



## Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi

a cura di:

**L. Milano, A. Mannella, C. Morisi, A. Martinelli**

Le schede che seguono esemplificano e sintetizzano gli aspetti significativi dell'analisi dei cinematismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura.

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 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.

Le schede proposte rappresentano in tal senso una sorta di guida essenziale alla comprensione, al riconoscimento ed all'analisi dei meccanismi di collasso più significativi per le costruzioni esistenti in muratura. I contenuti sono articolati in 4 schede principali, relative ciascuna ad ognuno dei raggruppamenti di meccanismi di collasso locali che più frequentemente interessano le tipologie di edifici considerati, ed ulteriori schede ridotte riferite ai casi specifici distinti all'interno di ciascun raggruppamento e per i quali si riportano le formulazioni e gli schemi di analisi, con brevi commenti che ne evidenziano le particolarità rispetto ai casi generali. Le 4 schede principali riguardano rispettivamente i meccanismi di: *Ribaltamento Semplice, Ribaltamento Composto, Flessione Verticale e Flessione Orizzontale*. In ogni scheda è riportata innanzitutto una **sintetica descrizione** delle modalità di collasso associate al meccanismo trattato, accompagnata da **illustrazioni schematiche** e **riferimenti fotografici** di dissesti realmente manifestatisi a seguito di sismi passati in edifici esistenti. Nella colonna a destra, accanto alle illustrazioni, sono poi riassunti i principali fattori condizionanti il riconoscimento di ciascun meccanismo, essenzialmente rappresentati dalle:

- **Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:** sono indicate le condizioni di vincolo della parete, o porzione di parete, coinvolta nel cinematismo e più in particolare i vincoli la cui assenza o carenza predispongono all'attivazione del meccanismo e per i quali occorre una verifica sull'edificio rivolta alla valutazione dell'esistenza e dell'efficacia;
- **Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:** sono segnalate le principali carenze costruttive e tecnologiche, da cui tra l'altro dipendono strettamente le condizioni di vincolo ipotizzabili per i corpi coinvolti nel cinematismo, e le vulnerabilità specifiche la cui esistenza nell'edificio è indicativa della possibilità di attivazione del meccanismo trattato;

- **Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:** sono individuate le condizioni di danneggiamento e dissesto che più frequentemente si associano all'avvenuta attivazione del meccanismo e che consentono, qualora vengano rilevate, di ipotizzare le modalità di collasso di edifici già colpiti da un sisma;
- **Differenti varianti del meccanismo:** in relazione alle diverse caratteristiche costruttive degli edifici, sono specificate le varie modalità con cui il meccanismo considerato può manifestarsi dando luogo a differenti configurazioni dei corpi coinvolti nel cinematismo di collasso.

All'interno di ogni scheda un'apposita sezione è dedicata alla **formulazione analitica** del relativo problema cinematico, con l'indicazione delle espressioni che consentono di valutare il moltiplicatore orizzontale dei carichi agenti sugli elementi strutturali  $\alpha = \alpha_0$ , rapporto tra le forze orizzontali applicate ed i corrispondenti pesi delle masse presenti, che porta all'attivazione dei cinematismi di collasso locali considerati, a partire dalla conoscenza delle grandezze coinvolte nell'analisi. Accanto alle espressioni è riportato lo **schema di calcolo** al quale è esplicitamente riferita la formulazione proposta e che consente una rapida individuazione del significato di ciascun termine, oltre che della configurazione geometrica assunta per il sistema, delle condizioni di vincolo ipotizzate per gli elementi della catena cinematica e delle azioni considerate agenti sui macroelementi.

Per una più agevole lettura delle formulazioni contenute nelle schede, di seguito si riassumono i simboli in esse utilizzati più frequentemente con l'indicazione del principale significato ad essi attribuito:

