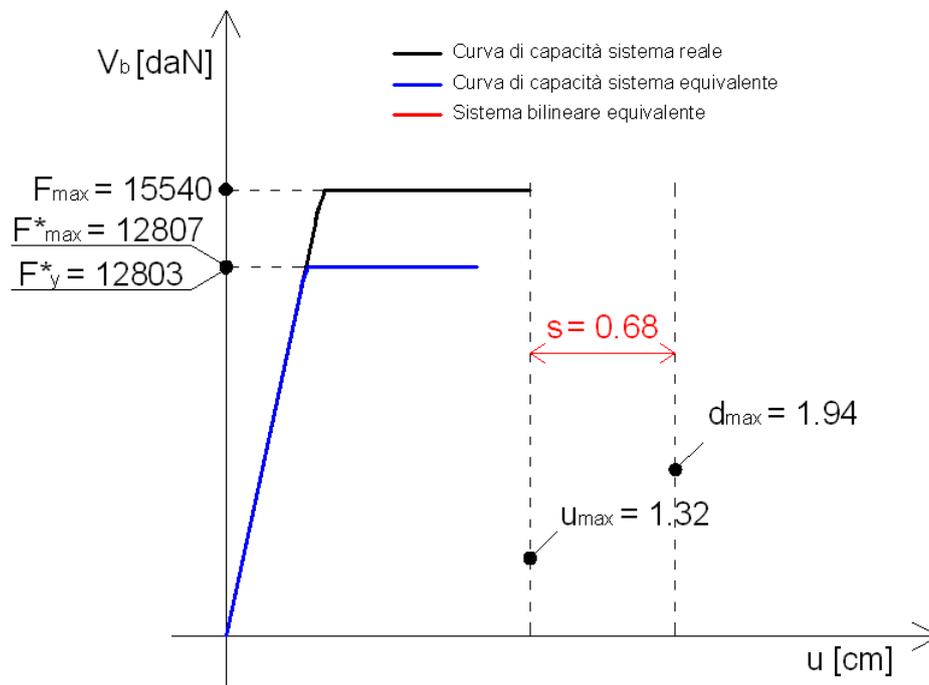


Figura 10 – Risultati grafici

Inoltre, l'incremento di F^*_y comporta anche una riduzione della domanda di spostamento (migliorativo per la verifica):

$$d^*_{max} = \frac{0.812}{2.34} \left[1 + (2.34 - 1) \cdot \frac{0.534}{0.196} \right] = 1.61 \text{ cm}$$

$$d_{max} = \Gamma \cdot d^*_{max} = 1.94 \text{ cm}$$

La capacità di spostamento aumenta al valore 1.32 cm (migliorativo per la verifica). In definitiva il coefficiente di sicurezza assume il seguente valore:

$$s = \frac{1.32}{1.94} = 0.68 \quad (\text{esito negativo della verifica}) \quad (17)$$

Dal confronto tra la (15) e la (17) si deduce che l'esito della verifica è migliorato. Quest'ultima disposizione di consolidamenti ha portato il beneficio atteso. Si ha un miglioramento sia in termini di fattore di struttura q^* che di coefficiente di sicurezza s . A questo punto dell'esempio abbiamo raggiunto la condizione di miglioramento in quanto si è passato dal valore iniziale di q^* pari a 4.29 (non conforme alle richieste di normativa) al valore 2.34 (conforme con la normativa). Inoltre il coefficiente di sicurezza (s) della verifica è passato dal valore iniziale di 0.55 a quello finale di 0.68 (per essere soddisfatta la verifica occorre che sia maggiore o uguale ad 1). Per raggiungere la condizione di adeguamento, bisogna intervenire ancora sul consolidamento della parete. Dalla tabella 9 si evince che gli elementi che si plasticizzano sono tutti al primo piano. Inoltre, due si plasticizzano per meccanismo a flessione, mentre

