Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di
Problemi Strutturali dell'Edilizia Storica

COMPORTAMENTO SISMICO DELLE STRUTTURE MISTE

Prof. Ing. Natalino Gattesco

BIBLIOGRAFIA

Tomazevic M. (2001) "Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings", Series on Innovation in Structures and Construction – Vol. 1, Imperial College Press, London.

Paulay T., Priestley M.J.N., (1992) "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley e sons, Inc.

Eurocodice 6 – "Progettazione delle strutture in muratura – Parte 1.1: Regole generali per gli edifici – Regole per la muratura armata e non armata", UNI ENV 1996-1-1

Eurocodice 8 – "Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 1.3: Regole generali. Regole specifiche per i diversi materiali ed elementi", UNI ENV 1998-1-3

Circolare 10.02.1997 n. 65/AA.GG. "Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al Decreto Ministeriale 16.01.1996.

INTRODUZIONE

Nell'art.5 della Legge 02.02.1974 n. 64 "*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*" **sono elencati i sistemi costruttivi per gli edifici**

a) Struttura intelaiata in cemento armato normale o precompresso, acciaio o ***sistemi combinati dei predetti materiali***

b) Struttura a pannelli portanti

c) Struttura in muratura

d) Struttura in legname

STRUTTURE MISTE

Sono strutture composte dall'associazione di elementi strutturali realizzati con materiali diversi

Tali elementi possono essere disposti in modo da funzionare:

- **in parallelo (***disposti altimetricamente allo stesso piano***)**
- **in serie (***disposti altimetricamente su piani successivi***).**

Le strutture del primo tipo vengono definite *composte*

le seconde, invece, vengono definite *ibride*

STRUTTURE COMPOSTE

Riguardano principalmente l'associazione in piano di elementi strutturali

- **In calcestruzzo e muratura (***telai in c.a. tamponati con muratura, muratura con nuclei e setti in c.a.***)**
- **in calcestruzzo e acciaio (***strutture miste acciaio-cls, edifici in acciaio con nuclei in calcestruzzo***)**
- **In acciaio e muratura (***telai in acciaio tamponati con muratura, muratura con pareti in acciaio***)**

STRUTTURE COMPOSTE

Riguardano principalmente l'associazione in piano di elementi strutturali

- **In calcestruzzo e legno (***struttura in calcestruzzo con solai in legno o misti legno-cls***)**
- **In muratura e legno (***muratura con solai in legno, legno-cls o legno-acciaio***)**
- **In legno e acciaio (***struttura in legno con rinforzi in acciaio***)**

STRUTTURE IBRIDE

Riguardano edifici che presentano piani realizzati con diversi materiali (*es. Piano terra in cls e piani sup. in legno***)**

In particolare si possono elencare i casi ibridi di:

- **calcestruzzo e legno (***primo piano in calcestruzzo e piani superiori in legno***)**
- **calcestruzzo e acciaio (***primo piano in calcestruzzo e piani superiori in acciaio***)**
- **muratura e calcestruzzo (***primo piano in muratura e piani superiori in calcestruzzo***)**
- **muratura e acciaio (***primo piano in muratura e piani superiori in acciaio***)**

COMPORTAMENTO SISMICO

Le strutture composte possono rispettare sia la condizione di *edificio regolare in pianta* che la condizione di *edificio regolare in altezza*.

E' quindi possibile utilizzare qualsiasi metodo di analisi per la valutazione delle sollecitazioni sismiche.

- *Analisi lineare*
- *Analisi dinamica modale*
- *Analisi statica non lineare (push-over)*
- *Analisi dinamica non lineare*

COMPORTAMENTO SISMICO

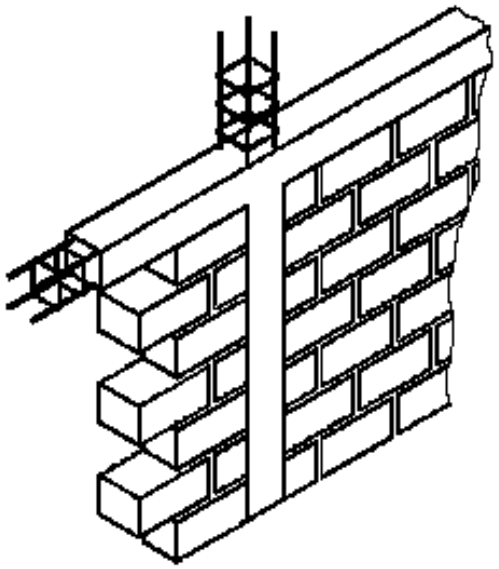
Le strutture ibride, invece, normalmente non soddisfano la condizione di *edificio regolare in altezza*.

E' necessario ricorrere ad analisi di tipo dinamico (*primo modo non lineare con l'altezza).*

- *Analisi dinamica modale*
- *Analisi dinamica non lineare*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Frequentemente nelle strutture intelaiate in c.a. si realizzano i tamponamenti perimetrali con muratura di mattoni semipieni.



Per garantire un'efficace resistenza alle azioni fuori-piano della parete, la stessa viene eseguita in aderenza alle strutture in c.a.

Questo fa sì che quando la struttura è eccitata dal sisma risponde come sistema composto calcestruzzo-muratura

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

E' consuetudine (*errata*) ritenere che la collaborazione del telaio con la muratura incrementa la resistenza della struttura alle azioni orizzontali e quindi sempre favorevole nei confronti della risposta sismica.

Infatti la presenza di telai tamponati altera notevolmente la risposta strutturale comportando una distribuzione effettiva delle forze orizzontali molto diversa da quella prevista in sede di progetto.

Alcuni telai possono quindi collassare perchè soggetti a forze molto più grandi di quelle considerate nel progetto.

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Il primo periodo proprio si riduce sensibilmente; può essere stimato con le relazioni

(EC8)
$$T_1 = \frac{T_{1b}}{\left(1 + \frac{T_{1b}^2 A_w G g}{16 H W}\right)^{0.5}}$$

oppure

$$\min \begin{cases} T_1 = 0.065\, n \\ T_1 = 0.075\, H^{0.75} \\ T_1 = 0.08 \dfrac{H}{\sqrt{B}} \cdot \dfrac{H}{H+B} \end{cases}$$

$T_{1b} = 0.075\, H^{0.75}$ **Strutture in c.a. senza tamponamenti**

G *modulo di elasticità tang. muratura*

A_w *area muratura di riempimento nella direzione considerata*

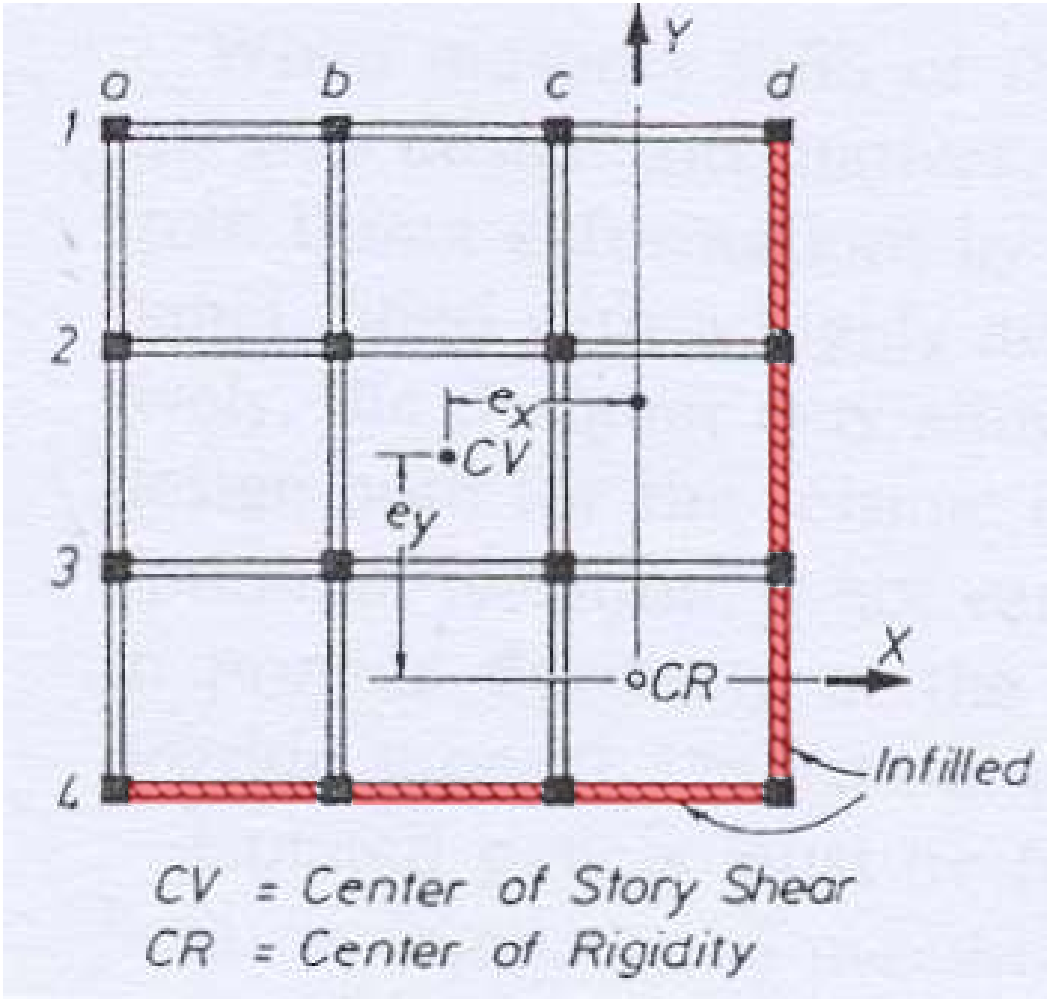
W *peso dell'edificio*

H *altezza dell'edificio*

B *profondità dell'edificio nella direzione considerata*

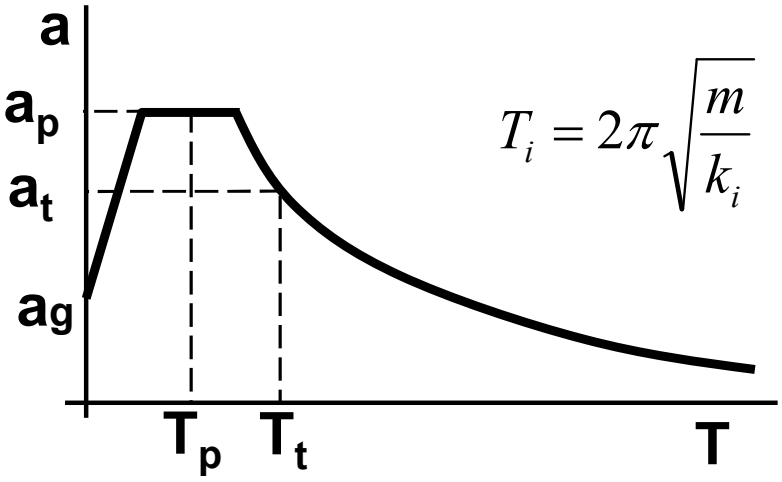
n *numero di piani*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