- $\alpha$  è il moltiplicatore orizzontale dei carichi agenti sui macroelementi;
- $n$  è il numero di piani interessati dal cinematismo;
- $W_i$  è il peso proprio della parete al piano  $i$ -esimo o del macroelemento  $i$ -esimo;
- $W_{O_i}$  è il peso proprio della porzione del cuneo di distacco al piano  $i$ -esimo nelle pareti di controvento (comprensivo di eventuali carichi trasmessi da archi o volte su di esso agenti);
- $F_{V_i}$  è la componente verticale della spinta di archi o volte sulla parete al piano  $i$ -esimo;
- $F_{H_i}$  è la componente orizzontale della spinta di archi o volte sulla parete al piano  $i$ -esimo;
- $P_{S_i}$  è il peso del solaio agente sulla parete al piano  $i$ -esimo;
- $P_{SO_i}$  è il peso del solaio agente sulla porzione di cuneo al piano  $i$ -esimo nelle pareti di controvento;
- $P_{V_{ij}}$  rappresenta l' $i$ -esimo carico verticale trasmesso in testa al macroelemento  $j$ -esimo;
- $P$  è il carico trasmesso dalla trave di colmo oppure dal puntone del tetto a padiglione;
- $N$  è il generico carico verticale agente in testa al macroelemento;
- $H$  rappresenta il valore massimo della reazione sopportabile dalla parete di controvento o dall'eventuale tirante alla spinta dell'effetto arco orizzontale nello spessore della facciata;
- $P_H$  rappresenta la spinta statica trasmessa dalla copertura in testa al macroelemento;
- $P_{H_{ij}}$  è l' $i$ -esima componente di spinta statica trasmessa dalla copertura in testa al corpo  $j$ -esimo;
- $T_i$  rappresenta l'azione dei tiranti eventualmente presenti in testa alla parete del piano  $i$ -esimo;
- $s_i$  è lo spessore della parete al piano  $i$ -esimo;
- $h_i$  è il braccio verticale dell'azione trasmessa dal solaio e/o dal tirante alla parete al piano  $i$ -esimo oppure è l'altezza del macroelemento  $i$ -esimo;
- $h_{p_i}$  è il braccio verticale dell'azione trasmessa dal solaio alla parete al piano  $i$ -esimo;
- $L_i$  è la lunghezza del macroelemento  $i$ -esimo;
- $x_{G_i}$  è il braccio orizzontale del peso proprio del corpo  $i$ -esimo;
- $y_{G_i}$  è il braccio verticale del peso proprio del corpo  $i$ -esimo;
- $x_{GO_i}$  è il braccio orizzontale del peso proprio della porzione del cuneo di distacco al piano  $i$ -esimo nelle pareti di controvento;
- $y_{GO_i}$  è il braccio verticale del peso proprio della porzione del cuneo di distacco al piano  $i$ -esimo nelle pareti di controvento;
- $d$  è il braccio orizzontale del generico carico verticale trasmesso in testa al macroelemento;
- $d_i$  è il braccio orizzontale del carico trasmesso dal solaio sulla parete al piano  $i$ -esimo;
- $d_{ij}$  è il braccio orizzontale dell' $i$ -esimo carico verticale applicato in testa al corpo  $j$ -esimo;
- $d_{O_i}$  è il braccio orizzontale del carico trasmesso dal solaio al cuneo di distacco nelle pareti di controvento;
- $a_i$  è il braccio orizzontale del carico trasmesso dal solaio sulla parete al piano  $i$ -esimo;
- $h_{V_i}$  è il braccio verticale della spinta di archi o volte al piano  $i$ -esimo;
- $d_{V_i}$  è il braccio orizzontale delle azioni trasmesse da archi o volte al piano  $i$ -esimo.

Si osserva che i bracci delle diverse azioni considerate agenti sui macroelementi sono riferiti alle cerniere rispetto alle quali avviene la rotazione del relativo corpo rigido. Inoltre, con riferimento ai meccanismi che interessano pareti a doppia cortina, i simboli accompagnati dai pedici *A* e *B* indicano grandezze riferite rispettivamente alla cortina esterna ed interna.

Per concludere, a completamento dell'abaco qui proposto, si riportano alcune indicazioni di carattere generale legate agli aspetti applicativi dell'analisi.

Da quanto già detto appare evidente che l'esame del comportamento sismico e delle condizioni di collasso di un edificio esistente in muratura non può prescindere da un accurato **rilievo** dello stesso. Questo deve essere volto in particolare alla valutazione di quegli aspetti che maggiormente condizionano la risposta sismica degli edifici oggetto d'indagine. Sarà opportuno dunque porre attenzione, oltre che alla configurazione geometrica dell'edificio ed alla tipologia e qualità muraria, anche alle caratteristiche tecnologiche del sistema resistente ed all'efficacia delle connessioni tra gli elementi resistenti verticali e tra pareti ed orizzontamenti, nonché alle azioni che si esercitano sugli elementi strutturali, riconoscendo condizioni sfavorevoli all'equilibrio (presenza di spinte non contrastate), all'eventuale stato di degrado e quadro fessurativo ed alla possibile interazione con le strutture adiacenti e con il terreno. In tal modo, in presenza di carenze strutturali e vulnerabilità specifiche rilevate ed in assenza di determinati vincoli efficaci tra gli elementi costituenti la fabbrica, è possibile ipotizzare l'attivazione di definiti **meccanismi di collasso** locali e definire l'evoluzione dei relativi cinematismi. Si ribadisce tuttavia che, per le stesse ipotesi alla base dell'analisi cinematica (presenza di blocchi, o macroelementi, considerati come corpi rigidi), l'esame dei meccanismi di collasso locali ha significato qualora le caratteristiche meccaniche del sistema murario non siano tali da consentire la disgregazione della muratura. Il riconoscimento delle modalità di collasso della compagine muraria è poi agevolato qualora l'edificio in esame abbia già subito gli effetti di un sisma, attraverso la lettura e l'interpretazione del danneggiamento rilevato.

