

Horae

via C. Colombo, 19/p6 - 06127 - Perugia
tel. 075/5003198 - Fax 075/5004095



S.T.S. s.r.l.
Software Tecnico Scientifico

ANALISI E VERIFICA DEI MECCANISMI LOCALI

Meccanismi locali

Il D.M. Infrastrutture 14 gennaio 2008 e la relativa Circolare 2 febbraio 2009 n. 617, al Punto C8.7.1.1 riguardante gli edifici esistenti, indicano che la valutazione della sicurezza sismica degli edifici in muratura va eseguita, oltre che con riferimento al comportamento sismico globale, anche con riferimento all'analisi dei meccanismi locali di collasso :

“ Quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi (meccanismi locali), la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico... In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali. ”

Meccanismi locali

- Meccanismi di risposta di questo tipo, generalmente meno resistenti e meno duttili di quelli che coinvolgono la risposta d'insieme del fabbricato, devono quindi essere **opportunamente considerati** nella definizione di un modello di analisi che sia realmente rappresentativo del comportamento sismico strutturale.
- Il primo aspetto dell'analisi riguarda dunque il riconoscimento delle condizioni che predispongono all'attivazione di meccanismi locali di danno e collasso e quindi la valutazione della necessità di effettuare **analisi cinematiche** in sostituzione o in integrazione di analisi della risposta globale del sistema.
- L'individuazione delle modalità di collasso significative per gli edifici si compie quindi innanzitutto attraverso la ricerca di sconnessioni, presenti o che possono formarsi nella compagine muraria a causa delle azioni sismiche, che individuano macroelementi (porzioni più o meno estese della struttura muraria che, nel caso di murature di adeguata qualità, si comportano monoliticamente) suscettibili di instabilità.

Analisi cinematica lineare

- Meccanismi locali si verificano nelle pareti murarie prevalentemente per azioni perpendicolari al loro piano, mentre nel caso di sistemi ad arco anche per azioni nel piano.
- Le verifiche con riferimento ai meccanismi locali di danno e collasso (nel piano e fuori piano) possono essere svolte tramite l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico, che si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematismo.
- L'applicazione del metodo di verifica presuppone quindi l'analisi dei meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere ipotizzati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto, o individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica; inoltre andranno tenute presente la qualità della connessione tra le pareti murarie, la tessitura muraria, la presenza di catene, le interazioni con altri elementi della costruzione o degli edifici adiacenti.

Analisi cinematica lineare

Per ogni possibile meccanismo locale ritenuto significativo per l'edificio, il metodo si articola nei seguenti passi:

- trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile (catena cinematica), attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti da piani di frattura ipotizzabili per la scarsa resistenza a trazione della muratura, in grado di ruotare o scorrere tra loro (meccanismo di danno e collasso);
- valutazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi α_0 che comporta l'attivazione del meccanismo (stato limite di danno);
- valutazione dell'evoluzione del moltiplicatore orizzontale dei carichi α al crescere dello spostamento d_k di un punto di controllo della catena cinematica, usualmente scelto in prossimità del baricentro delle masse, fino all'annullamento della forza sismica orizzontale;
- trasformazione della curva così ottenuta in curva di capacità, ovvero in accelerazione α^* e spostamento d^* spettrali, con valutazione dello spostamento ultimo per collasso del meccanismo (stato limite ultimo);
- verifiche di sicurezza, attraverso il controllo della compatibilità degli spostamenti e/o delle resistenze richieste alla struttura.

Analisi cinematica lineare

- Per l' applicazione del metodo di analisi si ipotizza, in genere:
 - resistenza nulla a trazione della muratura;
 - assenza di scorrimento tra i blocchi;
 - resistenza a compressione infinita della muratura.
- Tuttavia, per una simulazione più realistica del comportamento, è opportuno considerare, in forma approssimata:
 - gli scorrimenti tra i blocchi, considerando la presenza dell' attrito;
 - le connessioni, anche di resistenza limitata, tra le pareti murarie;
 - la presenza di catene metalliche;
 - la limitata resistenza a compressione della muratura, considerando le cerniere adeguatamente arretrate rispetto allo spigolo della sezione;
 - la presenza di pareti a paramenti scollegati

Analisi cinematica lineare

- Assegnata una rotazione virtuale \mathbf{q}_k al generico blocco k , è possibile determinare in funzione di questa e della geometria della struttura, gli spostamenti delle diverse forze applicate nella rispettiva direzione.
- Il moltiplicatore α_0 si ottiene applicando il principio dei Lavori Virtuali, in termini di spostamenti, uguagliando il lavoro totale eseguito dalle forze esterne ed interne applicate al sistema in corrispondenza dell'atto di moto virtuale:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_f$$

dove:

- n è il numero di tutte le forze peso applicate ai diversi blocchi della catena cinematica;
- m è il numero di forze peso non direttamente gravanti sui blocchi le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;
- o è il numero di forze esterne, non associate a masse, applicate ai diversi blocchi;
- P_i è la generica forza peso applicata (peso proprio del blocco, applicato nel suo baricentro, o un altro peso portato);
- P_j è la generica forza peso, non direttamente applicata sui blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio;
- $\delta_{x,i}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
- $\delta_{x,j}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione del j -esimo peso P_j , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
- $\delta_{y,i}$ è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i , assunto positivo se verso l'alto;
- F_h è la generica forza esterna (in valore assoluto), applicata ad un blocco;
- δ_h è lo spostamento virtuale del punto dove è applicata la h -esima forza esterna, nella direzione della stessa, di segno positivo se con verso discorde;
- L_f è il lavoro di eventuali forze interne.