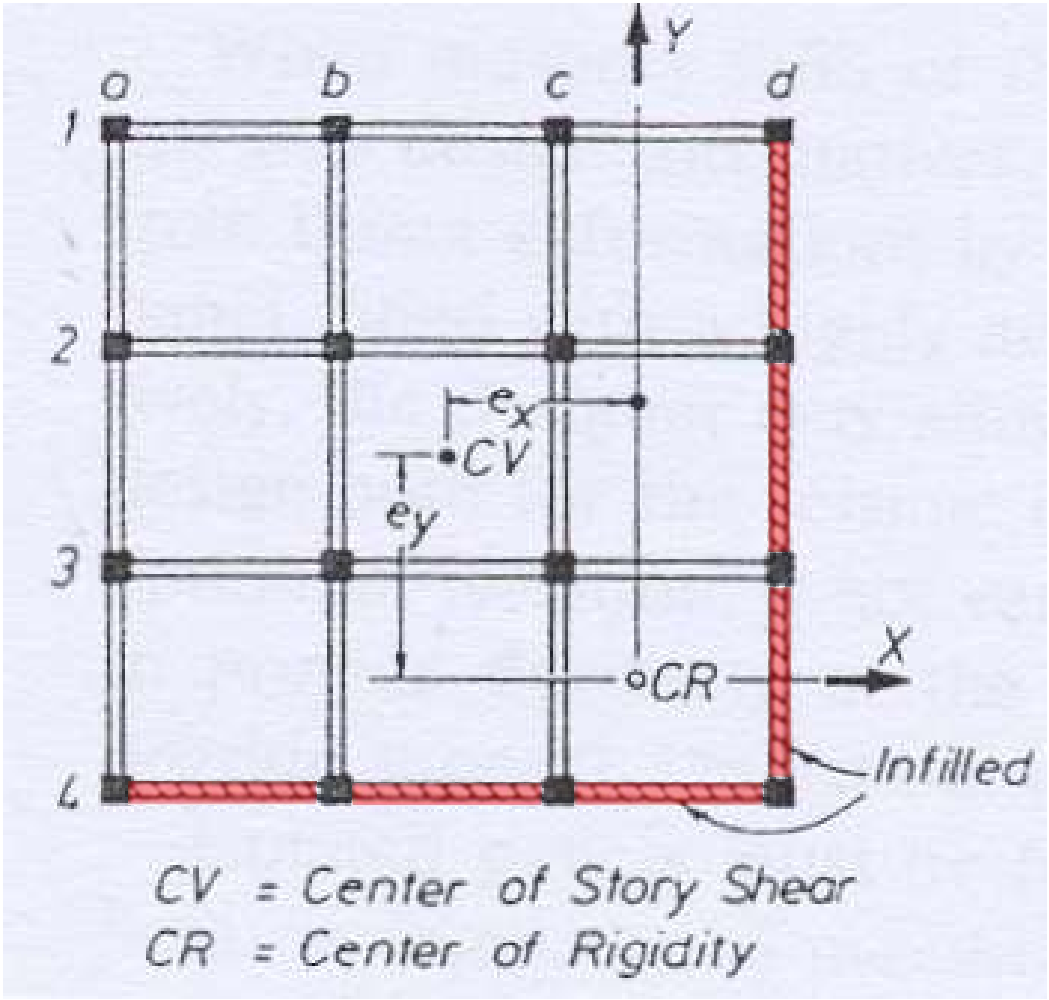


Esempio 1: *Struttura intelaiata in c.a. con tamponamenti lungo due lati adiacenti.*

- *Minore periodo proprio dovuto all'effetto irrigidente del tamponamento (T_p<T_t)*
- *Aumento azione sismica*



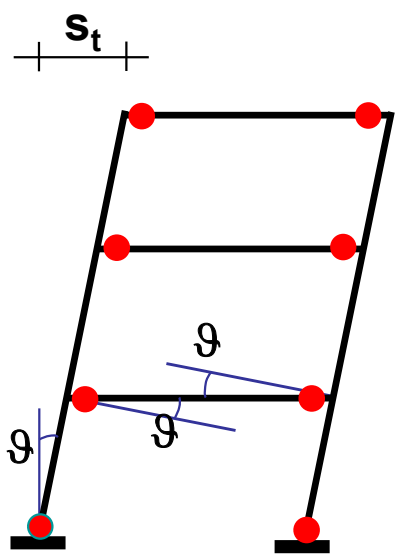
TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA



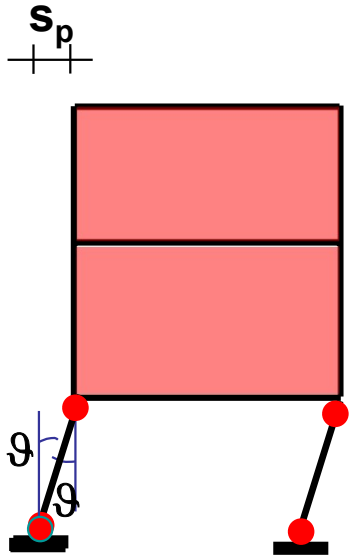
Esempio 1.

- *Spostamento del centro di taglio (perdita simmetria)*
- *Maggiore impegno pareti tamponate e minore duttilità*
- *Risposta torsionale*
- *Azione tagliante viene assorbita principalmente dal tamponamento*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA



Telaio non tamponato

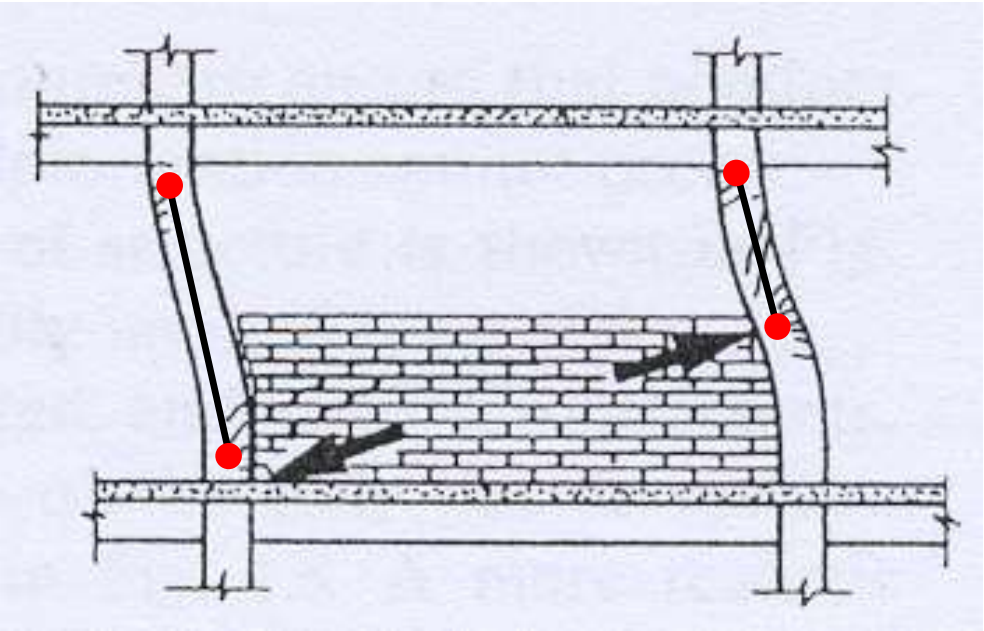


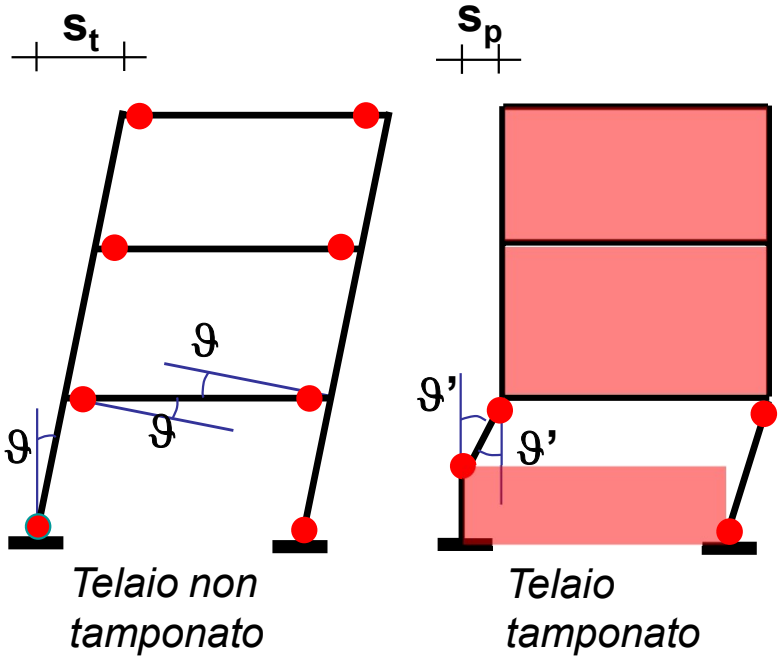
Telaio parz . tamponato

Esempio 2. *Tamponamento non in tutti i piani*

- *Aumento rigidezza e conseguente aumento forza sismica*
- *Notevole riduzione della duttilità (a parità di* ϑ ➡ $s_p << s_t$*)*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

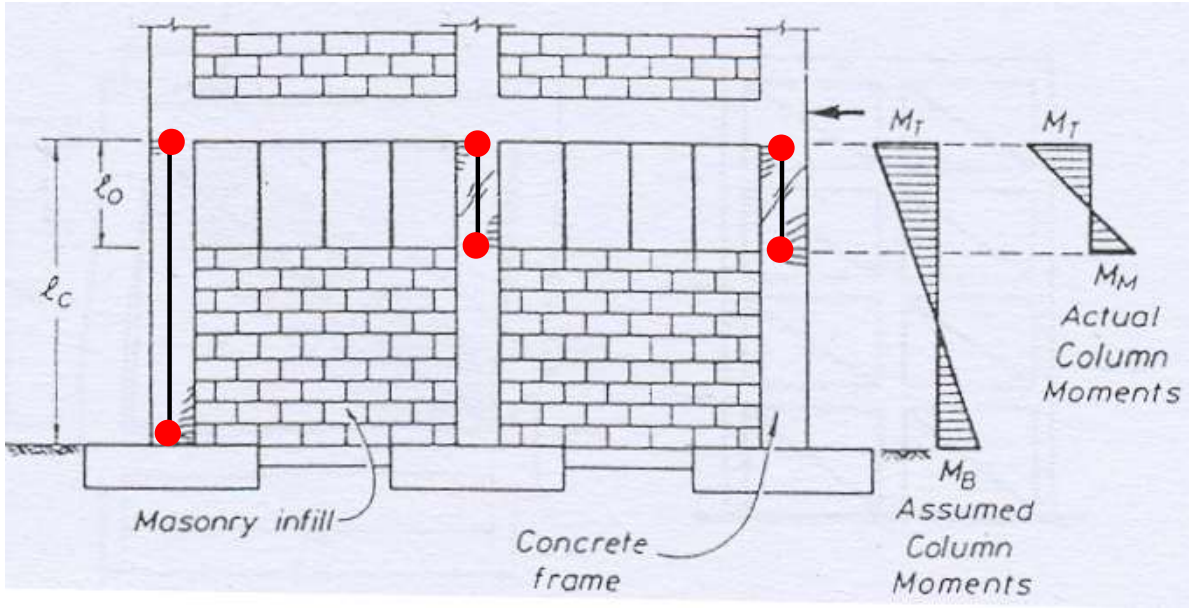


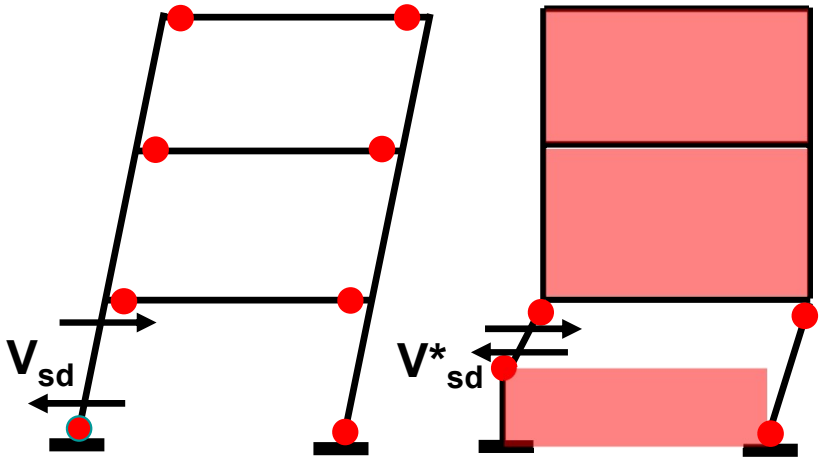


Esempio 3. *Tamponamento non a tutta altezza.*

- *Aumento rigidezza e conseguente aumento forza sismica*
- *Notevole riduzione della duttilità*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA





Esempio 3. *Tamponamento non a tutta altezza.*

- *Grande aumento taglio nel pilastro* $V^*_{sd} >> V_{sd}$

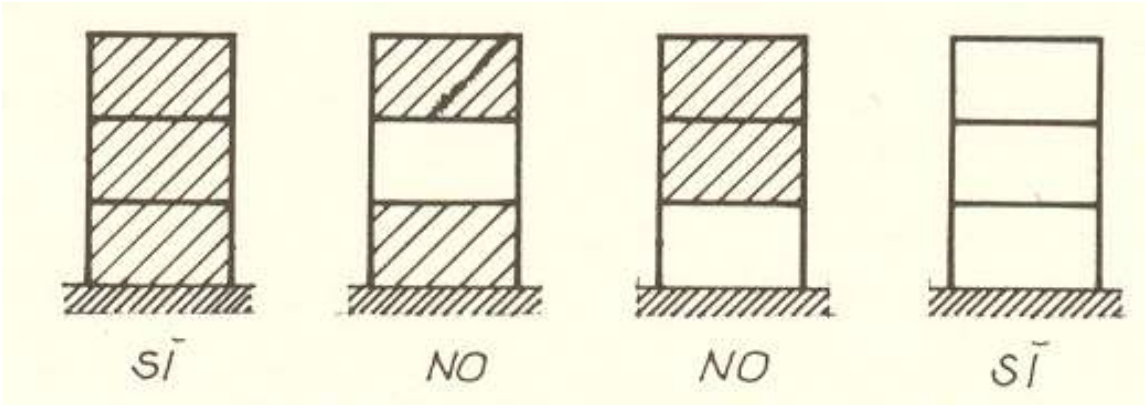
Telaio non tamponato $V_{sd} = \dfrac{M_T + M_B}{l_c}$