Una volta individuato il tipo di risposta sismica dell'edificio occorre procedere alla definizione dello **schema di calcolo** di riferimento per il modello di analisi adottato. Questa operazione si compie attraverso la descrizione della geometria dei macroelementi che costituiscono la catena cinematica, delle condizioni di vincolo dei corpi e la determinazione delle forze su di essi agenti (pesi propri, carichi verticali portati, spinte statiche, eventuali ulteriori forze esterne, forze orizzontali prodotte dal sisma e rappresentate dalle inerzie delle masse non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio). La valutazione di tutte le grandezze richieste dal modello di analisi consente quindi di definire, mediante l'elaborazione, l'entità dell'azione sismica che attiva il cinematismo esaminato attraverso il calcolo del moltiplicatore  $\alpha = \alpha_0$  delle azioni orizzontali e della PGA di confronto per le **verifiche**.

Nella fase di riconoscimento delle modalità di risposta del fabbricato in esame ed in quella di definizione dello schema di calcolo possono essere di ausilio le schede qui proposte. Per quel che riguarda la fase conclusiva di valutazione e verifica si può ricorrere all'uso dei software disponibili sul sito di ReLUI: C.I.N.E. per l'analisi cinematica lineare e C-Sisma per l'analisi non lineare.

Per una maggiore comprensione ed approfondimento degli aspetti metodologici ed applicativi dell'analisi, a corredo del software C.I.N.E. è inoltre disponibile ulteriore documentazione tecnica reperibile on-line sul sito: <http://terremotoabruzzo09.itc.cnr.it>, nella sezione "Pubblicazioni" – "Libri". In particolare:

- per gli aspetti metodologico-analitici si può far riferimento a: "AA.VV., 2007. *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura*. Parte Seconda - Modelli cinematici per l'analisi strutturale degli edifici in muratura. Sisma Marche 1997 - Decreto del Commissario Delegato per gli interventi di Protezione Civile n. 28 del 10 aprile 2002. Tipografia Grafiche Scarponi s.r.l., Osimo (AN)";
- ulteriori aspetti applicativi sono presenti in: "AA. VV., 2008. *Sisma Molise 2002: Dall'emergenza alla ricostruzione. Edifici in Muratura*. Capitolo 6 - Meccanismi di collasso locali: Analisi cinematica lineare. DEI – Tipografia del Genio Civile, Roma".

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.

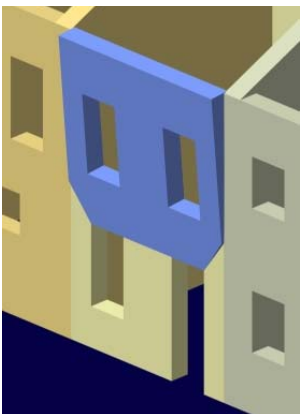
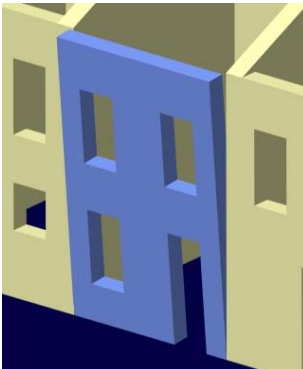


Foto da: MEDEA - Papa e Zuccaro, 2001



Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



#### 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.

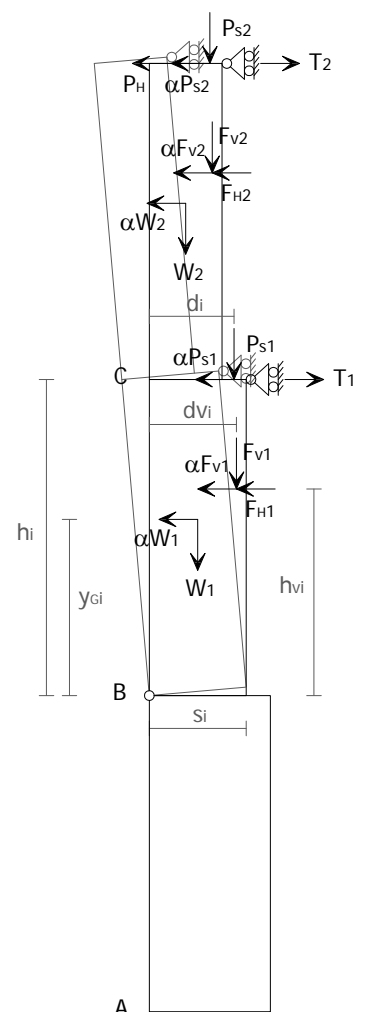
#### Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:

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

#### Differenti varianti del meccanismo

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.