Verifiche di sicurezza

Stato limite di Salvaguardia della Vita

Nel caso in cui la verifica riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra, la verifica di sicurezza nei confronti dello Stato limite di salvaguardia della vita è soddisfatta se l'accelerazione spettrale \mathbf{a}_0^* che attiva il meccanismo soddisfa la seguente disuguaglianza:

$$\mathbf{a}_0^* \geq \mathbf{a}_g (\mathbf{P}_{VR}) \mathbf{S} / \mathbf{q} \quad (\text{C8A.4.9})$$

\mathbf{a}_g = accelerazione sismica al suolo, funzione di \mathbf{PVR} , cioè della probabilità \mathbf{P} di superamento dello stato limite di salvaguardia della vita (pari al 10%) e della vita di riferimento \mathbf{VR} della struttura come definiti punto 3.2 del *D.M.2008*;

\mathbf{q} = il fattore di struttura posto pari a 2;

\mathbf{S} = prodotto del coefficiente di amplificazione stratigrafica e del coefficiente di amplificazione topografica, come definiti al punto 3.2.3.2.1 del *D.M.2008*;

Verifiche di sicurezza

Stato limite di Salvaguardia della Vita

L'accelerazione spettrale di attivazione è data dalla seguente formula:

$$a_0^* = \alpha g / (e^* FC)$$

essendo:

α = moltiplicatore dell'azione sismica che causa il collasso del meccanismo, ricavato applicando il principio dei lavori virtuali;

g = accelerazione di gravità;

e^* = frazione di massa partecipante, come definita al punto C8A.4.2.2 della *Circolare 2009*;

FC = fattore di confidenza (nel caso in cui per la valutazione del moltiplicatore **a₀*** non si tenga conto della resistenza a compressione della muratura, con conseguente arretramento della linea ideale del ribaltamento, il fattore di confidenza sarà comunque posto pari a quello relativo al livello di conoscenza **LC1**).

Verifiche di sicurezza

Stato limite di Salvaguardia della Vita

Nel caso in cui il meccanismo locale interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, si deve tener conto del fatto che l'accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematismo è in genere amplificata rispetto a quella al suolo. Una approssimazione accettabile consiste nel verificare, oltre alla C8A.4.9, anche la:

$$\mathbf{a}_0^* \geq \mathbf{S}_e(\mathbf{T}_1) (\mathbf{Z}/\mathbf{H}) \gamma / \mathbf{q} \quad (\text{C8A.4.10})$$

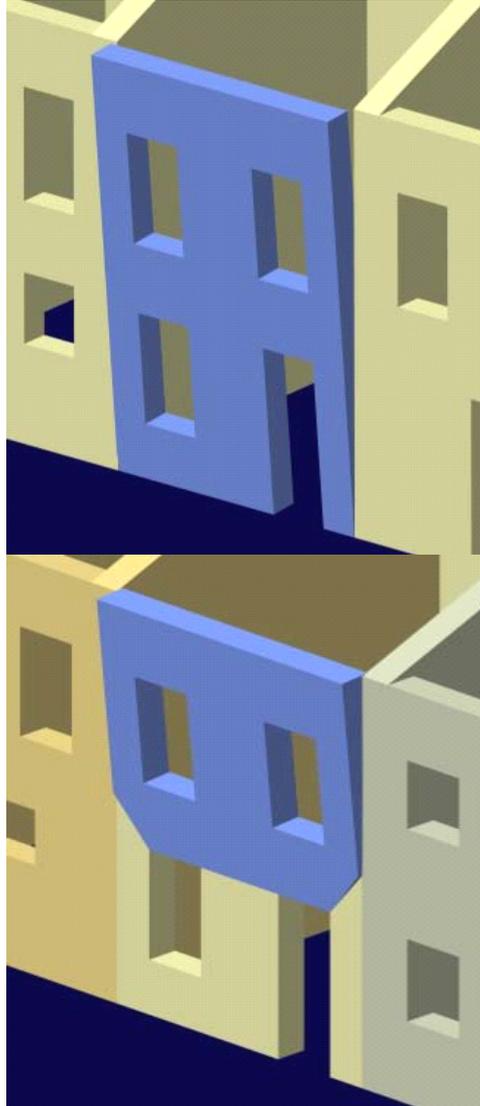
\mathbf{q} = il fattore di struttura posto pari a 2;

\mathbf{S}_e = spettro elastico, come definito al punto 3.2.3.2.1 del *D.M.2008*, funzione del periodo \mathbf{T}_1 , relativo al primo modo di vibrare della struttura;

\mathbf{Z}/\mathbf{H} = approssima la forma del primo modo di vibrare della struttura normalizzato a 1 in sommità, essendo \mathbf{H} l'altezza complessiva dell'edificio e \mathbf{Z} l'altezza del punto più basso della porzione di muratura interessata dal meccanismo, entrambe misurate a partire dalla quota di fondazione dell'edificio;

γ = coefficiente di partecipazione modale, che viene approssimato con l'espressione $\gamma = \mathbf{3N} / (\mathbf{2N} + \mathbf{1})$, essendo \mathbf{N} il numero di piani dell'edificio;

Ribaltamento semplice di parete



Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o porzioni di pareti rispetto ad assi in prevalenza orizzontali alla base di esse e che percorrono la struttura muraria sollecitata da azioni fuori dal piano.

Il ribaltamento può coinvolgere:

- uno o più livelli della parete, in relazione alla presenza di collegamento ai diversi orizzontamenti;
- l'intero spessore del muro o il solo paramento esterno, in relazione alle caratteristiche della struttura muraria (a sacco, carenza di diatoni);
- diverse geometrie della parete, in relazione alla presenza di discontinuità o di aperture.