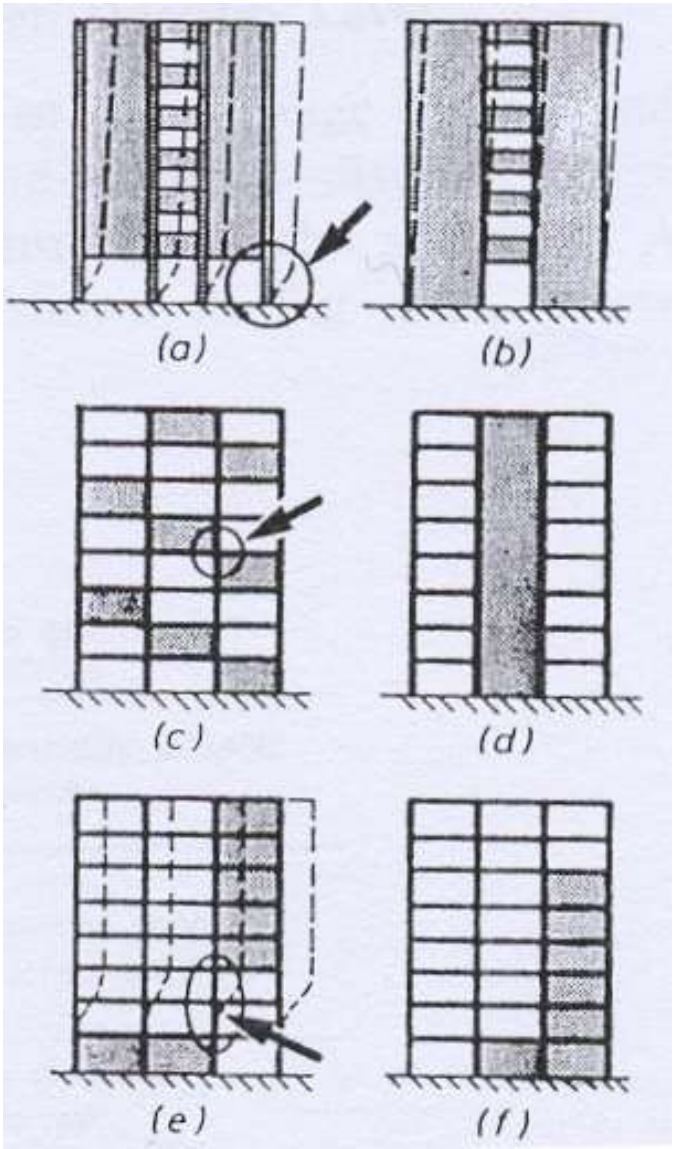
$V^*_{sd} = \dfrac{M_T + M_M}{l_o}$ *Telaio tamponato*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Necessario tener conto dei tampo-namenti nelle analisi

- *Tamponamenti continui in altezza*
- *Tamponamenti disposti in maniera simmetrica*
- *Oppure tamponamenti isolati*

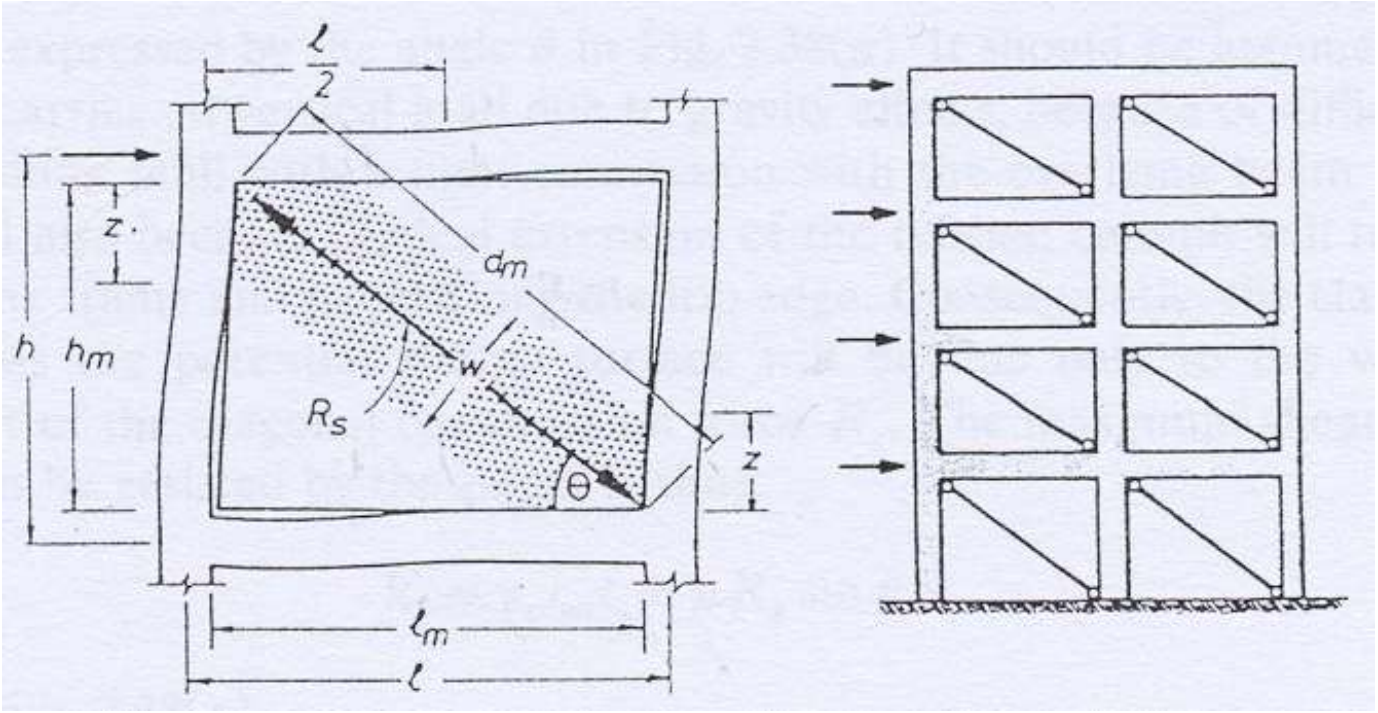




Non accettabile *Accettabile*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Rigidezza. *Al crescere degli spostamenti laterali, il telaio tende a deformarsi a flessione mentre il pannello si deforma a taglio. Ciò comporta una separazione fra pannello e telaio negli angoli della diagonale tesa e lo sviluppo di un puntone diagonale compresso.*



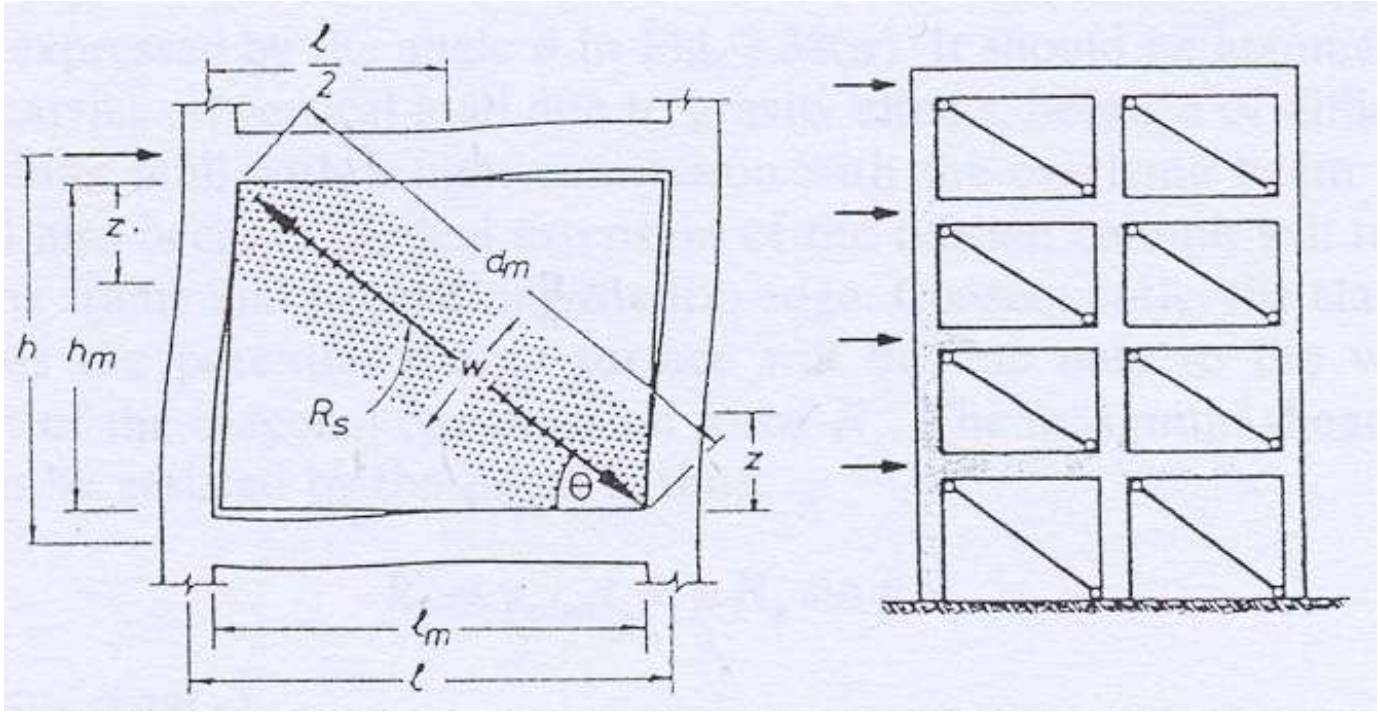
$w \approx 0.25\, d_m$

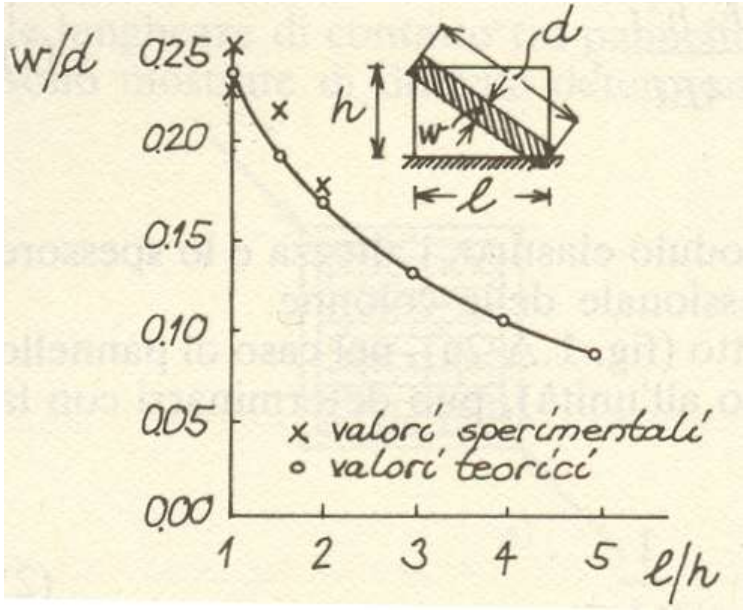
EC8, Paulay e Priestley

$w \approx 0.10\, d_m$

Circ. 10.04.1997 n. 65/AA.GG.

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA





Stafford Smith 1962

$w \approx 0.25\, d_m$

EC8, Paulay e Priestley

$w \approx 0.10\, d_m$

Circ. 10.04.1997 n. 65/AA.GG.