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:

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



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.

Momento stabilizzante:

$$M_{S(A)} = W \cdot \frac{s}{2} + F_V \cdot d_V + P_S \cdot d + T \cdot h$$

Momento ribaltante:

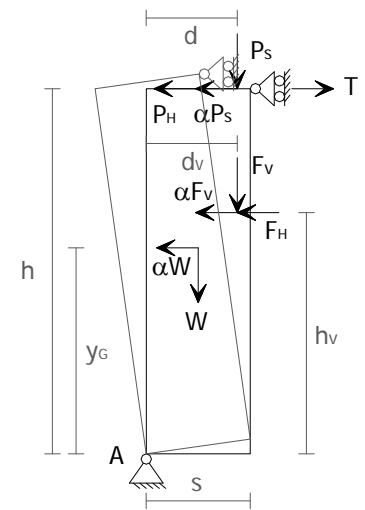
$$M_{R(A)} = \alpha \cdot [W \cdot y_G + F_V \cdot h_V + P_S \cdot h] + F_H \cdot h_V + P_H \cdot h$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{W \cdot \frac{s}{2} + F_V \cdot d_V + P_S \cdot d + T \cdot h - F_H \cdot h_V - P_H \cdot h}{W \cdot y_G + F_V \cdot h_V + P_S \cdot h}$$



Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



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. 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 (così come indicato nello schema di calcolo di riferimento). 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  $\alpha$  proposte per il caso di parete monolitica riferendole, in questo caso, alla sola cortina esterna.

Momento stabilizzante:

$$M_S = (W_A + N_A) \frac{s_A}{2} + P_{SA} d_A + (W_B + N_B) \frac{s_B}{2} + P_{SB} d_B + F_V d_V + T h$$

Momento ribaltante:

$$M_R = \alpha [(W_A + W_B) y_G + F_V h_V + (P_{SA} + P_{SB} + N_A + N_B) h] + F_H h_V + P_H h$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{(W_A + N_A) s_A + (W_B + N_B) s_B}{2[(W_A + W_B) y_G + F_V h_V + (P_{SA} + P_{SB} + N_A + N_B) h]} + \frac{P_{SA} d_A + P_{SB} d_B + F_V d_V - F_H h_V + T h - P_H h}{(W_A + W_B) y_G + F_V h_V + (P_{SA} + P_{SB} + N_A + N_B) h}$$

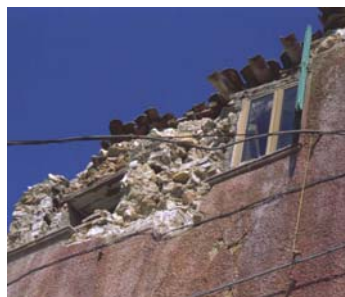
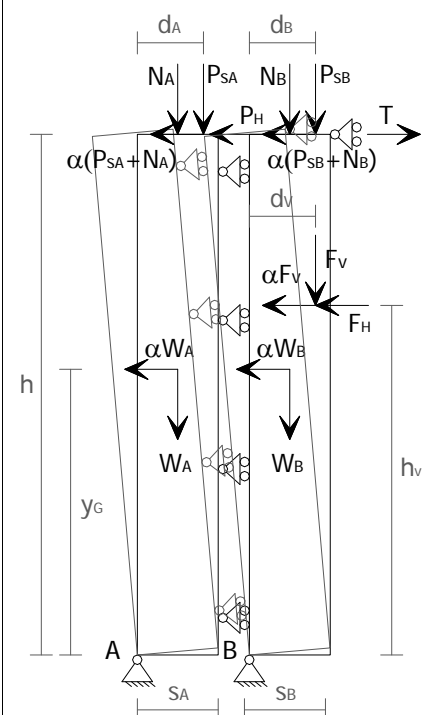