Ribaltamento semplice di parete

- **Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:**
 - Assenza di vincolo in sommità
 - Assenza di collegamento alle pareti ortogonali.
- **Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:**
 - Assenza di cordoli o catene ai piani
 - Orizzontamenti deformabili e/o mal collegati
 - Intersezioni murarie di cattiva qualità
 - Presenza di spinte non contrastate sulla parete
 - Muratura a sacco o paramenti mal collegati.

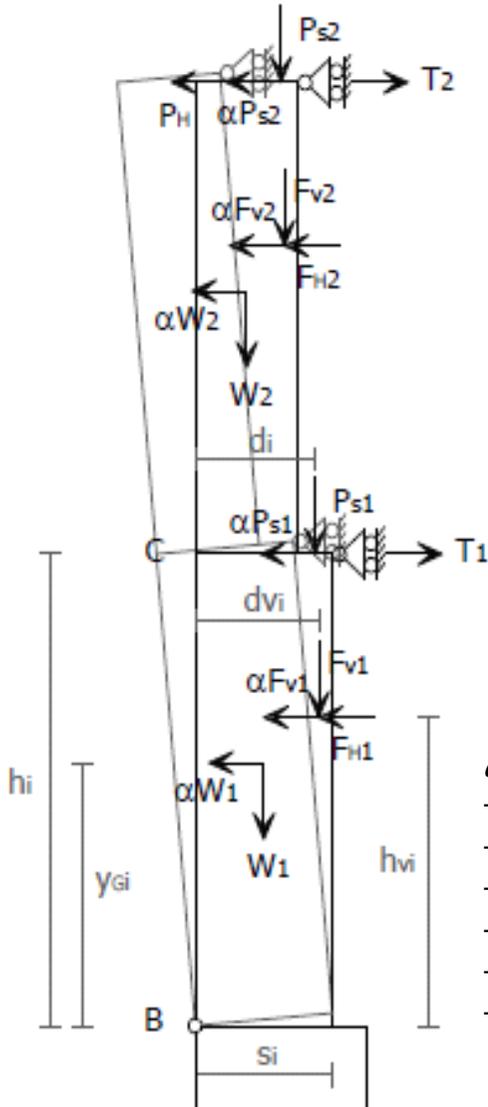
Ribaltamento semplice di parete

Sintomi che manifestano l' avvenuta attivazione del meccanismo:

- Lesioni verticali in corrispondenza delle intersezioni murarie (angolate e martelli murari)
- Fuori piombo della parete ribaltante
- Sfilamento delle travi degli orizzontamenti.



Ribaltamento semplice di parete



Momento stabilizzante:

$$M_S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{S_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i$$

Momento ribaltante:

$$M_R = \alpha \cdot \left[\sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i \right] + \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} + P_H \cdot h_i$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{S_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i - \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} - P_H \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i}$$

dove:

- W_i è il peso proprio della parete al piano i -esimo o del macroelemento i -esimo;
- F_{Vi} è la componente verticale della spinta di archi o volte sulla parete al piano i -esimo;
- P_{Si} è il peso del solaio agente sulla parete al piano i -esimo;
- T_i rappresenta l'azione dei tiranti eventualmente presenti in testa alla parete del piano i -esimo;
- F_{Hi} è la componente orizzontale della spinta di archi o volte sulla parete al piano i -esimo;
- P_H rappresenta la spinta statica trasmessa dalla copertura in testa al macroelemento;

Ribaltamento semplice di parete monolitica parte alta



Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di porzioni sommitali di facciate rispetto ad assi in prevalenza orizzontali alla base di esse e che percorrono la struttura muraria sollecitata da azioni fuori dal piano. È il caso particolare in cui il ribaltamento interessa soltanto l'ultimo livello dell'edificio oppure porzioni di parete sottostanti la copertura.

Ribaltamento semplice di parete a doppia cortina

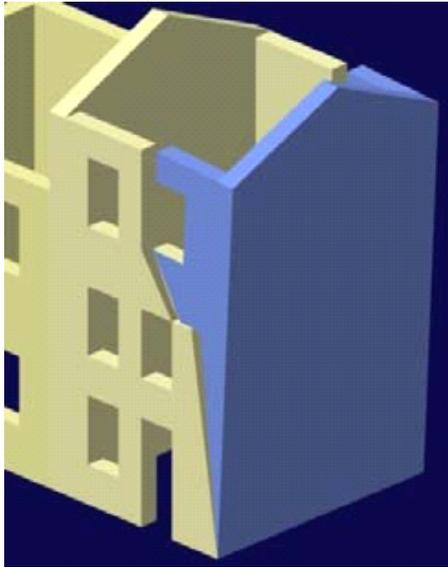


Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida della cortina esterna di pareti a paramenti scollegati, o anche a sacco, rispetto ad assi in prevalenza orizzontali alla base di esse e che percorrono la struttura muraria sollecitata da azioni fuori dal piano. In tali casi i due paramenti possono arrivare ad avere comportamenti pressoché indipendenti, come nel caso limite delle murature a sacco, oppure, se i paramenti sono accostati, interagire lungo la superficie in comune. In fase sismica è perciò possibile che il paramento interno trasferisca parte della propria inerzia su quello esterno.