$l/h = 1 \Rightarrow w \approx 0.25\, d_m$

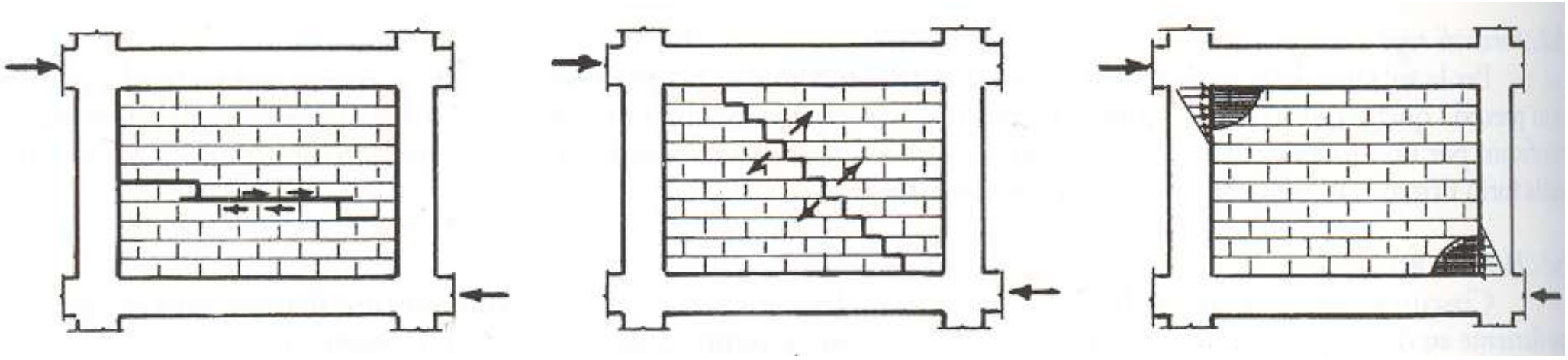
$l/h = 5 \Rightarrow w \approx 0.10\, d_m$

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Si possono verificare diversi meccanismi di collasso del telaio composto:*

Pannello murario

- *Rottura per scorrimento orizzontale*
- *Rottura diagonale per trazione*
- *Rottura a schiacciamento locale degli spigoli della tampon.*



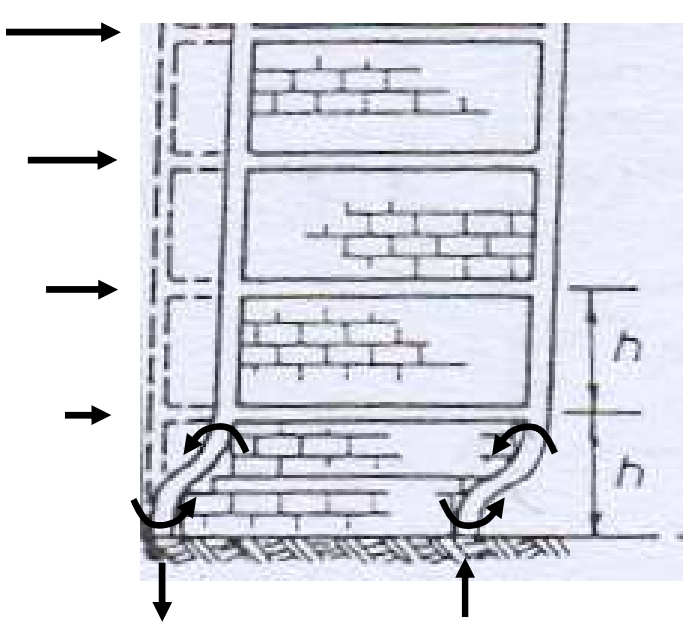
Scorrimento *Fessurazione diagonale* *Pressoflessione*

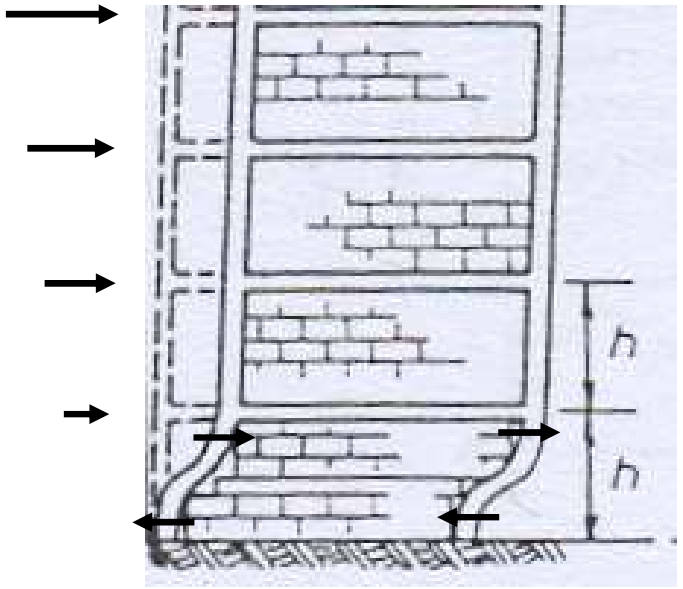
TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Si possono verificare diversi meccanismi di collasso del telaio composto:*

Telaio in c.a.

- *Rottura a flessione composta nei pilastri*
- *Rottura a taglio dei pilastri*



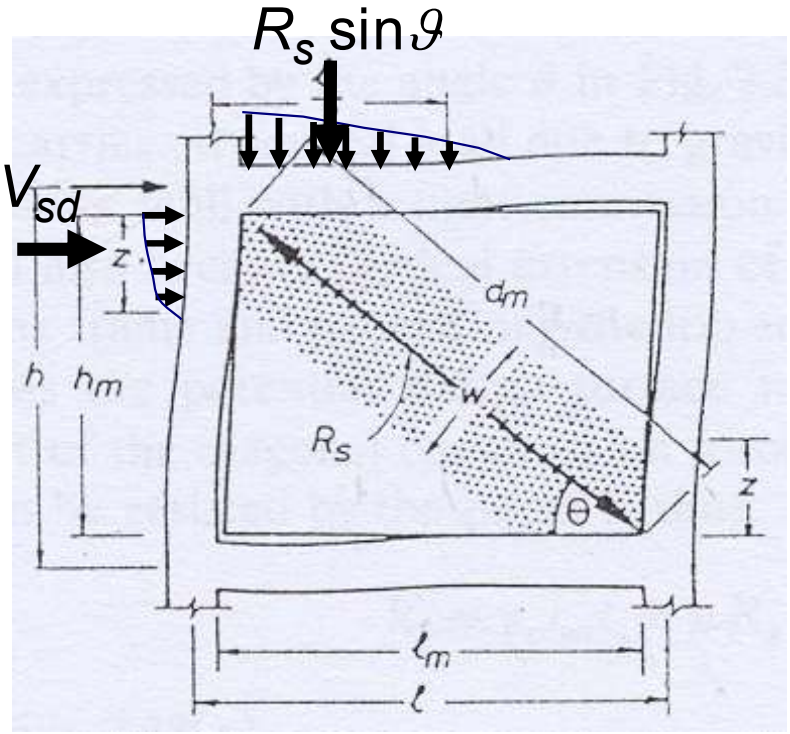


TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Rottura per scorrimento orizzontale pannello*

$$f_{vk} = f_{vok} + 0.4\,\sigma \qquad f_{vd} = f_{vk} / \gamma_m$$

R_s compressione nella diagonale



$$V_{Rd} = f_{vod} \cdot l_m\, t + \frac{0.4\, R_s \sin\vartheta}{\gamma_m}$$

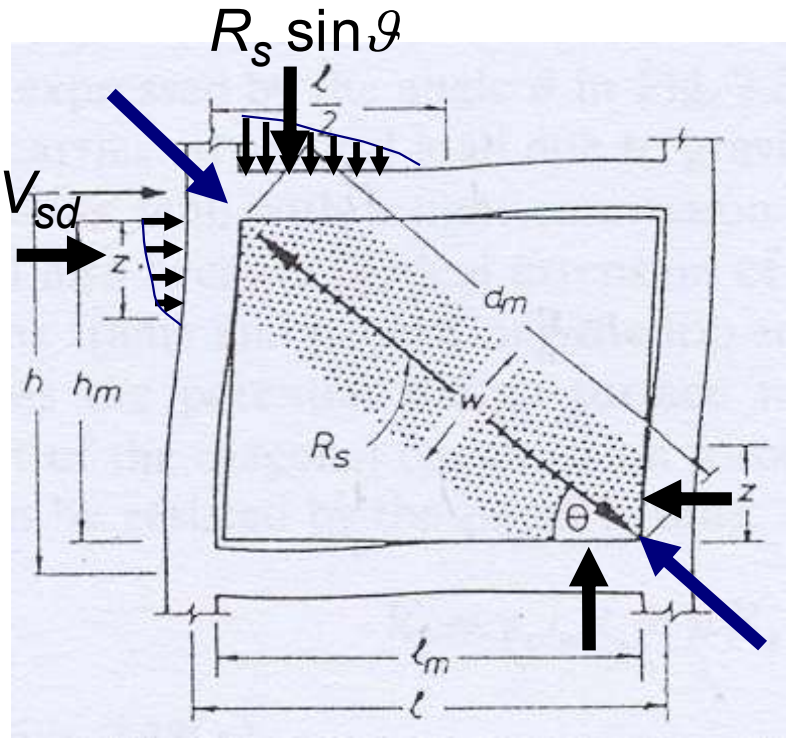
$$V_{sd} = R_s \cos\vartheta = R_s\, l_m / d_m$$

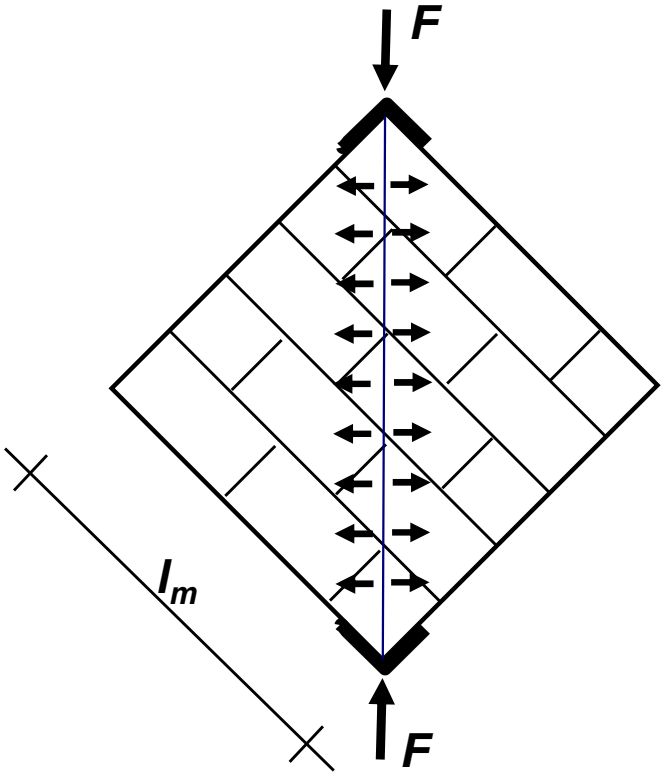
$$V_{sd} = V_{Rd} \qquad R_s = \frac{f_{vod}}{1 - \dfrac{0.4}{\gamma_m}(h/l)}\, d_m\, t$$

$$V_{Rd} = f_{vod} \cdot t \left[l_m + \frac{0.4\, h_m}{\gamma_m - 0.4\,(h/l)} \right]$$

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Rottura diagonale per trazione pannello (fessurazione diagonale)*