uno per meccanismo a taglio. Poiché attraverso le relazioni (14) si deduce che se la rottura avviene per flessione, lo spostamento ultimo dell'elemento può essere di 0.6% l'altezza dell'elemento stesso, contro lo 0.4% della rottura a taglio, ne consegue che se si progettano i consolidamenti in modo da indurre la rottura per flessione, si hanno ulteriori capacità deformative e quindi di conseguenza, molto probabilmente un incremento della capacità di spostamento. Avendo consolidato con FRP, se si riduce il passo degli elementi orizzontali e si lascia inalterata la disposizione di quelli verticali, aumenta la resistenza a taglio (funziona come gli elementi in cemento armato: più sono vicini le staffe, maggiore è la resistenza a taglio) e si mantiene costante quella a pressoflessione. Basta ridurre (anche a tentativi) il passo dei suddetti elementi orizzontali fino a quanto tutti i maschi murari collassano per flessione. Si riduce il passo degli elementi orizzontali a 50 cm (nel caso precedente l'interasse era fissato a 80 cm). Nella figura 11 viene riportata la parete con la nuova configurazione degli elementi orizzontali (l'interasse degli elementi al secondo piano viene mantenuto ad 80 cm).

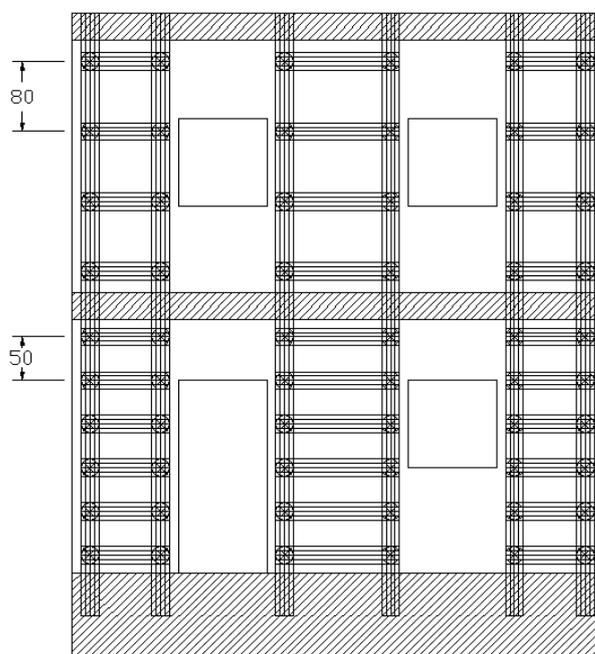


Figura 11 – Disposizione FRP

Rielaborando la struttura tenendo conto della nuova disposizione di consolidamenti, si ottiene la sequenza di plasticizzazioni riportata in tabella 11.

Plasticizzazione degli elementi											
n°	P	S	l [cm]	h [cm]	t [cm]	V _u [daN]	δ ₀ [cm]	δ _u [cm]	R	V _b [daN]	d _c [cm]
2	1	P	120	290	50	4464	0.266	1.740	F	15745	0.425
1	1	P	120	290	50	4611	0.276	1.740	F	16154	0.438
3	1	P	160	290	50	10285	0.326	1.740	F	17585	0.499
1	1	C	120	290	50	4611	0.266	1.740	F	17585	1.917
1	1	C	120	290	50	4611	0.276	1.740	F	17585	1.917
3	1	C	160	290	50	10285	0.326	1.740	F	17585	1.917

Tabella 11 – Plasticizzazione degli elementi

Dalla tabella si evince che a plasticizzarsi sono ancora gli elementi del primo piano. Come si può notare però, per gli elementi che raggiungono la fase plastica, la rottura avviene per flessione, quindi ci si può aspettare un incremento della capacità di spostamento (u_{max}). Inoltre aumenta anche la resistenza del sistema, passando da 15540 daN del caso precedente ai 17585 daN di quest'ultima configurazione di consolidamenti. Nella tabella 12 e nella figura 12 si riassumo i risultati, sia numerici che grafici.

m^* [daNm]	m [daNm]	$\%m^*/m$	k^* [daN/cm]	T^* [s]	F_y^* [daN]	q^*	Γ	d_{max} [cm]	u_{max} [cm]	s
35.90	45.76	78.46	37067	0.196	14487	2.07	1.21	1.85	1.92	1.04