Ribaltamento semplice di parete a doppia cortina

- Essendo problematica la valutazione della deformabilità che consente il trasferimento di azioni orizzontali attraverso la superficie di contatto tra i due paramenti, che comporterebbe tra l'altro la rimozione dell'ipotesi di blocco rigido, è opportuno ipotizzare l'interazione tra essi limitata alla sola sommità della parete e considerare un cinematismo che interessa entrambe i paramenti.
- Se invece si ritiene opportuno analizzare un meccanismo che interessa il solo paramento esterno, per il quale tra l'altro il ribaltamento è favorito da una forza verticale di compressione generalmente più bassa di quella che si ha nel paramento interno (su cui grava maggiormente il solaio), è comunque possibile considerare le medesime espressioni di α proposte per il caso di parete monolitica riferendole, in questo caso, alla sola cortina esterna.

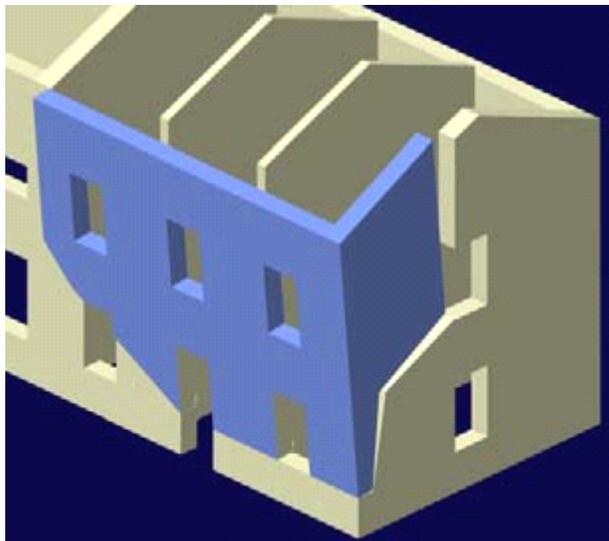
Ribaltamento composto di parete



Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o porzioni di pareti rispetto ad assi in prevalenza orizzontali accompagnata dal trascinarsi di parti delle strutture murarie appartenenti alle pareti di controvento.

Il ribaltamento composto può coinvolgere:

- uno o più livelli della parete, in relazione alla presenza di collegamento ai diversi orizzontamenti
- diverse geometrie del macroelemento, in relazione alla qualità della muratura della parete di controvento ed alla presenza di aperture nella stessa, nonché alla tipologia degli orizzontamenti sovrastanti (se rigidi si possono definire cunei di distacco a doppia diagonale).



Ribaltamento composto di parete

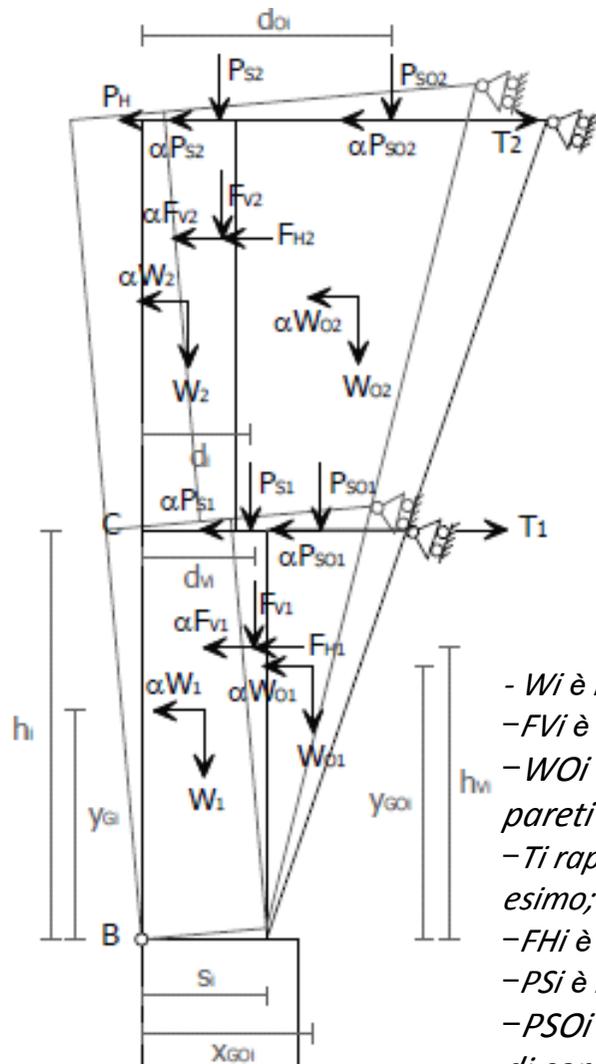
- **Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:**
 - Assenza di vincolo in sommità
 - Efficace connessione con le murature ortogonali.
- **Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:**
 - Assenza di cordoli o catene ai piani
 - Orizzontamenti deformabili e/o mal collegati
 - Presenza di spinte non contrastate sulla parete
 - Bucature localizzate in prossimità delle intersezioni murarie (angolate e martelli murari)
 - Muratura con ridotte proprietà meccaniche.

Ribaltamento composto di parete

- **Sintomi che manifestano l' avvenuta attivazione del meccanismo:**
 - Lesioni diagonali sulle pareti di controvento
 - Fuori piombo della parete ribaltante
 - Sfilamento delle travi degli orizzontamenti.