Foto da: MEDEA – Papa e Zuccaro, 2001



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



Foto da: MEDEA – Papa e Zuccaro, 2001

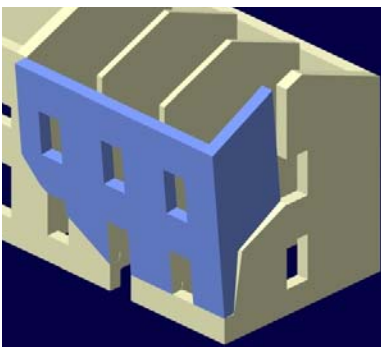


Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



**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.

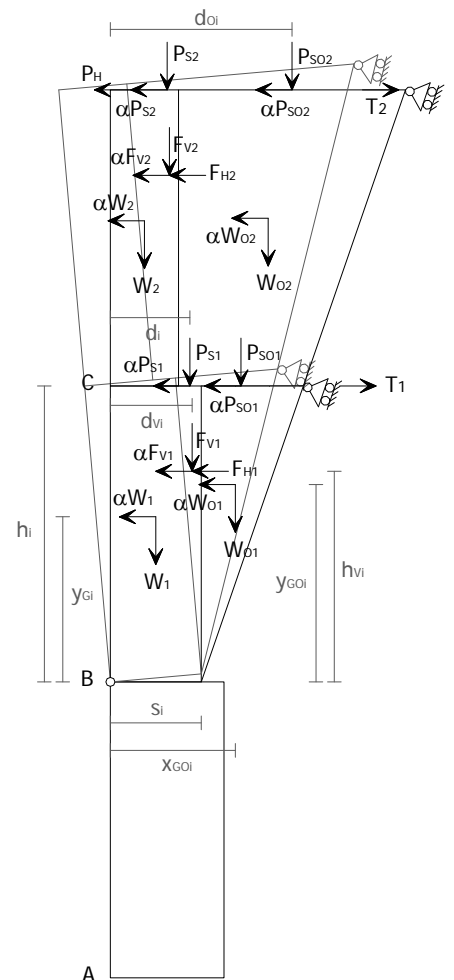
**Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:**

- Lesioni diagonali sulle pareti di controvento;
- Fuori piombo della parete ribaltante;
- Sfilamento delle travi degli orizzontamenti.

**Differenti varianti del meccanismo**

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).



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:

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

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.

Momento stabilizzante:

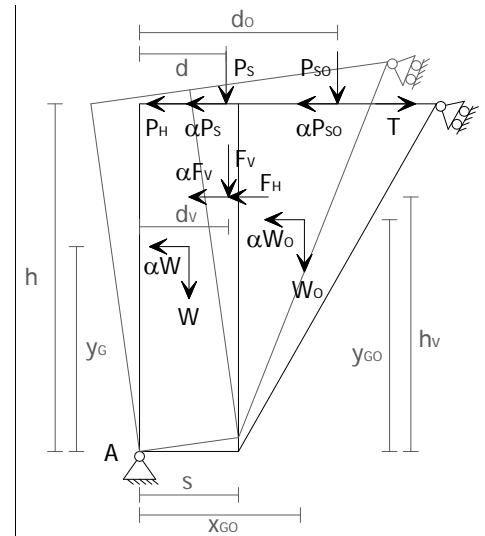
$$M_{S(A)} = W \frac{s}{2} + F_V d_V + W_O x_{GO} + P_S d + P_{SO} d_O + T h$$

Momento ribaltante:

$$M_{R(A)} = \alpha [W y_G + W_O y_{GO} + F_V h_V + P_S h + P_{SO} h] + F_H h_V + P_H h$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{W \frac{s}{2} + F_V d_V + W_O x_{GO} + P_S d + P_{SO} d_O + T h - F_H h_V - P_H h}{W y_G + W_O y_{GO} + F_V h_V + P_S h + P_{SO} h}$$



Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o porzioni di pareti rispetto ad assi in prevalenza orizzontali accompagnata dal trascinamento 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.

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:

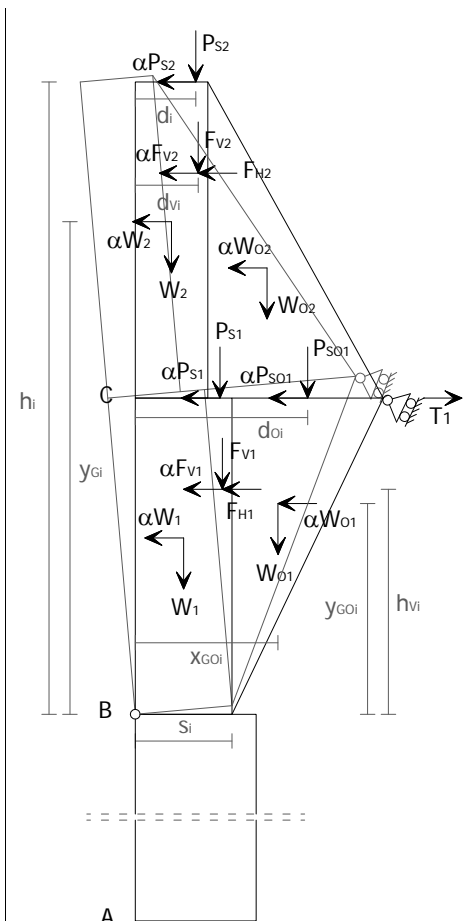
$$M_R = \alpha \left[ \sum_i W_i y_{Gi} + \sum_i W_{Oi} y_{GOi} + \sum_i F_{Vi} h_{Vi} + \sum_i P_{Si} h_i + \sum_i P_{SOi} h_i \right] + \sum_i F_{Hi} h_{Vi}$$