Tabella 12 – Risultati analisi

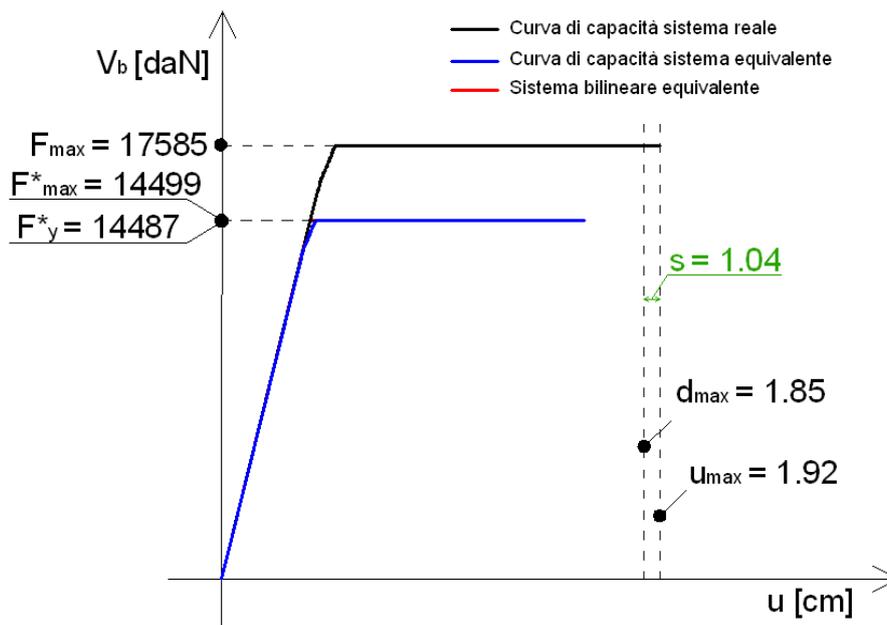


Figura 12 – Risultati grafici

Analizzando la precedente tabella ed il precedente grafico, si può osservare che la capacità di spostamento (u_{max}) aumenta notevolmente rispetto al caso precedente raggiungendo il valore 1.92 cm. Tale incremento è dovuto al fatto che la rottura degli elementi avviene per meccanismo a flessione e non a taglio, che per le relazioni (14) sono consentiti spostamenti maggiori. Inoltre aumenta ancora la resistenza del sistema equivalente raggiungendo i 17585 daN. Si ha:

$$q^* = \frac{S_e(T^*)}{\frac{F_y^*}{m^*}} = \frac{834.2}{\frac{14487}{35.90}} = 2.07$$

$$d_{max}^* = \frac{0.812}{2.07} \left[1 + (2.07 - 1) \cdot \frac{0.534}{0.196} \right] = 1.536 \text{ cm}$$

$$d_{max} = \Gamma \cdot d_{max}^* = 1.85 \text{ cm}$$

In definitiva il coefficiente di sicurezza assume il seguente valore:

$$s = \frac{1.92}{1.85} = 1.04 \quad (\text{esito positivo della verifica}) \quad (18)$$

Con quest'ultima configurazione di consolidamenti la parete risulta essere adeguata alle esigenze di normativa e quindi verificata.

Nella tabella 13 si mettono a confronto i risultati della parete prima (ante) e dopo (post) l'intervento.

	m^* [daNm]	m [daNm]	$\%m^*/m$	k^* [daN/cm]	T^* [s]	F_y^* [daN]	q^*	Γ	d_{max} [cm]	u_{max} [cm]	s
ante	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	6974	4.29	1.21	2.27	1.24	0.55
post	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	14487	2.07	1.21	1.85	1.92	1.04

Tabella 13 – Confronto risultati ante e post operam

Nella figura 13 si mettono a confronto graficamente i risultati della parete prima (ante) e dopo (post) l'intervento.