Ribaltamento composto di parete



Momento stabilizzante:

$$M_S = \sum_i W_i \frac{S_i}{2} + \sum_i F_{Vi} d_{Vi} + \sum_i W_{Oi} x_{GOi} + \sum_i P_{Si} d_i + \sum_i P_{SOi} d_{Oi} + \sum_i T_i h_i$$

Momento ribaltante:

$$M_R = \alpha \left[\sum_i W_i y_{Gi} + \sum_i W_{Oi} y_{GOi} + \sum_i F_{Vi} h_{Vi} + \sum_i P_{Si} h_i + \sum_i P_{SOi} h_i \right] + \sum_i F_{Hi} h_{Vi} + P_H h$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{\sum_i W_i \frac{S_i}{2} + \sum_i F_{Vi} d_{Vi} + \sum_i W_{Oi} x_{GOi} + \sum_i P_{Si} d_i + \sum_i P_{SOi} d_{Oi} + \sum_i T_i h_i - \sum_i F_{Hi} h_{Vi} - P_H h_i}{\sum_i W_i y_{Gi} + \sum_i W_{Oi} y_{GOi} + \sum_i F_{Vi} h_{Vi} + \sum_i P_{Si} h_i + \sum_i P_{SOi} h_i}$$

- W_i è il peso proprio della parete al piano i -esimo o del macroelemento i -esimo;
- F_{Vi} è la componente verticale della spinta di archi o volte sulla parete al piano i -esimo;
- W_{Oi} è il peso proprio della porzione del cono di distacco al piano i -esimo nelle pareti di controvento
- T_i rappresenta l'azione dei tiranti eventualmente presenti in testa alla parete del piano i -esimo;
- F_{Hi} è la componente orizzontale della spinta di archi o volte sulla parete al piano i -esimo;
- P_{Si} è il peso del solaio agente sulla parete al piano i -esimo;
- P_{SOi} è il peso del solaio agente sulla porzione di cono al piano i -esimo nelle pareti di controvento;
- P_H rappresenta la spinta statica trasmessa dalla copertura in testa al macroelemento;

Ribaltamento composto di cuneo diagonale parte alta



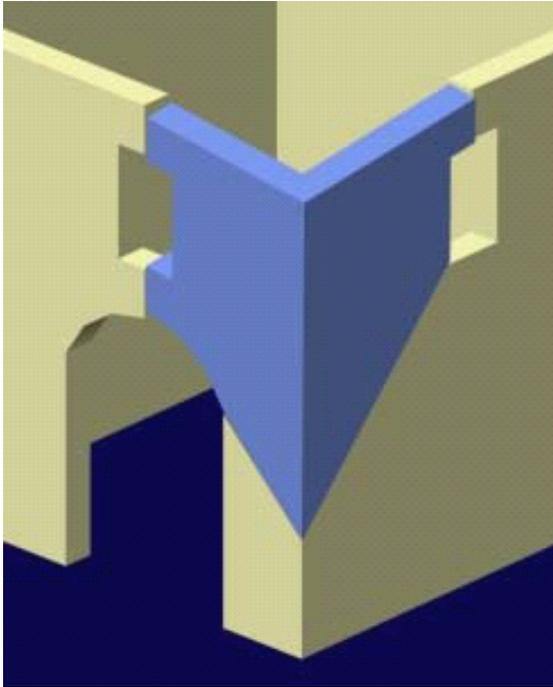
- Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di porzioni sommitali di facciate rispetto ad assi in prevalenza orizzontali accompagnata dal trascinamento di parti delle strutture murarie appartenenti alle pareti di controvento.
- In questo caso il ribaltamento interessa soltanto l'ultimo livello dell'edificio oppure porzioni di parete sottostanti la copertura.

Ribaltamento composto di cuneo a doppia diagonale



- Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o porzioni di pareti rispetto ad assi in prevalenza orizzontali accompagnata dal trascinarsi di parti delle strutture murarie appartenenti alle pareti di controvento.
- La configurazione del macroelemento è in questo caso definita dal distacco, nelle pareti di controvento, di un cuneo a doppia diagonale. Questa condizione è legata generalmente alla presenza di solai rigidi, solitamente realizzati in laterocemento o comunque dotati di una soletta armata o di cordoli in c.a., non efficacemente ancorati alla muratura sottostante. Questi, pur non rappresentando un vincolo al ribaltamento, contrastano l'innalzamento della parte superiore di muratura di controvento.

Ribaltamento del cantonale

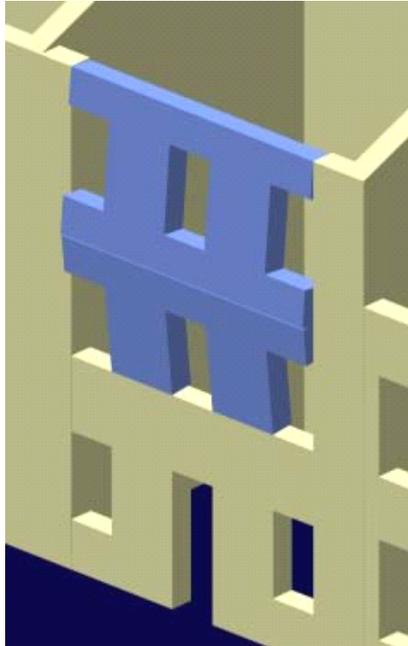


- Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di un cuneo di distacco, delimitato da superfici di frattura ad andamento diagonale nelle pareti concorrenti nelle angolate libere, rispetto ad una cerniera posta alla base dello stesso.

Meccanismi di questo tipo sono frequenti in edifici che presentano spinte concentrate in testa ai cantonali dovute in particolar modo ai carichi trasmessi dai puntoni dei tetti a padiglione.

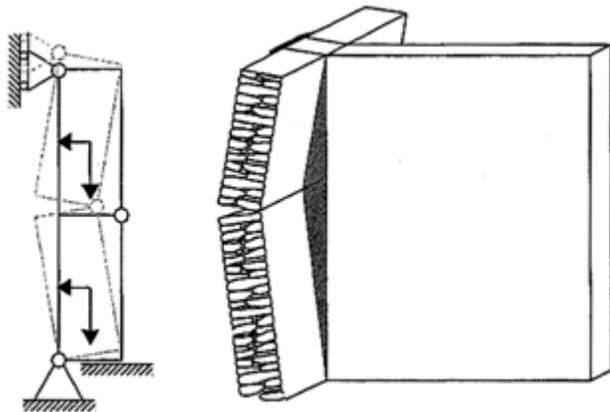
- Si suppone che il ribaltamento avvenga nella direzione di spinta del puntone e che il cinematismo sia definito dalla rotazione del macroelemento individuato intorno ad un asse perpendicolare al piano verticale che forma un angolo di 45° con le pareti convergenti nell'angolata e passante per la cerniera suddetta.