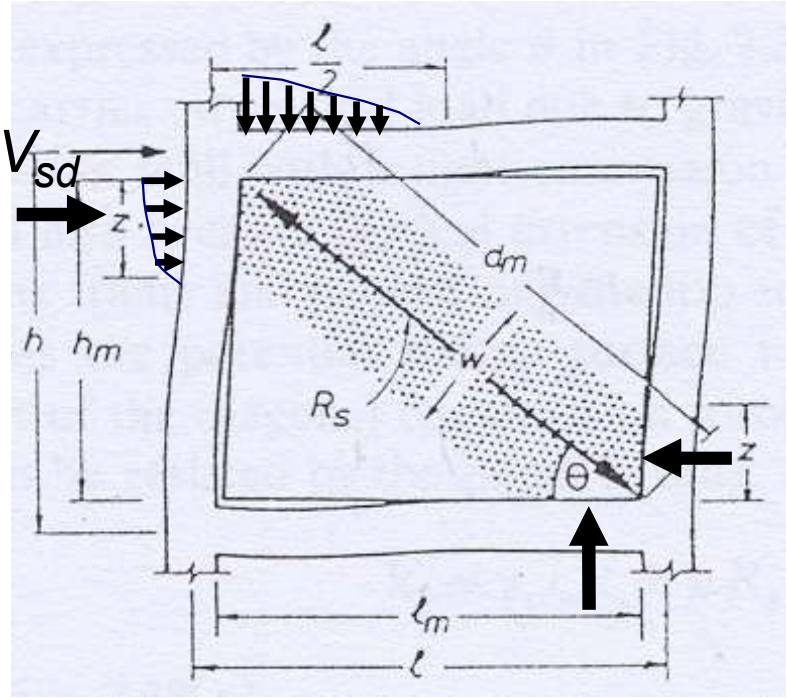




$$V_{Rd} = \frac{f_{vod}}{0.6} l_m \, t$$

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Rottura a schiacciamento locale spigoli tampon.*



$$V_{Rd} = \frac{2}{3} z\, t\, f'_d$$

Paulay e Priestley

$$z = \frac{\pi}{2}\left(\frac{4 E_c I_c h_m}{E_m t \sin 2\vartheta}\right)^{0.25}$$

$$V_{Rd} = 0.8 f'_d \cos^2\vartheta \left(\frac{E_c}{E_m} I_c h_m t^3\right)^{0.25}$$

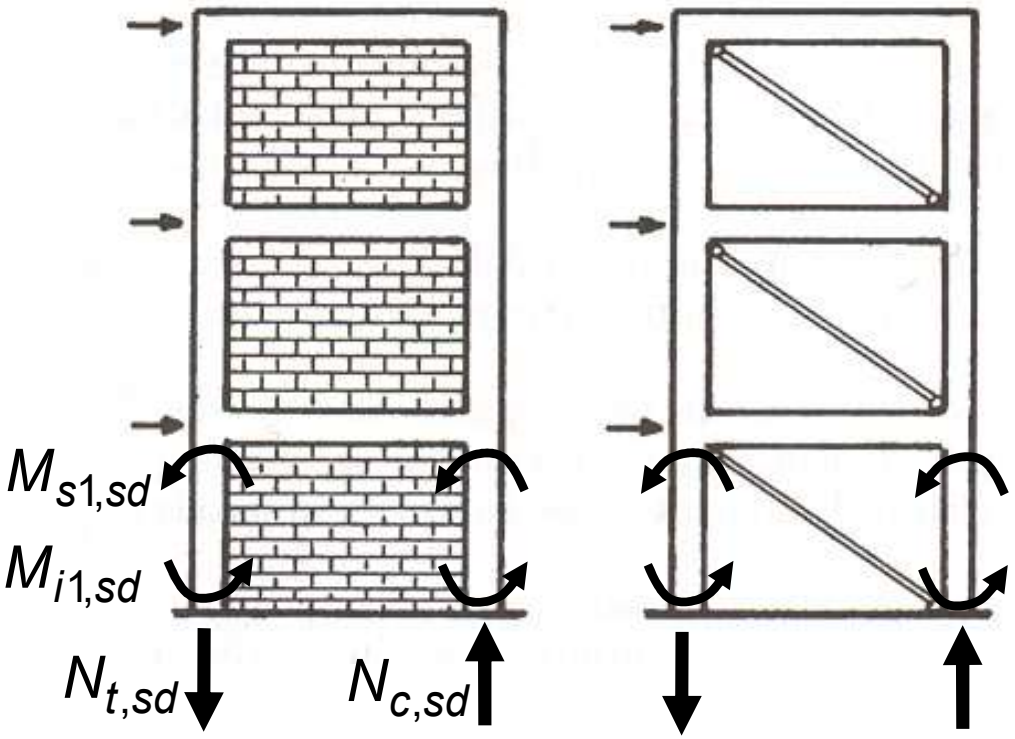
Circ. 10.04.1997 n. 65/AA.GG.

f'_d = *resistenza a compressione muratura in direzione orizzontale*

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Rottura a flessione composta nei pilastri.*

Si calcolano le sollecitazioni assiali e i momenti flettenti nei pilastri considerando lo schema strutturale con i puntoni diagonali. I momenti vanno aumentati di $\frac{V_{Rd}^{pannello} \cdot h}{10}$



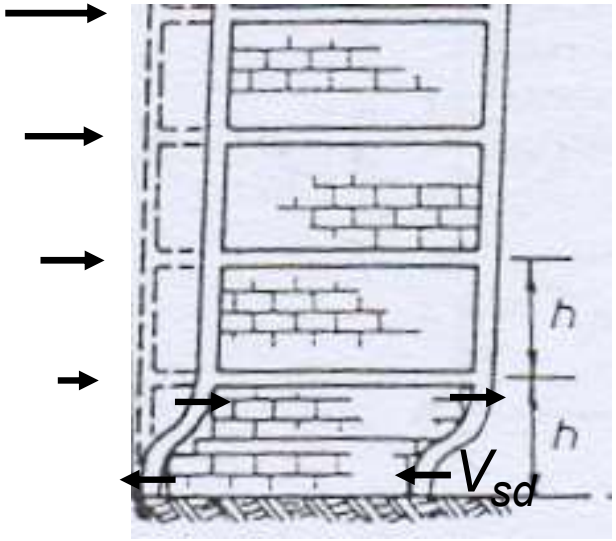
Si confrontano i valori agenti nel domino di interazione M-N di ciascuna sezione.

$$M_{sd}(N_{sd}) \leq M_{Rd}(N_{sd})$$

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Resistenza. *Rottura a taglio dei pilastri.*

La rottura a taglio dei pilastri non deve verificarsi prima che ceda per taglio il pannello. Quindi la sollecitazione tagliante che deve essere sopportata dal pilastro è uguale a quella ottenuta dall'analisi della struttura con i puntoni equivalenti più la resistenza a taglio del pannello.



$$V_{sd}^{telaio} = V_{sd}^{analisi} + V_{Rd}^{pannello}$$

$$V_{sd}^{telaio} \leq V_{Rd}^{telaio}$$

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

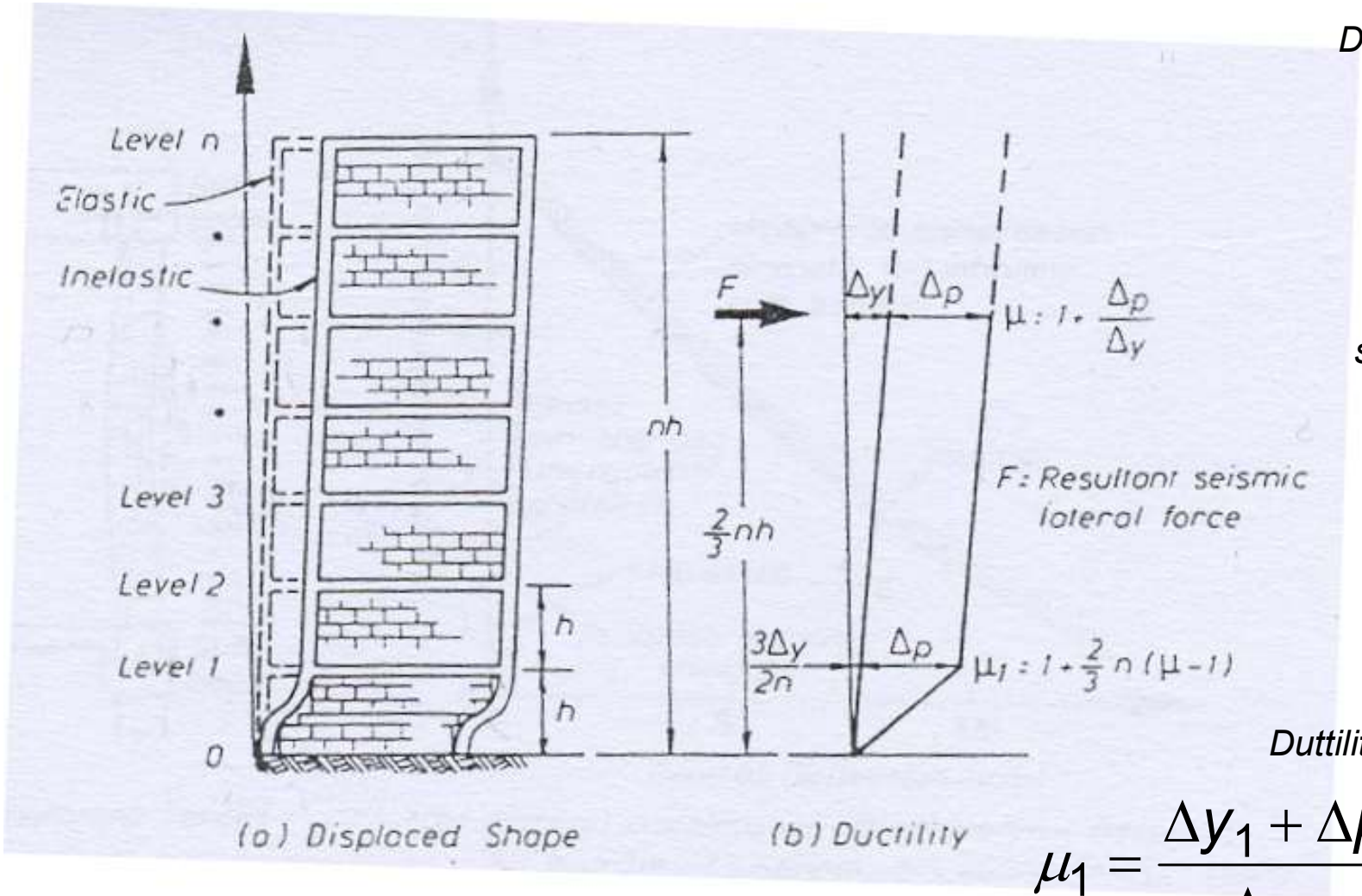
Duttilità. *E' necessario che le colonne compresse vengano adeguatamente confinate per un tratto pari alla lunghezza della potenziale cerniera plastica (la larghezza della parete composta).*

In queste condizioni il meccanismo di rottura che si forma per primo riguarda lo slittamento o la fessurazione diagonale del tamponamento del piano inferiore.

Questo comporta che per garantire un'adeguata duttilità globale alla struttura è necessario che il piano "debole" possieda un'elevata duttilità "locale" soprattutto per strutture con elevato numero di piani.

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Duttilità.