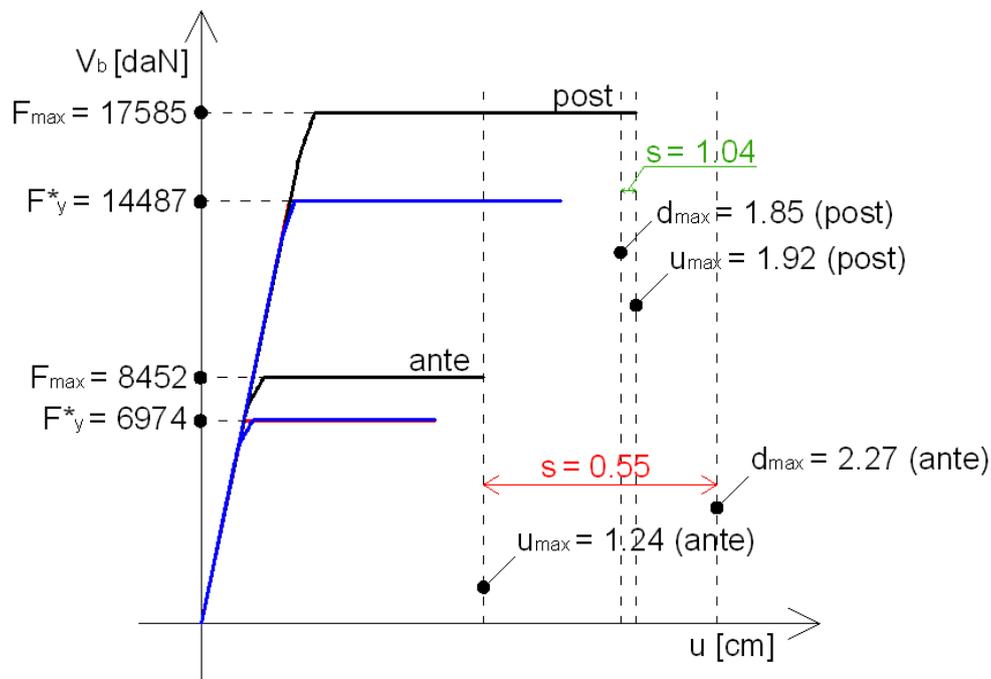


Figura 13 – Confronto dei risultati tra prima (ante) e dopo (post) dell'intervento

Dal confronto dei risultati si deduce che si mantengono costanti m^* e k^* (ininfluente ai fini della verifica) e che aumentano u_{max} ed F_y^* (migliorativo ai fini della verifica).

Esempio 2

Data la parete dell'esempio 1, si consolidi utilizzando la tecnica dell'intonaco armato.

Soluzione

Si consolida la parete con intonaco armato per come riportato in figura 14. Secondo il punto C8.A.2 della Circolare 617/2009, i parametri meccanici, sia in termini di resistenza

che di moduli elastici, devono essere moltiplicati per un coefficiente migliorativo pari ad 2.5 (per il materiale “Pietrame disordinata”).

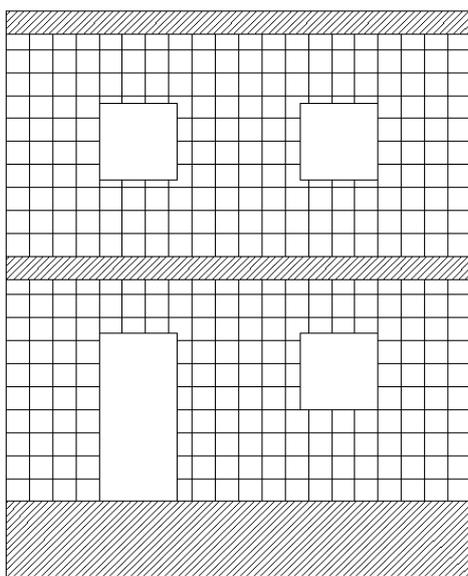


Figura 14 – Parete consolidata con intonaco armato

Pietrame disordinata con e senza consolidamento					
	f_d [daN/cm ²]	τ_0 [daN/cm ²]	E [daN/cm ²]	G [daN/cm ²]	γ [daN/m ³]
Senza consolidamento	10.00	0.20	8700	2900	1900
Con consolidamento	25.00	0.50	21750	7250	1800

Tabella 14 – Parametri meccanici di calcolo della muratura

Elaborando la struttura consolidata con intonaco armato si ottengono i risultati sotto riportati (post).

	m^* [daNm]	m [daNm]	% m^*/m	k^* [daN/cm]	T* [s]	F_y^* [daN]	q^*	Γ	d_{max} [cm]	u_{max} [cm]	s
ante	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	6974	4.29	1.21	2.27	1.24	0.55
post	38.42	49.02	78.38	104160	0.121	12198	2.13	1.21	0.85	1.22	1.43