Flessione verticale di parete



- Il meccanismo si manifesta con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete in due blocchi ed è descritto dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.

- La flessione verticale può coinvolgere:
 - uno o più livelli della parete, in relazione alla presenza di collegamento ai diversi orizzontamenti
 - l'intero spessore del muro o il solo paramento esterno, in relazione alle caratteristiche della struttura muraria
 - diverse geometrie della parete, in relazione alla presenza di discontinuità o di aperture e spinte localizzate sulla parete.



Flessione verticale di parete

- **Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:**
 - Trattenimento efficace in testa alla parete
 - Carenza di collegamento alle pareti ortogonali.
- **Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:**
 - Snellezza eccessiva delle pareti
 - Muratura a sacco o paramenti mal collegati
 - Spinte orizzontali localizzate (archi, volte)
 - Orizzontamenti intermedi mal collegati.

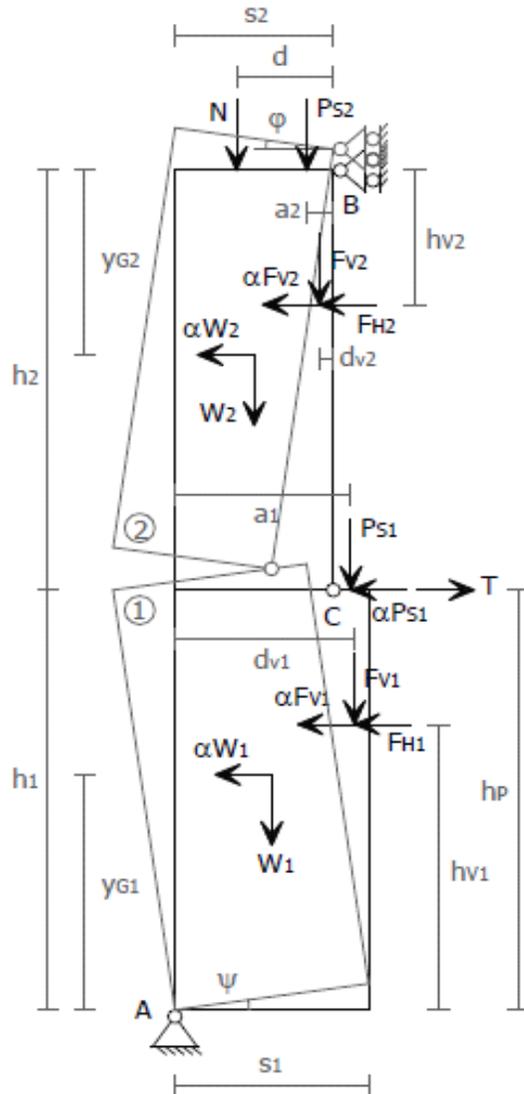
Flessione verticale di parete



- **Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:**
 - Spanciamenti e fuori piombo della parete
 - Lesioni orizzontali e verticali
 - Sfilamento delle travi degli orizzontamenti intermedi



Flessione verticale di parete



Equazione dei lavori virtuali:

$$\alpha \cdot [W_1 \delta_{1x} + W_2 \delta_{2x} + F_{V1} \delta_{V1x} + F_{V2} \delta_{V2x} + P_{S1} \delta_{P1x}] + F_{H1} \delta_{V1x} + F_{H2} \delta_{V2x} = \\ = W_1 \delta_{1y} + W_2 \delta_{2y} + F_{V1} \delta_{V1y} + F_{V2} \delta_{V2y} + N \delta_{Ny} + P_{S1} \delta_{P1y} + P_{S2} \delta_{P2y} + T \delta_{P1x}$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{E}{W_1 y_{G1} + F_{V1} h_{V1} + P_{S1} h_P + (W_2 y_{G2} + F_{V2} h_{V2}) \frac{h_1}{h_2}}$$

Il termine E indica la seguente espressione:

$$E = \frac{W_1}{2} s_1 + F_{V1} d_{V1} + (W_2 + P_{S2} + N + F_{V2}) s_2 + \\ + \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{W_2}{2} s_2 + P_{S2} a_2 + N d + F_{V2} d_{V2} - F_{H2} h_{V2} \right) + P_{S1} a_1 - F_{H1} h_{V1} + T h_P$$

- W_i è il peso proprio della parete al piano i -esimo o del macroelemento i -esimo;
- F_{Vi} è la componente verticale della spinta di archi o volte sulla parete al piano i -esimo;
- T rappresenta l'azione dei tiranti eventualmente presenti in testa alla parete del piano i -esimo;
- F_{Hi} è la componente orizzontale della spinta di archi o volte sulla parete al piano i -esimo;
- P_{Si} è il peso del solaio agente sulla parete al piano i -esimo;

Flessione verticale di parete monolitica un piano



Il meccanismo si manifesta con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete compresa tra due solai successivi in due blocchi ed è descritto dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.