Duttilità globale struttura

$$\mu = 1 + \frac{\Delta p}{\Delta y}$$

Spostamento allo snervamento piano primo

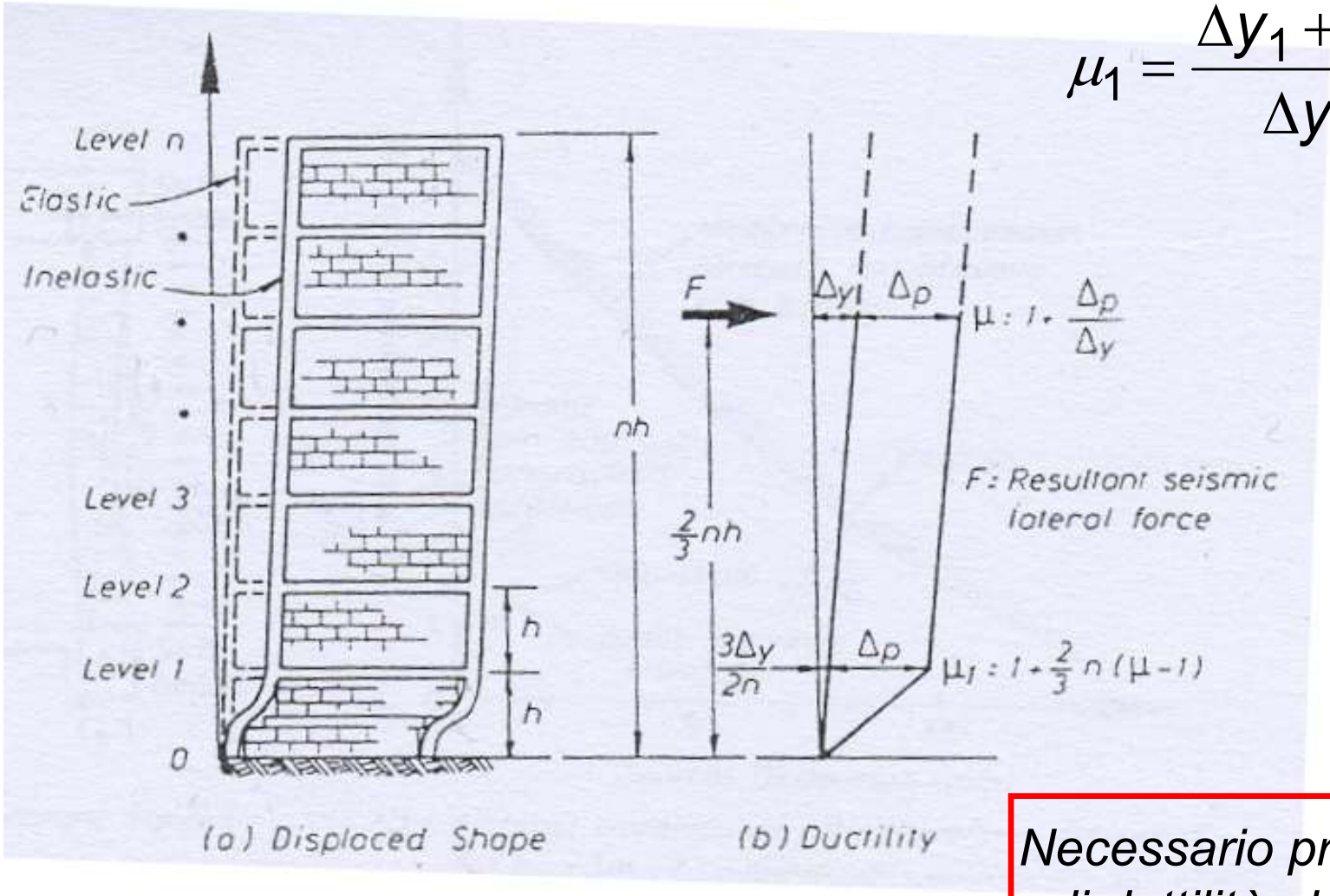
$$\Delta y_1 = \frac{3\,\Delta y}{2n}$$

Duttilità "locale" primo piano

$$\mu_1 = \frac{\Delta y_1 + \Delta p}{\Delta y_1} = 1 + \frac{2}{3} n (\mu - 1)$$

TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

Duttilità.



Duttilità "locale" primo piano

$$\mu_1 = \frac{\Delta y_1 + \Delta p}{\Delta y_1} = 1 + \frac{2}{3} n (\mu - 1)$$

Per $n=4$ e $\mu=4$

$\mu_1 = 9$

Impossibile ottenere un valore di duttilità locale così alto con questa struttura

Necessario progettare per un livello di duttilità globale più basso $\mu=2$

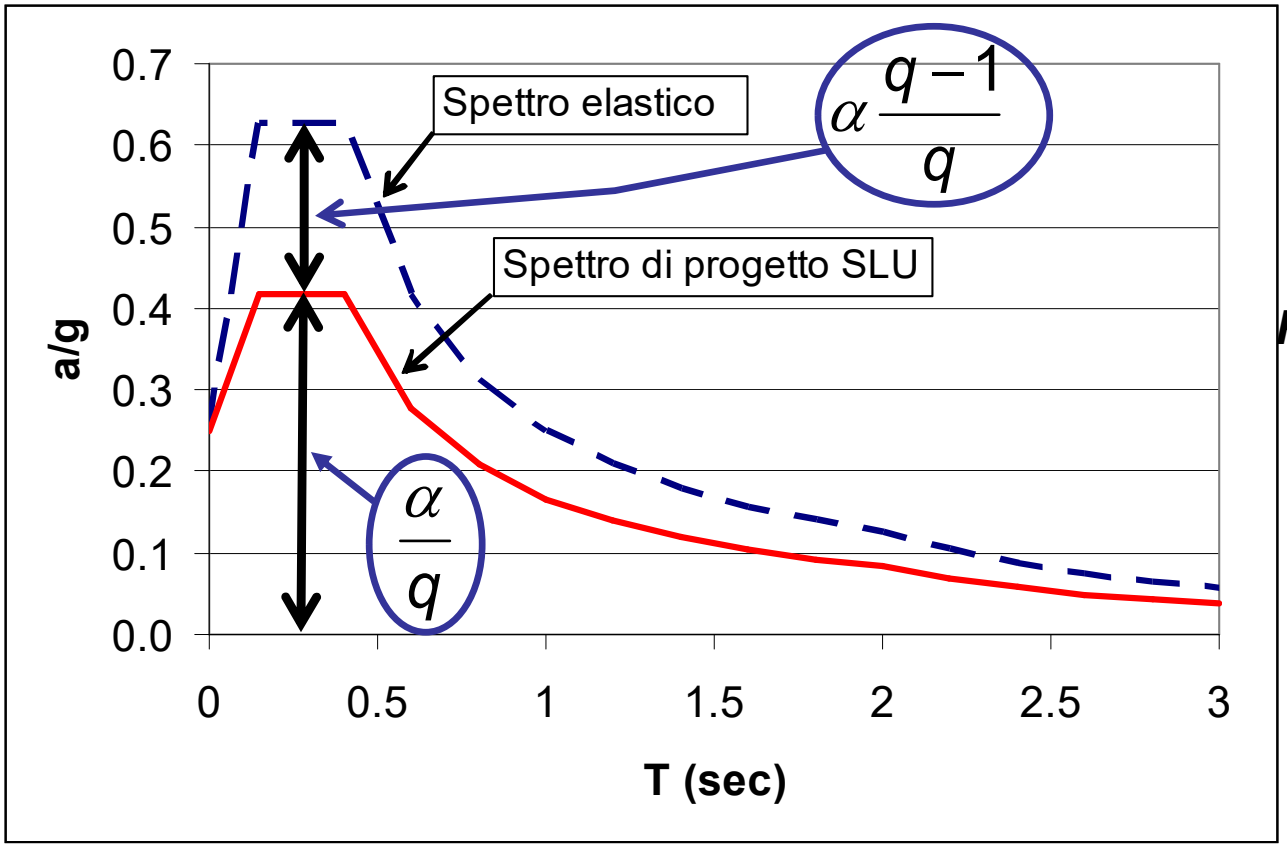
TELAI IN C.A. TAMPONATI CON MURATURA

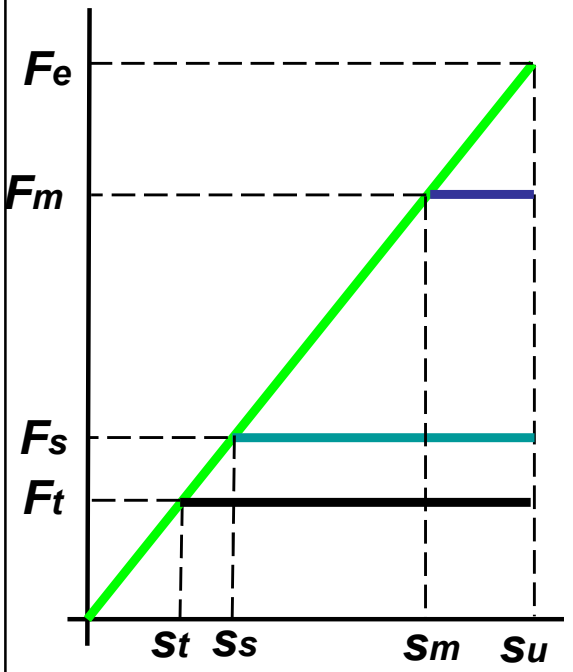
Progetto. *Necessario considerare un fattore di struttura più basso e quindi una forza di progetto più elevata.*

Fattore di struttura

$$q = \mu \cdot \alpha_u/\alpha_1 \cdot k_R$$

Duttilità — *Sovraresistenza* — *regolarità*

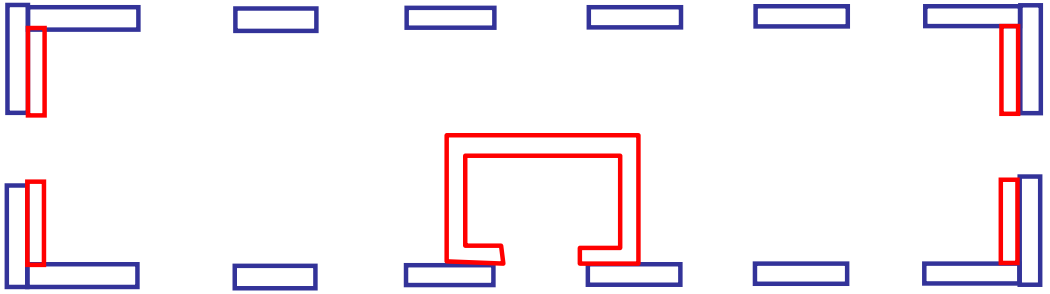




$$\mu = \frac{s_u}{s_t}$$

MURATURA CON NUCLEI E SETTI IN C.A.

Generalmente riguardano interventi su edifici esistenti; non essendo la muratura in grado da sola di resistere alle azioni sismiche si aggiungono elementi in calcestruzzo armato dotati di elevata rigidezza.



Gli elementi nuovi essendo congruenti con la muratura devono essere molto rigidi e devono essere progettati in modo tale che la muratura non subisca deformazioni eccessive da portarla al collasso.

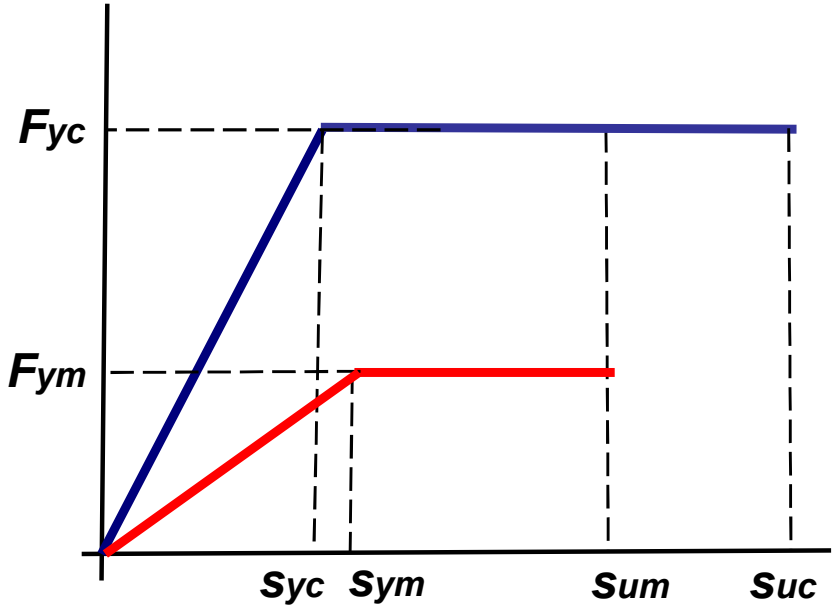
MURATURA CON NUCLEI E SETTI IN C.A.

Forze orizzontali affidate alla sola struttura in c.a.

Gli spostamenti al limite elastico delle strutture in calcestruzzo non devono essere maggiori dei corrispondenti per la muratura in ogni punto.

Inoltre è necessario progettare con un valore di q non maggiore di quello della muratura

$$q = \mu \cdot \alpha_u / \alpha_1 \quad (\mu = 1.5 \div 2.0)$$



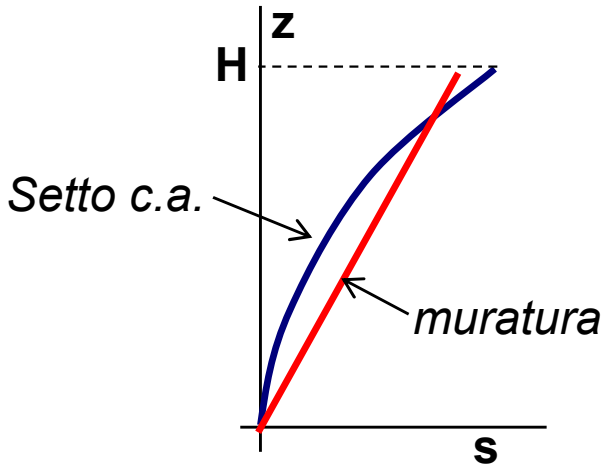
MURATURA CON NUCLEI E SETTI IN C.A.

Forze orizzontali affidate al sistema composto

La collaborazione della muratura può essere considerata purchè sia buona la conoscenza del materiale muratura e sia possibile costruire un modello strutturale affidabile.