Tabella 15 – Confronto risultati ante e post operam

Rispetto al caso non consolidato la capacità di spostamento si mantiene pressoché costante (1.24 cm nel caso ante contro i 1.22 cm nel caso post), mentre aumentano notevolmente sia la resistenza (F_y^*) del sistema equivalente, passando dal valore 8452 daN al valore 12198, che la rigidezza (k^*) del sistema equivalente passando dal valore 37067 daN/cm al valore 104160 daN/cm. Tenendo conto che la forma modale si mantiene pressoché costante e che aumentano notevolmente F_y^* e k^* , ne consegue che aumenta anche notevolmente il coefficiente di sicurezza della verifica, passando dal valore 0.55 (esito negativo per la verifica) al valore 1.43 (esito positivo per la verifica). Il fattore di struttura q^* passa dal valore 4.29 al valore 2.13, rientrando nel limite previsto dalla normativa.

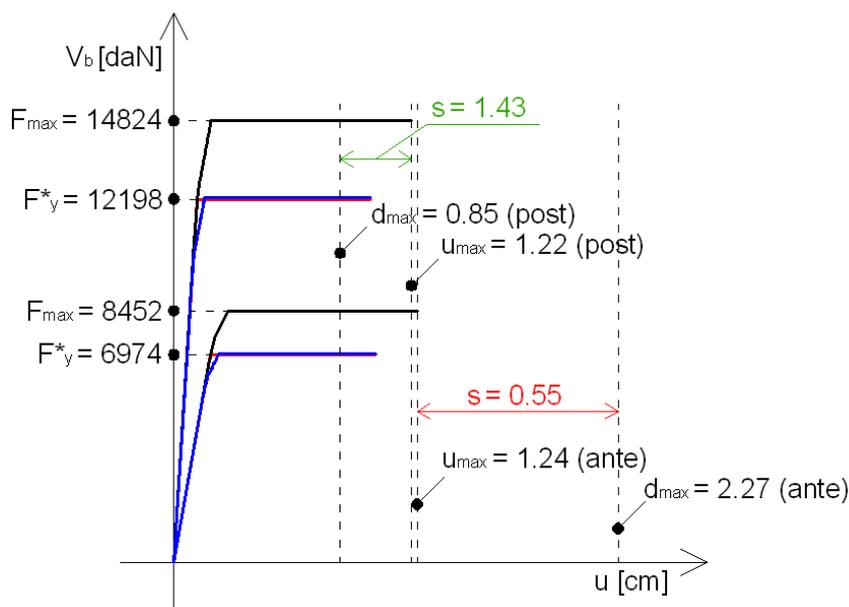


Figura 15 – Confronto dei risultati tra prima (ante) e dopo (post) dell'intervento

Esempio 3

Data la parete dell'esempio 1, si consolidi utilizzando la tecnica del metodo CAM.

Soluzione

In questo caso la parete viene consolidata con la tecnica del sistema CAM. La tecnica consiste nel consolidare la parete attraverso l'utilizzo di nastri metallici, sia orizzontali che verticali. Generalmente, nel caso dei maschi murari i nastri verticali servono per incrementare la resistenza a flessione, mentre quelli orizzontali servono per incrementare la resistenza a taglio. Nel caso delle fasce di piano (travi di accoppiamento), i nastri verticali incrementano la resistenza a taglio mentre quelli orizzontali la resistenza a flessione².

Nel nostro esempio, per i nastri orizzontali e verticali si utilizzano due tipologie di nastri diversi. Quelli verticali hanno maggiore duttilità e minore resistenza, mentre quelli orizzontali hanno resistenza maggiore e scarsissima duttilità. I nastri a bassa duttilità possono essere utilizzati soltanto per la resistenza a taglio (elementi orizzontali per i maschi murari). Nella tabella 16 si riassumono le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati.

	I_n [mm]	n°	s [mm]	f_{yd} [daN/cm ²]	E [daN/cm ²]	ϵ_{ud} [%]
Nastro Inox 301 (verticali)	19	4	0.90	3180	2000000	5.48
Nastro Inox 301-C1000 (orizzontali)	19	3	0.90	5600	2000000	0.28

Tabella 16 – Proprietà meccaniche dei nastri utilizzati

² Per un riferimento teorico ed esecutivo sull'argomento consultare il testo *Il sistema CAM - Cuciture attive dei manufatti* di R. Marnetto, A. Vari ed M. Leonori – Edizione PreProgetti – 2014.