Flessione verticale di parete monolitica a più piani



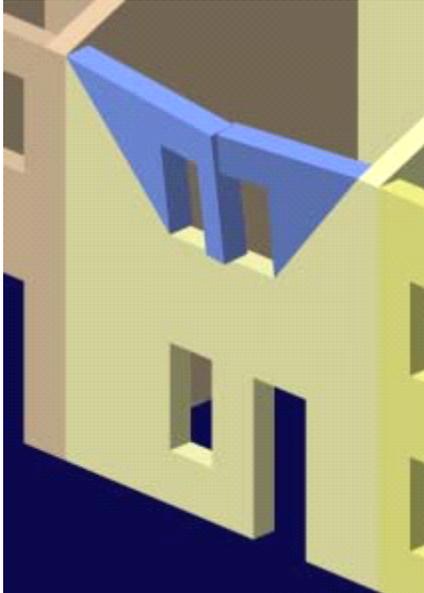
- Il meccanismo si manifesta con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete compresa tra due solai efficacemente connessi alla muratura in due blocchi ed è descritto dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.
- È il caso particolare in cui la tesa muraria è individuata da tre livelli dell'edificio con due impalcati intermedi non collegati alla muratura ed è frequente negli edifici che presentano solai appoggiati ed un cordolo in copertura.

Flessione verticale di parete a doppia cortina a più piani



Il meccanismo si manifesta con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la cortina esterna di una parete, compresa tra due solai efficacemente connessi alla muratura ed un orizzontamento intermedio non collegato, in due blocchi ed è descritto dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.

Flessione orizzontale di parete



- Il meccanismo si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete e col distacco di corpi cuneiformi accompagnato dalla formazione di cerniere cilindriche oblique e verticali per azioni fuori dal piano.
- La flessione orizzontale può coinvolgere:
 - l'intero spessore del muro o il solo paramento esterno, in relazione alle caratteristiche della struttura muraria;
 - diverse geometrie della parete, in relazione alla presenza di discontinuità o di aperture ed alla qualità della muratura;
- La flessione orizzontale può inoltre avvenire secondo differenti modalità di collasso:
 - per instabilità orizzontale legata all'allontanamento delle pareti di controvento, nel caso di edifici isolati, di testata o d'angolo;
 - per crisi del materiale nel caso di cella interclusa in una schiera e parete confinata lateralmente.

Flessione orizzontale di parete

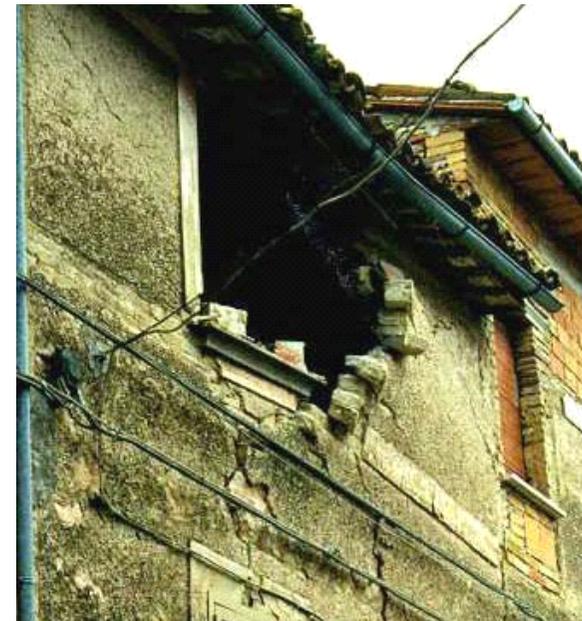
- **Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:**
 - Efficace collegamento alle pareti ortogonali;
 - Assenza di vincolo in sommità.
- **Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:**
 - Solaio di copertura mal collegato alla muratura;
 - Presenza di coperture spingenti;
 - Presenza di aperture ricavate nello spessore murario (nicchie, canne fumarie, ecc.);
 - Muratura a sacco o paramenti mal collegati;
 - Muri di spina distanti (parete snella).

Flessione orizzontale di parete

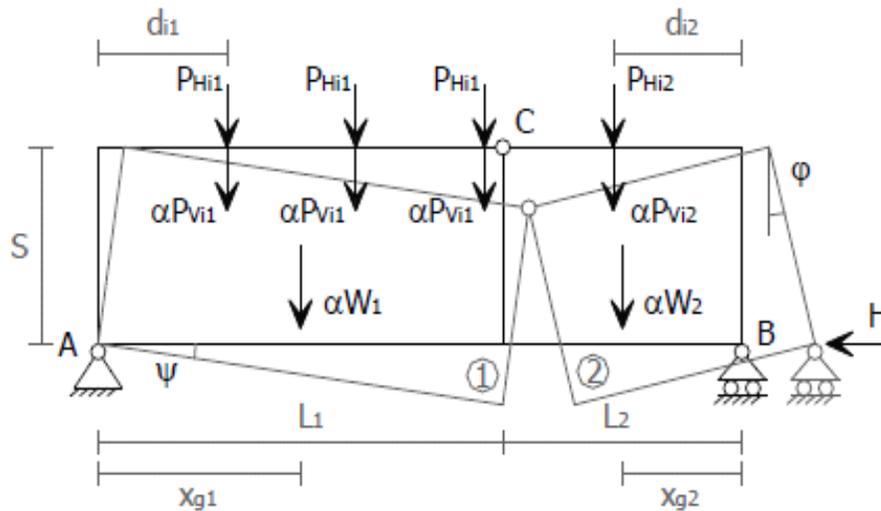


Sintomi che manifestano l' avvenuta attivazione del meccanismo:

- Lesioni verticali ed oblique sulla faccia esterna ed interna della parete e rigonfiamenti;
- Sfilamento delle travi del tetto.