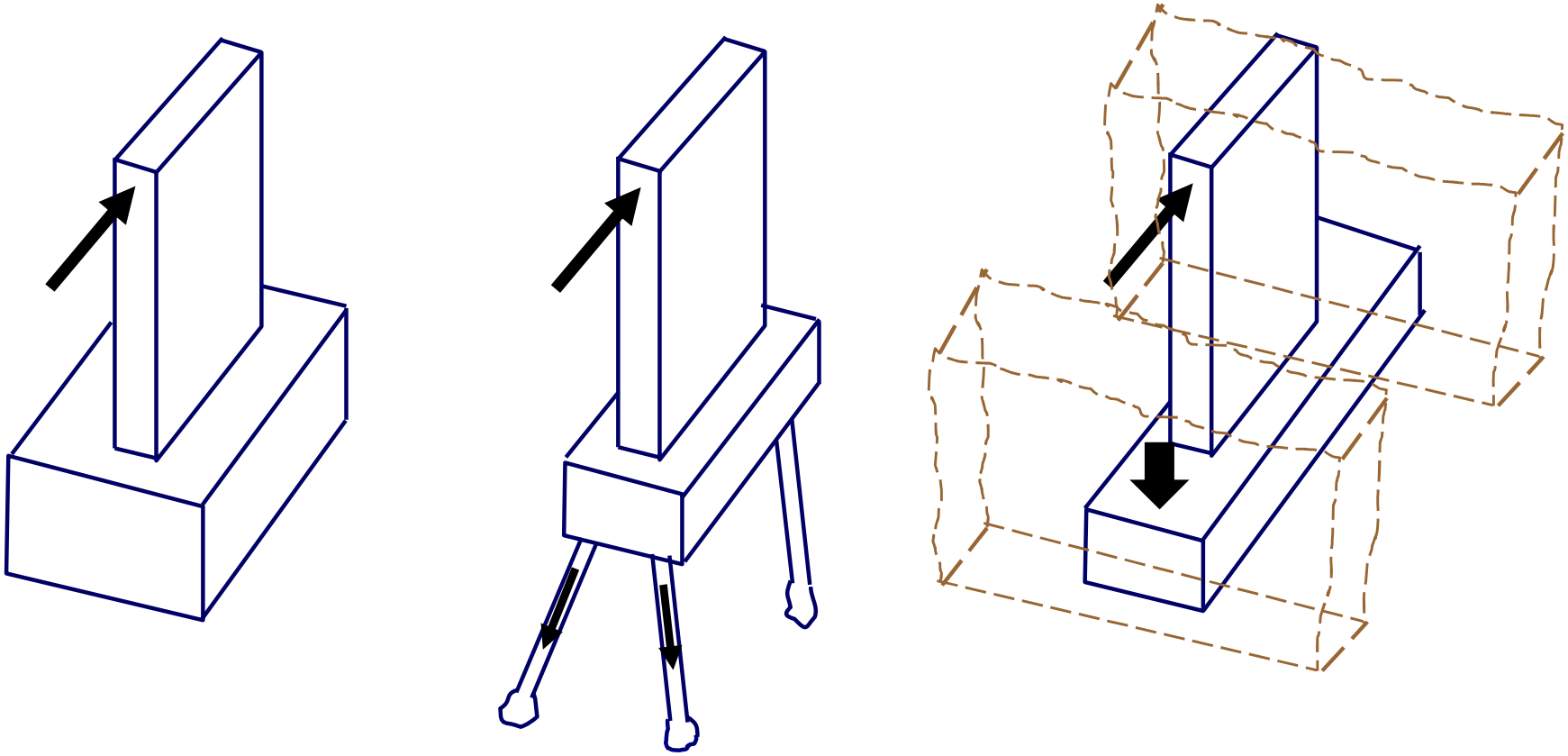
Nel caso di distribuzioni non simmetriche della muratura si deve sempre tener conto dell'influenza della stessa sulla risposta alle azioni orizzontali.

E' pure necessario tener conto della diversa deformabilità di parete di muratura ed elemento in c.a.



MURATURA CON NUCLEI E SETTI IN C.A.

Le fondazioni delle strutture nuove, che in genere non portano carichi verticali, devono essere massicce (zavorra) o prevedere l'impiego di micropali per contrastare il momento ribaltante dovuto alle azioni orizzontali, oppure essere equilibrate dalle strutture esistenti (murature).



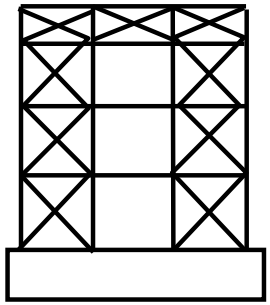
TELAI IN ACCIAIO TAMPONATI CON MURATURA

Valgono le stesse considerazioni fatte per i telai in c.a. tamponati con muratura.

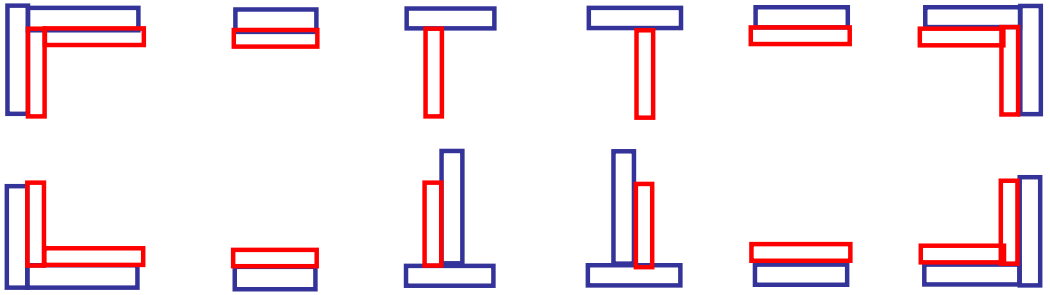
MURATURA CON PARETI IN ACCIAIO

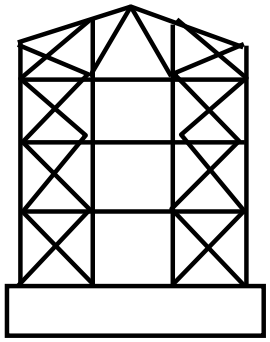
Riguardano in genere interventi di adeguamento sismico di edifici esistenti in muratura.

Quando la muratura non è in grado da sola di resistere alle azioni orizzontali si possono aggiungere robuste pareti in acciaio costituite frequentemente da sistemi reticolari.



Pareti longitudinali





Pareti trasversali

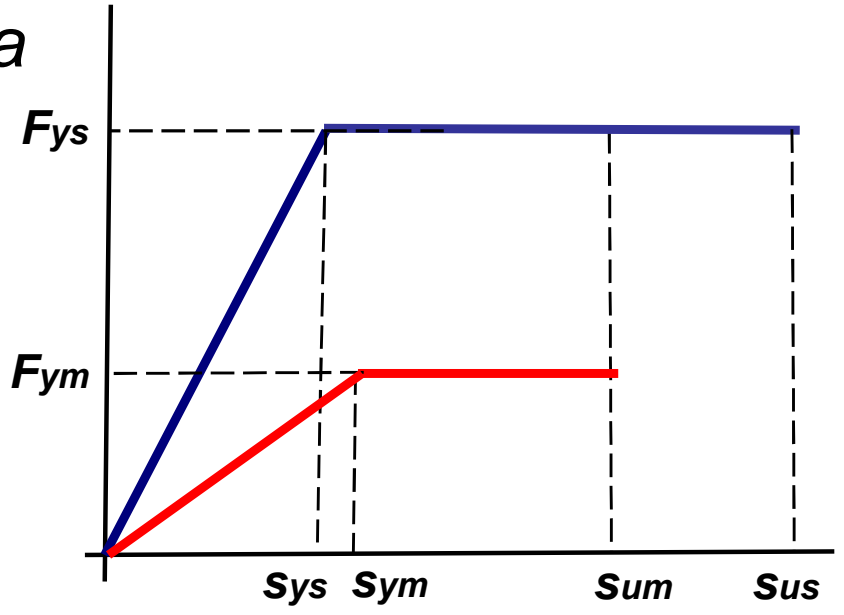
MURATURA CON PARETI IN ACCIAIO

Forze orizzontali affidate alle sole pareti di acciaio

Come per il caso di aggiunta di pareti di calcestruzzo, gli spostamenti al limite elastico delle strutture in acciaio non devono essere maggiori dei corrispondenti per la muratura in ogni punto.

Inoltre è necessario progettare con un valore di q non maggiore di quello della muratura

$$q = \mu \cdot \alpha_u / \alpha_1 \quad (\mu = 1.5 \div 2.0)$$



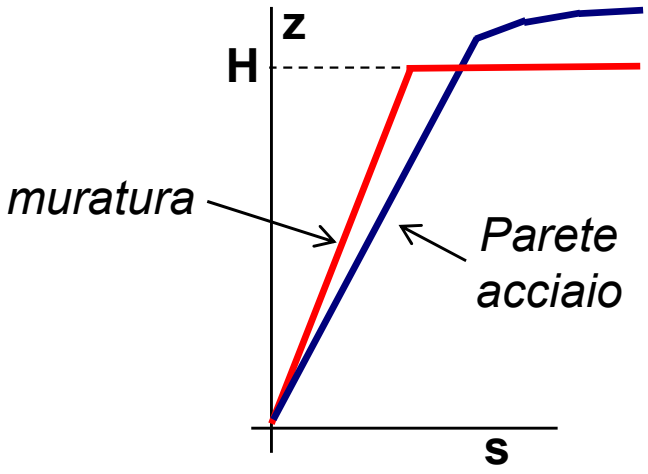
MURATURA CON PARETI IN ACCIAIO

Forze orizzontali affidate al sistema composto

La collaborazione della muratura può essere considerata purchè sia buona la conoscenza del materiale muratura e sia possibile costruire un modello strutturale affidabile.

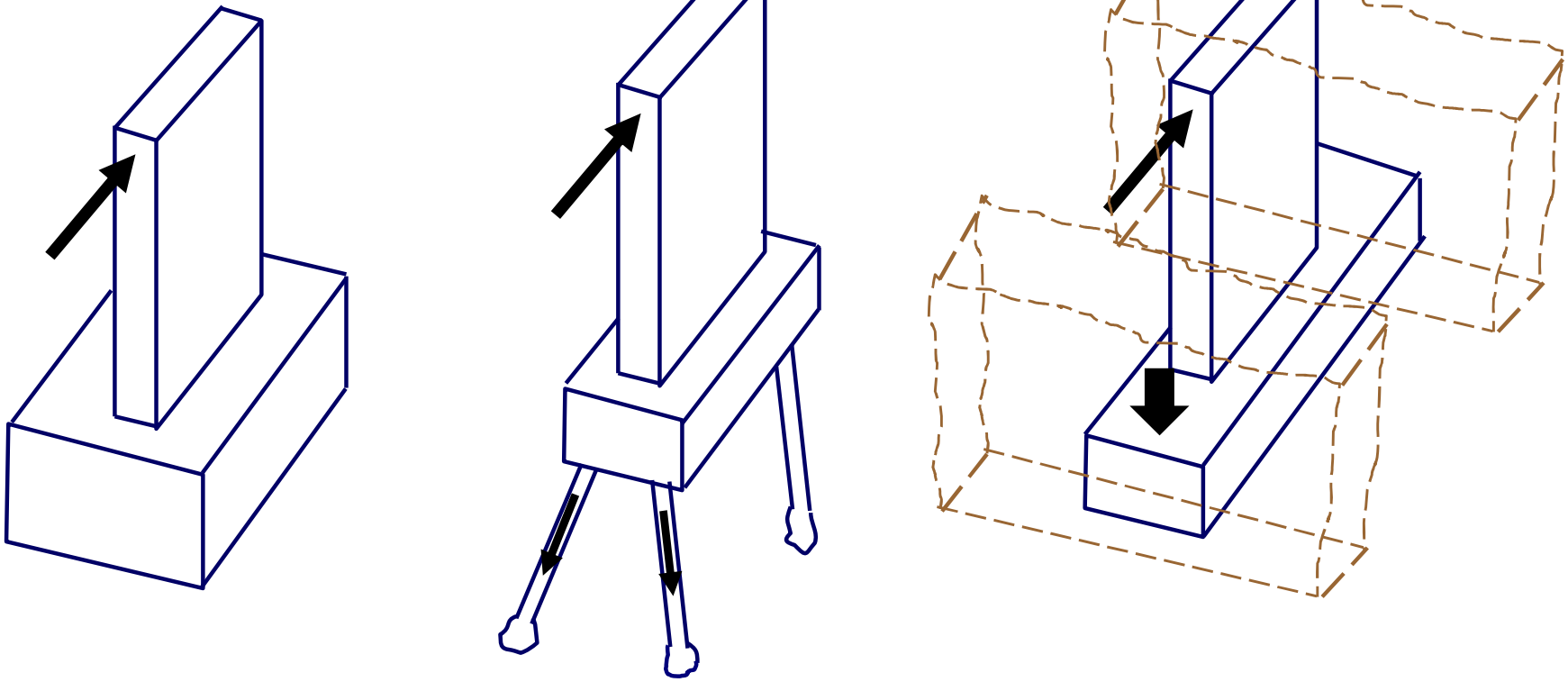
Nel caso di distribuzioni non simmetriche della muratura si deve sempre tener conto dell'influenza della stessa sulla risposta alle azioni orizzontali.