Nella tabella si indica con:

- I_n la larghezza di ogni singolo nastro;
- n° il numero di avvolgimenti;
- s lo spessore del nastro di ogni singolo avvolgimento;
- f_{yd} la resistenza di calcolo dell'acciaio;
- E il modulo elastico dell'acciaio;
- ε_{ud} la deformabilità ultima.

Uno dei vantaggi che offre il metodo CAM è quello di poter gestire la resistenza, sia a taglio che a flessione, incrementando la resistenza dei singoli nastri (per esempio aumentando il numero di avvolgimenti) e riducendo l'interasse tra due elementi (per esempio, nel caso dei maschi murari, diminuendo l'interasse dei nastri orizzontali si aumenta la resistenza a taglio e diminuendo l'interasse dei nastri verticali si aumenta la resistenza a flessione). Quanto detto consente di gestire i nastri fino a quando si raggiunge il livello di resistenza voluto.

Iniziamo applicando la disposizione di nastri riportata in tabella 16 con interasse tra elementi verticali ed orizzontali pari a 80 cm (la distanza massima tra due nastri successivi è di 80 cm. Per motivi geometrici in alcuni punti l'interasse potrebbe essere minore – vedi figura 16).

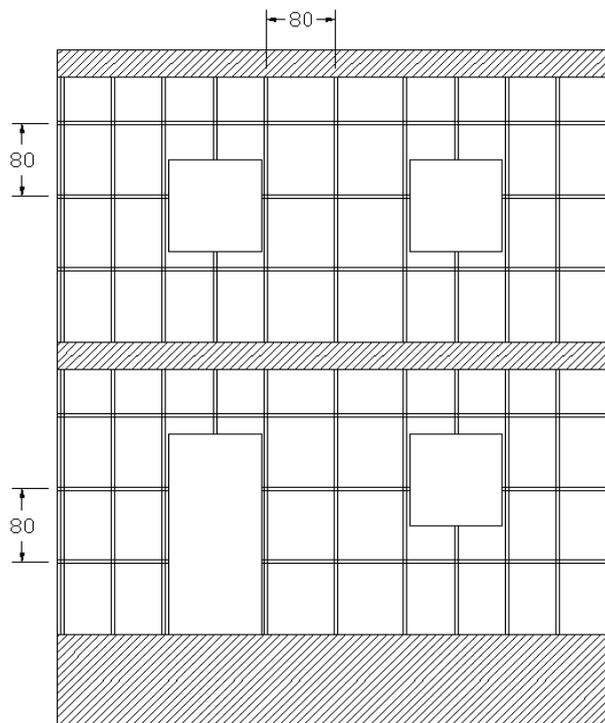


Figura 16 – Parete consolidata con sistema CAM (interasse 80 cm)

Elaborando la struttura tenendo conto del consolidamento, si ottiene la sequenza di plasticizzazioni riportata in tabella 17 (per il significato dei simboli si consulti la tabella 4). Come è possibile vedere dalla tabella, si plasticizzano e collassano solo gli elementi del primo piano, alcuni per flessione ed altri per taglio.

Plasticizzazione degli elementi											
n°	P	S	l [cm]	h [cm]	t [cm]	V _u [daN]	δ ₀ [cm]	δ _u [cm]	R	V _b [daN]	d _c [cm]
1	1	P	120	290	50	3491	0.183	1.740	F	11042	0.298
2	1	P	120	290	50	8094	0.232	1.740	T	13087	0.365
3	1	P	160	290	50	4871	0.255	1.740	F	13427	0.386
4	1	C	120	290	50	8094	0.232	1.740	T	13427	1.294

Tabella 17 – Plasticizzazione degli elementi

Nella tabella 18 ed in figura 17 si riporta il confronto dei risultati tra prima e dopo l'intervento.

	m* [daNm]	m [daNm]	%m*/m	k* [daN/cm]	T* [s]	F* _y [daN]	q*	Γ	d _{max} [cm]	u _{max} [cm]	s
ante	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	6974	4.29	1.21	2.27	1.24	0.55
post	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	11042	2.71	1.21	2.04	1.29	0.63