Flessione orizzontale di parete



Equazione dei lavori virtuali:

$$\alpha \cdot \left[W_1 \delta_{1y} + W_2 \delta_{2y} + \sum_i P_{Vi1} \delta_{Pi1y} + \sum_i P_{Vi2} \delta_{Pi2y} \right] + \sum_i P_{Hi1} \delta_{Pi1y} + \sum_i P_{Hi2} \delta_{Pi2y} - H \delta_{Hx} = 0$$

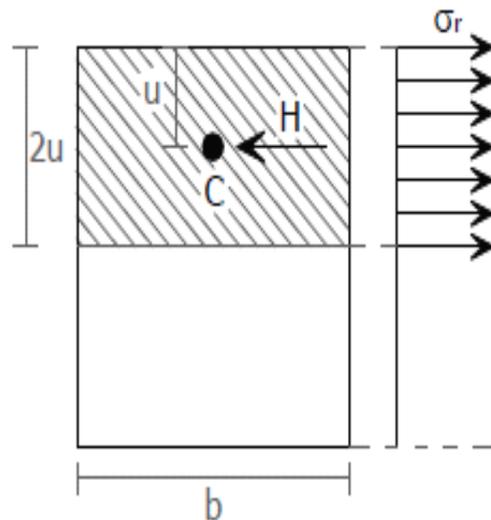
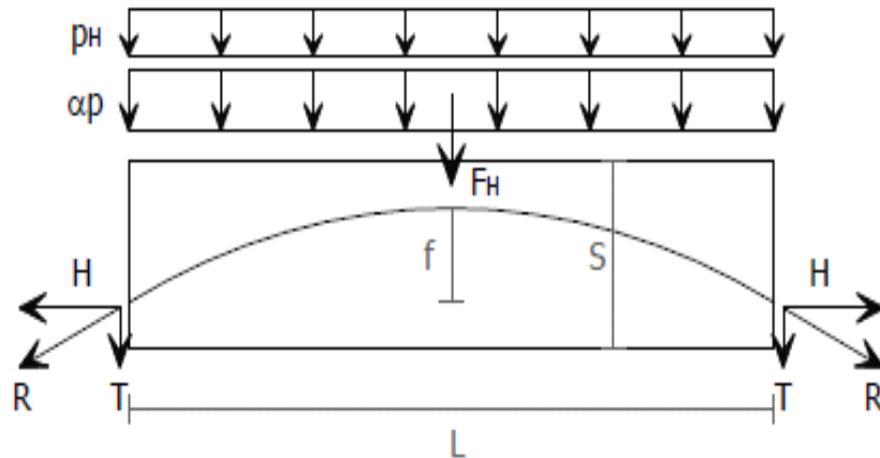
Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{H \cdot s \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right) - \sum_i P_{Hi1} d_{i1} - \sum_i P_{Hi2} \frac{L_1}{L_2} d_{i2}}{W_1 x_{G1} + W_2 \frac{L_1}{L_2} x_{G2} + \sum_i P_{Vi1} d_{i1} + \sum_i P_{Vi2} \frac{L_1}{L_2} d_{i2}}$$

Il termine H si può valutare considerando le condizioni di equilibrio limite al ribaltamento delle pareti ortogonali.

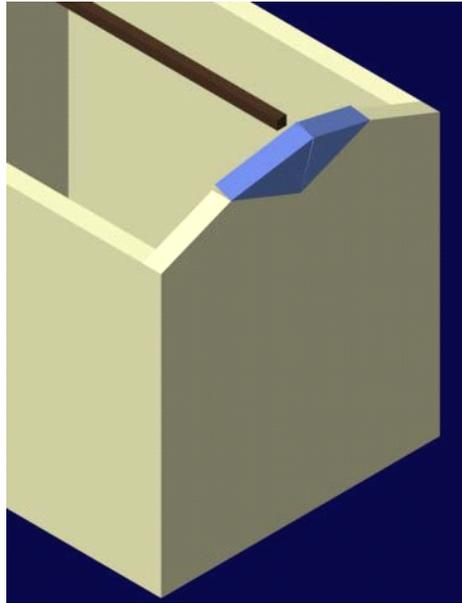
- W_i è il peso proprio della parete al piano i -esimo o del macroelemento i -esimo;
- P_{Vij} rappresenta l' i -esimo carico verticale trasmesso in testa al macroelemento j -esimo;
- P_{Hij} è l' i -esima componente di spinta statica trasmessa dalla copertura in testa al corpo j -esimo;
- H rappresenta il valore massimo della reazione supportabile dalla parete di controvento o dall'eventuale tirante alla spinta dell'effetto arco orizzontale nello spessore della facciata;

Flessione orizzontale di parete confinata



- Il meccanismo si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete e col distacco di corpi cuneiformi accompagnato dalla formazione di cerniere plastiche oblique e verticali per azioni fuori dal piano.
- È il caso particolare in cui l'attivazione del cinematismo è dovuta allo schiacciamento della muratura in corrispondenza delle cerniere plastiche, a causa dello stato tensionale indotto dalle azioni sismiche, e riguarda essenzialmente le facciate di celle intercluse in edifici a schiera

Sfondamento della parete del timpano



- Il meccanismo si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete del timpano e col distacco di corpi cuneiformi definiti da sezioni di frattura oblique e verticali per azioni fuori dal piano. Il cinematismo è in genere provocato dall'azione ciclica di martellamento della trave di colmo della copertura.
- In fase sismica la presenza di travi di colmo di notevoli dimensioni causa il trasferimento di una elevata spinta alla parete del timpano e può determinare il distacco di macroelementi cuneiformi e l'instaurarsi delle condizioni di instabilità che si manifestano attraverso la rotazione degli stessi attorno a cerniere oblique.