Moltiplicatore di collasso:

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



Foto da: MEDEA - Papa e Zuccaro, 2001





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 angolature 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 (A).



Foto da: MEDEA - Papa e Zaccaro, 2001

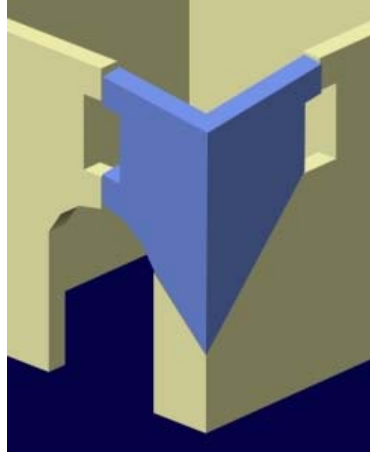
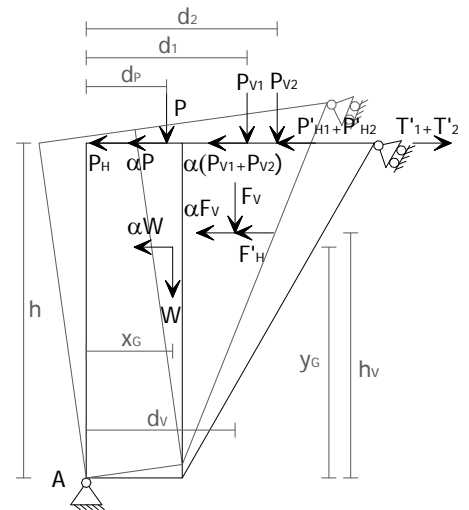
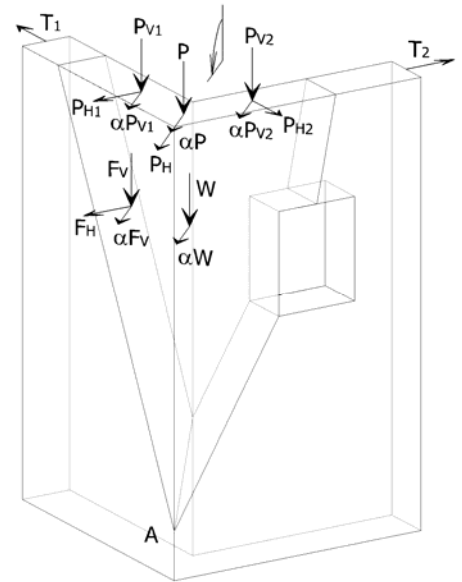


Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



Momento stabilizzante:

$$M_{S(A)} = W x_G + F_V d_V + P d_P + P_{V1} d_1 + P_{V2} d_2 + (T'_1 + T'_2) h$$

Momento ribaltante:

$$M_{R(A)} = \alpha [W y_G + F_V h_V + (P + P_{V1} + P_{V2}) h] + F'_H h_V + (P_H + P'_{H1} + P'_{H2}) h$$

Moltiplicatore di collasso:

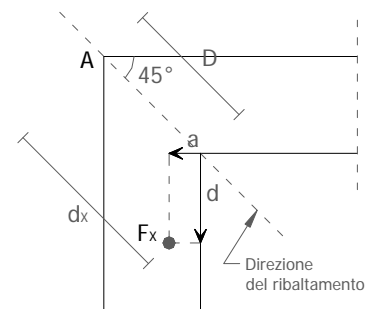
$$\alpha = \frac{E}{W y_G + F_V h_V + (P + P_{V1} + P_{V2}) h}$$

Il termine E indica la seguente espressione:

$$E = W x_G + F_V d_V + P d_P + P_{V1} d_1 + P_{V2} d_2 + (T'_1 + T'_2) h + -F'_H h_V - (P_H + P'_{H1} + P'_{H2}) h$$

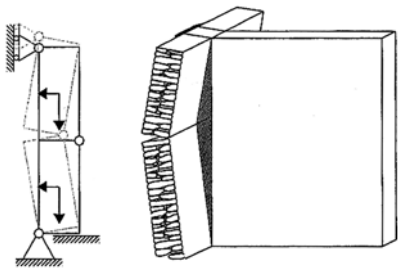
Le grandezze contraddistinte dall'apice rappresentano le proiezioni nella direzione del ribaltamento delle rispettive componenti di azioni considerate. Il braccio orizzontale  $d_x$  del generico carico verticale  $F_x$  applicato, rispetto alla cerniera in A, può essere valutato secondo la relazione:

$$d_x = D + \sqrt{2}/2(d - a)$$





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.