E' pure necessario tener conto della diversa deformabilità di parete di muratura e parete in acciaio



MURATURA CON PARETI IN ACCIAIO

Come per le strutture con setti in c.a., le fondazioni delle pareti in acciaio, che in genere non portano carichi verticali, devono essere massicce (zavorra) o prevedere l'impiego di micropali per contrastare il momento ribaltante dovuto alle azioni orizzontali, oppure essere equilibrate dalle strutture esistenti (murature).



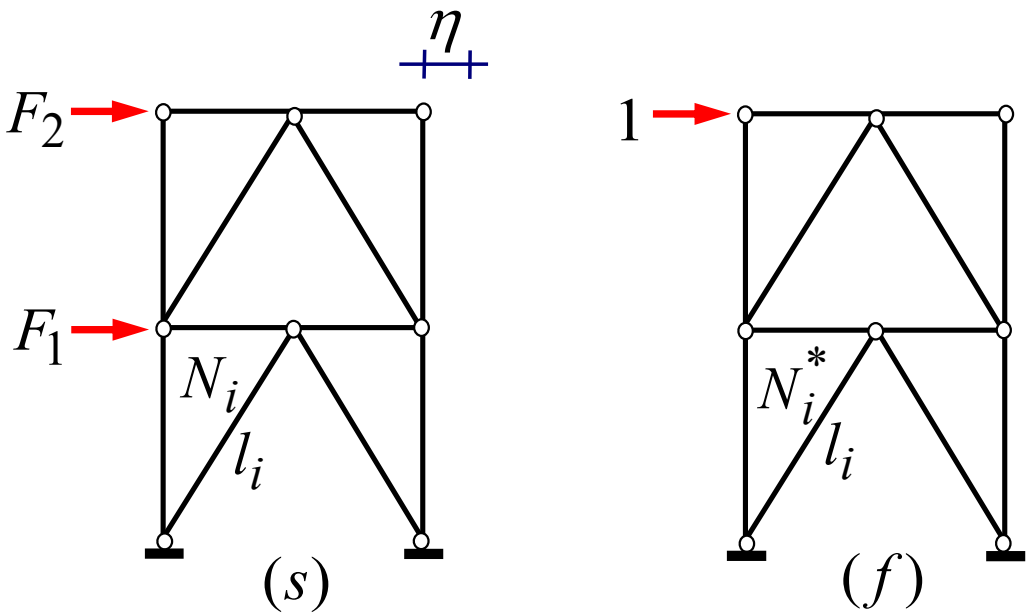
MURATURA CON PARETI IN ACCIAIO

Per il calcolo degli spostamenti orizzontali degli elementi di controvento si può utilizzare il Principio dei Lavori Virtuali.

*Si impone che il lavoro delle forze esterne **Le** sia uguale al lavoro di deformazione dell'intera struttura **Li.***

Per far questo si considera il sistema reale come sistema di spostamenti (s) ed un sistema con una forza unitaria orizz. applicata nel nodo di cui si vuole calcolare lo spostamento assunto come sistema di forze (f)

MURATURA CON PARETI IN ACCIAIO



$$P.L.V.$$

$$L_e = L_i$$

$$1 \cdot \eta = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i \cdot N_i^*}{E\,A_i} \cdot l_i$$

Lo spostamento delle strutture di controvento non deve superare $\frac{N_i}{E\,A_i} = \varepsilon_i$

$$\eta_{\lim} = 0.003h$$

Le aste della struttura reticolare, soggette a compressione non devono, di norma, avere una snellezza superiore a 40.

DIMENSIONAMENTO PARETI IN ACCIAIO

In un edificio in muratura, che presenta una percentuale di muratura inferiore ai minimi della tabella seguente, bisogna aggiungere elementi murari o aggiungere pareti/portali di controvento in acciaio.

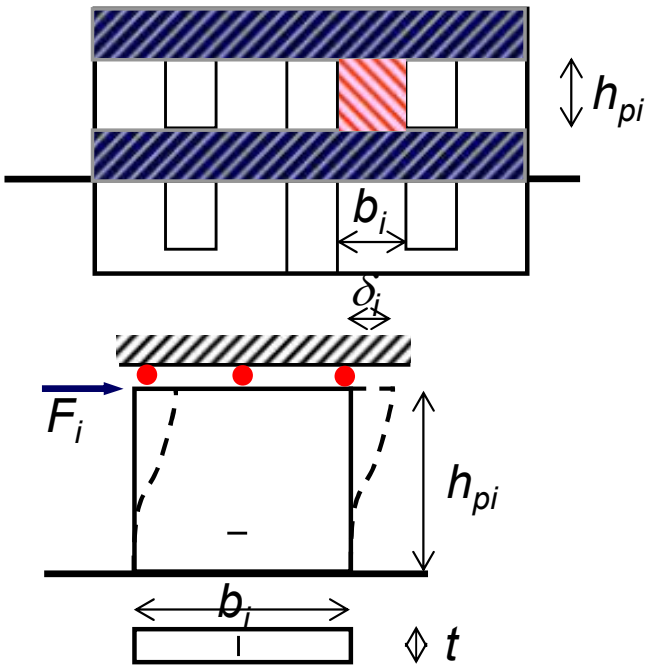
Accelerazione di picco del terreno $a_g \cdot S$		≤0,07 g	≤0,1 g	≤0,15 g	≤0,20 g	≤0,25 g	≤0,30 g	≤0,35 g	≤0,40 g	≤0,45 g	≤0,4725 g
Tipo di struttura	Numero piani										
Muratura ordinaria	1	3,5 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,0 %	6,0 %	6,5 %
	2	4,0 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	6,5 %	6,5 %	7,0 %
	3	4,5 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %			
	4	5.0%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	7.5%			
	5	5.5%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	7.5%	8.0%			

Per edifici che hanno più di 3 piani, ma non oltre i 5 piani, in fase di predimensionamento degli elementi resistenti alle azioni sismiche, si possono estrapolare linearmente i valori di area resistente di tabella.

DIMENSIONAMENTO PARETI IN ACCIAIO

Ipotizzando come altezza di riferimento degli elementi in muratura resistenti alle azioni orizzontali l'altezza media di tutti i maschi del piano di riferimento, si può ricavare la quantità di muratura da aggiungere.

Quest'area viene tradotta in un numero di maschi da distribuire in modo da favorire la riduzione di eccentricità fra baricentro delle masse e baricentro delle rigidezze. Quindi si calcola la rigidezza di questi maschi.

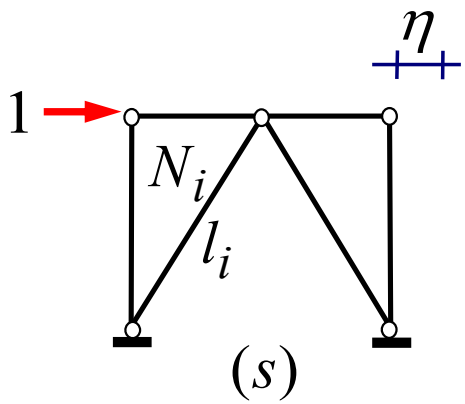


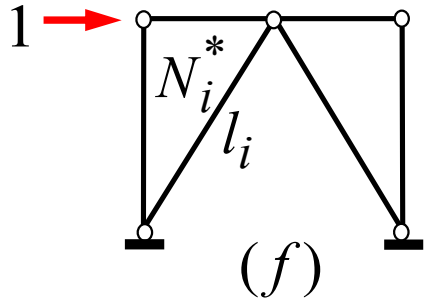
$$Per \quad F_i = 1 \quad \Rightarrow \quad \delta_i = \frac{h_{pi}^3}{12EI_i} + \frac{\chi h_{pi}}{GA_i}$$

Deformormabilità flessionale — **Deformormabilità tagliante**

$$K_i = \frac{1}{\dfrac{h_{pi}^3}{12EI_i} + \dfrac{\chi h_{pi}}{GA_i}} = \frac{G\, b_i\, t}{\chi\, h_{pi}\left[1 + \dfrac{G}{E}\dfrac{1}{\chi}\left(\dfrac{h_{pi}}{b_i}\right)^2\right]}$$

DIMENSIONAMENTO PARETI IN ACCIAIO





$$P.L.V.$$

$$L_e = L_i$$

$$1 \cdot \eta = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i \cdot N_i^*}{E\,A_i} \cdot l_i$$

$$K_{Pi} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{N_i \cdot N_i^*}{E\,A_i} \cdot l_i}$$

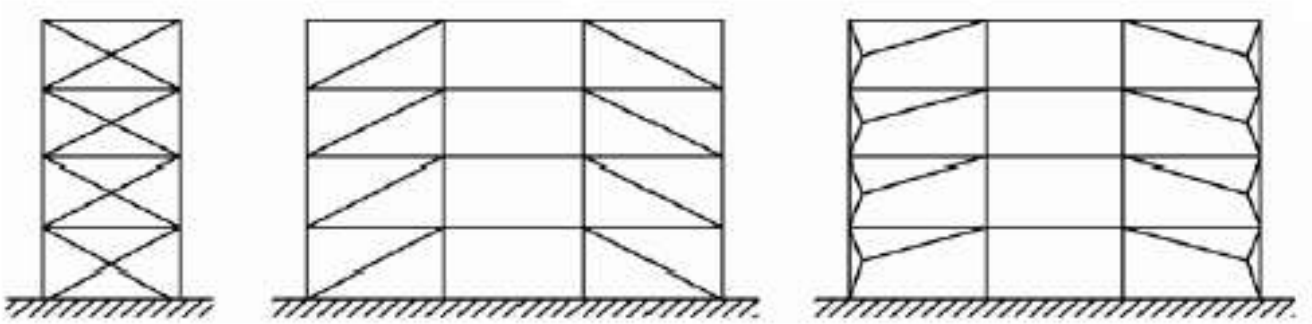
$$K_{Pi} = K_i$$

Si ricavano le sezioni delle aste (A_i) che consentono di ottenere la stessa rigidezza del maschio murario.

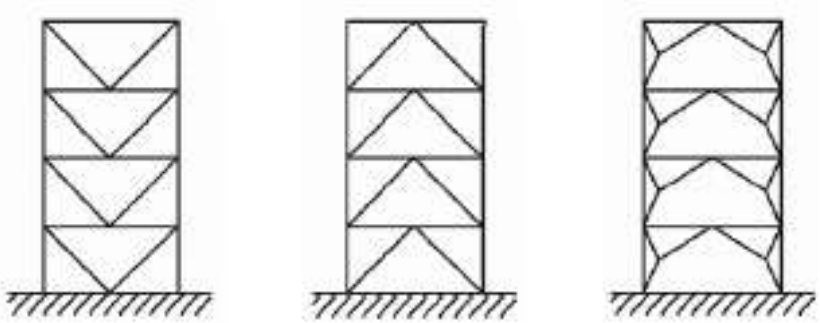
TIPOLOGIE DI CONTROVENTI IN ACCIAIO

Strutture con controventi concentrici

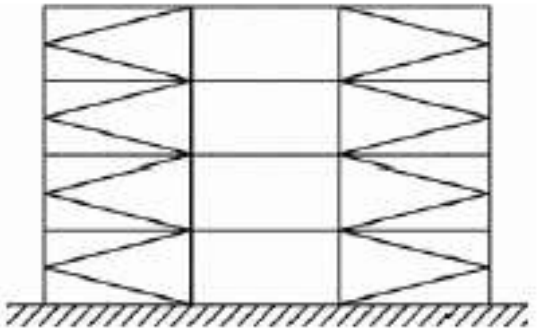
- *controventi a diagonale tesa attiva*
- *controventi a V a portale*
- *controventi a K*



Controventi concentrici a diagonale tesa attiva



Controventi concentrici a V



Controventi concentrici a K