Tabella 18 – Confronto risultati ante e post operam

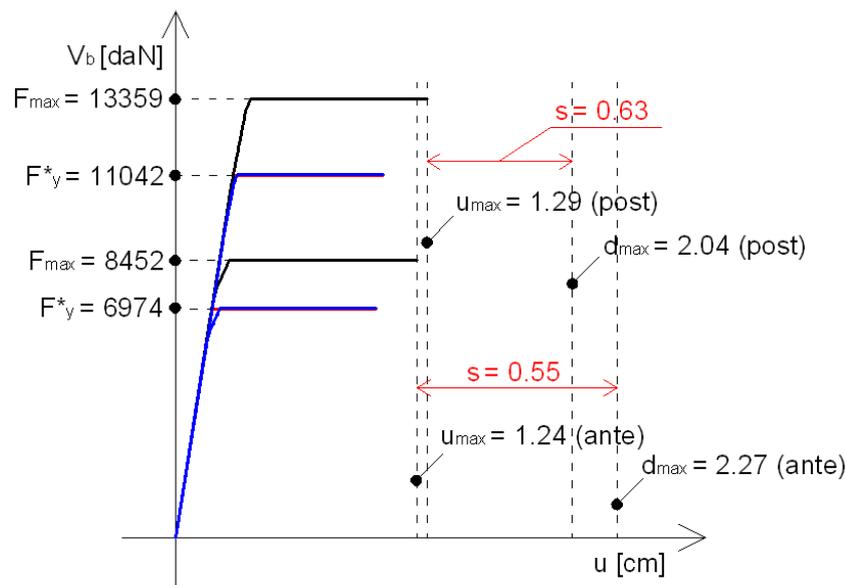


Figura 17 – Confronto dei risultati tra prima (ante) e dopo (post) dell'intervento

Come si vede dai risultati, l'esito della verifica migliora in quanto il coefficiente di sicurezza passa dal valore 0.55 al valore 0.63 ed il fattore di struttura passa dal valore 4.29 al valore 2.71 (minore di 3 per cui accettabile). In questo caso si può parlare di miglioramento sismico.

Per migliorare ulteriormente l'esito della verifica si può giocare sulla disposizione dei nastri che costituiscono il sistema CAM. Si procede per tentativi fino a quando non si raggiunge il livello di sicurezza cercato. Tenendo conto che si plasticizzano e collassano solo elementi del primo piano (vedi tabella 17), si procede riducendo l'interasse dei nastri per quest'ultimi elementi. La disposizione finale dei nastri è quella riportata in figura 18.

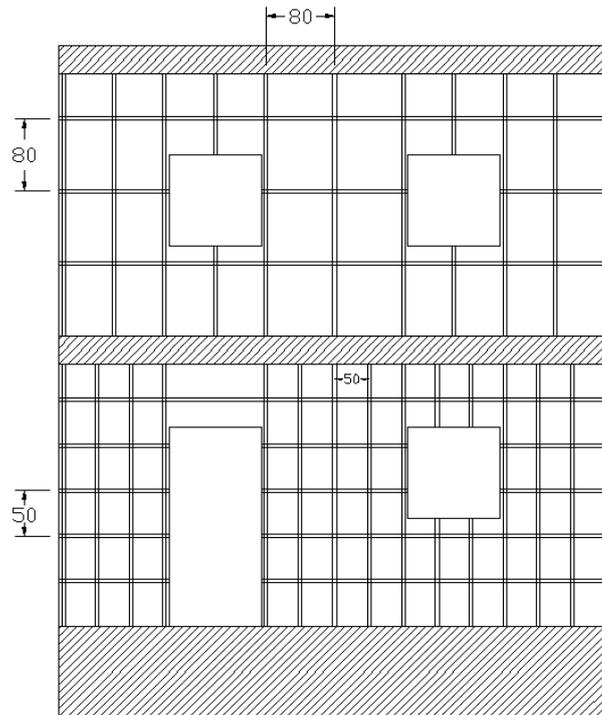


Figura 18 – Parete consolidata con sistema CAM (interasse 50 cm al primo livello e 80 cm al secondo)

Analizzando la struttura con quest'ultima disposizione di consolidamenti si ottengono i risultati sotto riportati.