**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.

**Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:**

- Spanciamenti e fuori piombo della parete;
- Lesioni orizzontali e verticali;
- Sfilamento delle travi degli orizzontamenti intermedi.

**Differenti varianti del meccanismo**

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.

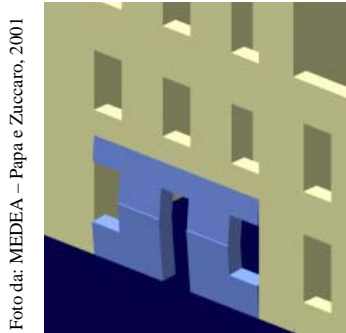
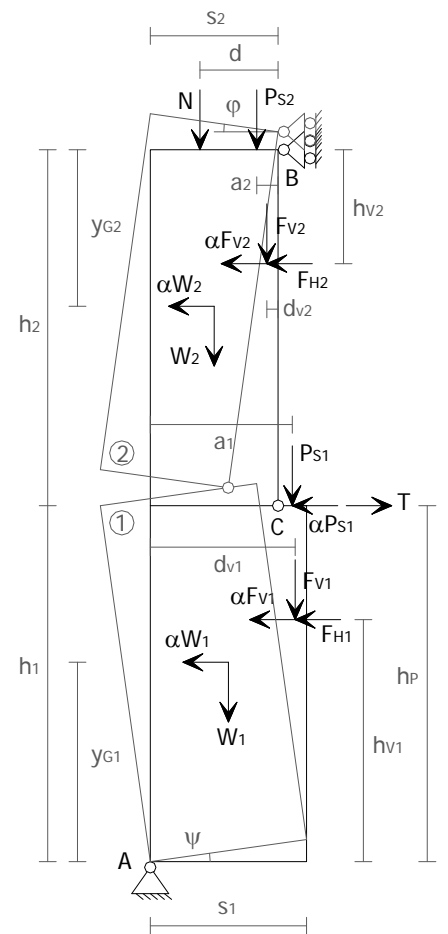
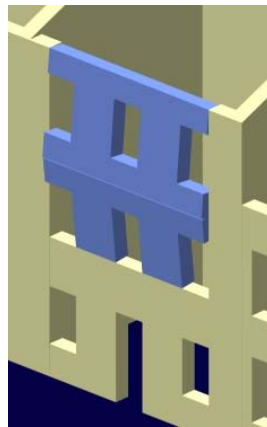


Foto da: MEDEA - Papa e Zuccaro, 2001

Figura in alto: Bollettino Ufficiale Regione Marche, 2000



Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



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:

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

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.

Equazione dei lavori virtuali:

$$\alpha[W_1 \cdot \delta_{1x} + W_2 \cdot \delta_{2x} + F_V \cdot \delta_{Vx}] + F_H \cdot \delta_{Vx} +$$

$$-W_1 \cdot \delta_{1y} - W_2 \cdot \delta_{2y} - N \cdot \delta_{Ny} - P_S \cdot \delta_{Py} - F_V \cdot \delta_{Vy} = 0$$

Moltiplicatore di collasso:

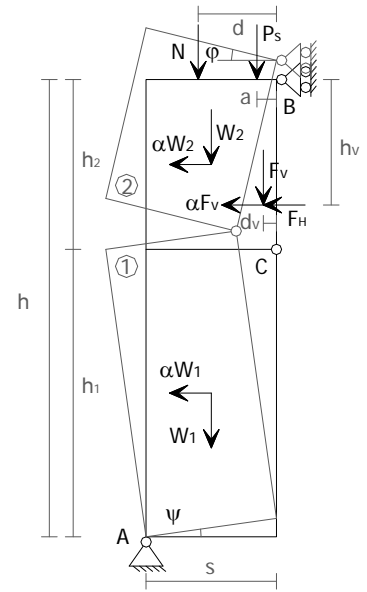
$$\alpha = 2 \frac{(\mu - 1)(N d + P_S a + F_V d_V - F_H h_V) + s(W + N + P_S + F_V)}{(\mu - 1)(W h / \mu + 2 F_V h_V)}$$

Il valore di  $\alpha$  è valutato al variare di  $\mu$ , termine che consente di individuare la posizione della cerniera cilindrica lungo l'altezza della parete:

$$h_1 = \frac{\mu - 1}{\mu} h; h_2 = \frac{h}{\mu}; W_2 = \frac{W}{\mu}; W_1 = \frac{\mu - 1}{\mu} W$$



Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



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.