Plasticizzazione degli elementi											
n°	P	S	l [cm]	h [cm]	t [cm]	V_u [daN]	δ_0 [cm]	δ_u [cm]	R	V_b [daN]	d_c [cm]
1	1	P	120	290	50	4125	0.216	1.740	F	12814	0.346
2	1	P	160	290	50	9993	0.287	1.740	F	15881	0.446
3	1	P	120	290	50	5497	0.288	1.740	F	15949	0.446
4	1	C	120	290	50	4125	0.216	1.740	F	15949	1.958
5	1	C	160	290	50	9993	0.287	1.740	F	15949	1.958
6	1	C	120	290	50	5497	0.288	1.740	F	15949	1.958

Tabella 19 – Plasticizzazione degli elementi

	m^* [daNm]	m [daNm]	$\%m^*/m$	k^* [daN/cm]	T^* [s]	F_y^* [daN]	q^*	Γ	d_{max} [cm]	u_{max} [cm]	s
ante	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	6974	4.29	1.21	2.27	1.24	0.55
post	35.90	45.76	78.46	37067	0.196	13130	2.28	1.21	1.92	1.96	1.01

Tabella 20 – Confronto risultati ante e post operam

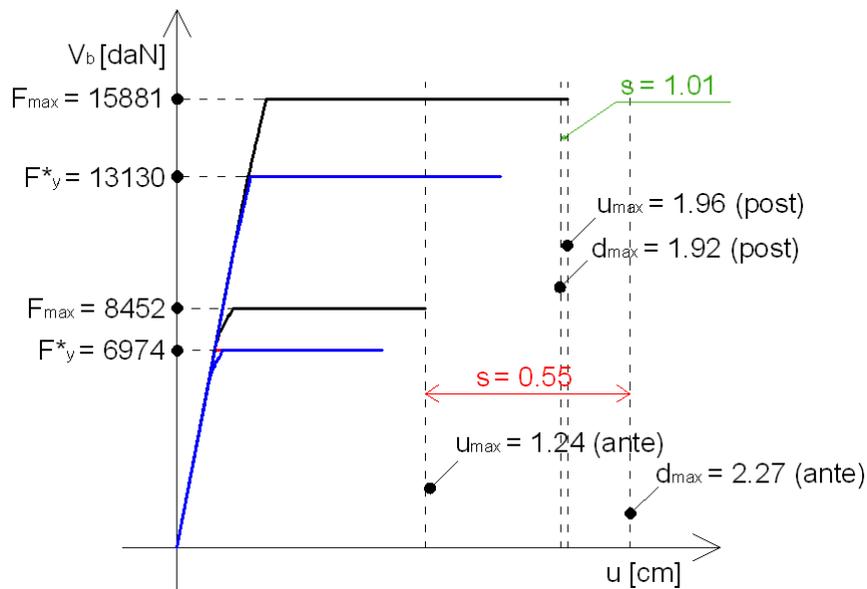


Figura 19 – Confronto dei risultati tra prima (ante) e dopo (post) dell'intervento

Poiché il sistema CAM non incide sulla rigidezza (iniziale) della struttura, non varia nei due casi (ante e post operam), per cui ininfluente ai fini della verifica. Aumenta notevolmente la resistenza del sistema bilineare equivalente F^*_y passando dal valore 6974 daN al valore 15881 daN, consentendo una riduzione della domanda di spostamento, passando quest'ultima dal valore 2.27 cm al valore 1.92 cm (effetto positivo ai fini della verifica). Aumenta anche notevolmente la capacità di spostamento del sistema passando da 1.24 cm ad 1.96 cm (effetto positivo ai fini della verifica). Quest'ultima aumenta in quanto i nastri orizzontali del sistema CAM (si ricorda che tali nastri sono stati utilizzati con resistenza maggiore rispetto a quelli verticali – vedi tabella 16) comportano un notevole incremento della resistenza a taglio, portando tutti gli elementi a collassare per flessione. Per normativa, lo spostamento ultimo per flessione di un maschio murario è $0.006 \cdot h$ (h è l'altezza dell'elemento), mentre per taglio è $0.004 \cdot h$. Ciò comporta un incremento di deformabilità del sistema e quindi di conseguenza una maggiore capacità di spostamento. In definitiva con la disposizione del rinforzo riportata in figura 18, l'esito della verifica è positivo.

$$s = \frac{1.96}{1.92} = 1.01 \quad (\text{esito positivo della verifica}) \quad (19)$$