Equazione dei lavori virtuali:

$$\alpha \cdot [W_1 \cdot \delta_{1x} + W_2 \cdot \delta_{2x} + F_{V1} \cdot \delta_{V1x} + F_{V2} \cdot \delta_{V2x} + F_{V3} \cdot \delta_{V3x} +$$

$$+ P_{S1} \cdot \delta_{P1x} + P_{S2} \cdot \delta_{P2x}] + F_{H1} \cdot \delta_{V1x} + F_{H2} \cdot \delta_{V2x} + F_{H3} \cdot \delta_{V3x} +$$

$$-W_1 \cdot \delta_{1y} - W_2 \cdot \delta_{2y} - F_{V1} \cdot \delta_{V1y} - F_{V2} \cdot \delta_{V2y} - F_{V3} \cdot \delta_{V3y} - N \cdot \delta_{Ny} +$$

$$-P_{S1} \cdot \delta_{P1y} - P_{S2} \cdot \delta_{P2y} - P_{S3} \cdot \delta_{P3y} - T_1 \cdot \delta_{P1x} - T_2 \cdot \delta_{P2x} = 0$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{E}{W_1 y_{G1} + F_{V1} h_{V1} + P_{S1} h_{P1} + (W_2 y_{G2} + F_{V2} h_{V2} + F_{V3} h_{V3} + P_{S2} h_{P2}) \frac{h_1}{h_2}}$$

Il termine E indica la seguente espressione:

$$E = W_1 x_{G1} + W_2 (s_2 + x_{G2} \frac{h_1}{h_2}) +$$

$$+ F_{V1} d_{V1} + (F_{V2} + F_{V3}) s_2 +$$

$$+ F_{V2} \frac{h_1}{h_2} d_{V2} + F_{V3} \frac{h_1}{h_2} d_{V3} +$$

$$+ P_{S1} a_1 + (P_{S2} + P_{S3}) (s_2 + a_2 \frac{h_1}{h_2}) +$$

$$+ N (s_2 + d \frac{h_1}{h_2}) + T_1 h_{P1} - F_{H1} h_{V1} +$$

$$- (F_{H2} h_{V2} + F_{H3} h_{V3} - T_2 h_{P2}) \frac{h_1}{h_2}$$

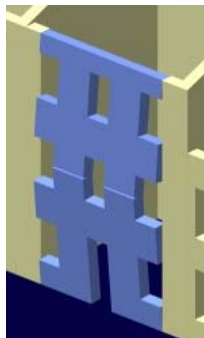
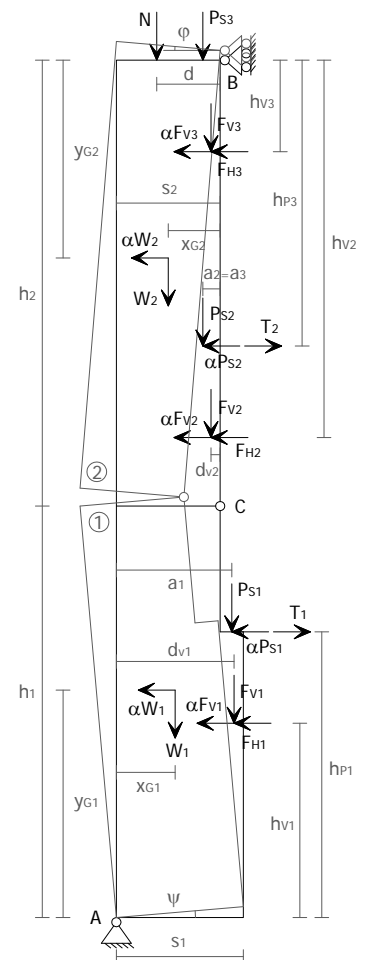


Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



Il meccanismo si manifesta con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la cortina esterna di una 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. Nel caso esaminato si considera l'interazione tra i due paramenti ipotizzando la possibilità che una piccola percentuale  $\rho$  di forze orizzontali agenti sul paramento interno, valutata in maniera empirica, possano essere trasmesse su quello esterno in relazione alle sue caratteristiche di rigidezza ed alle modalità di connessione sulla superficie in comune.

Equazione dei lavori virtuali:

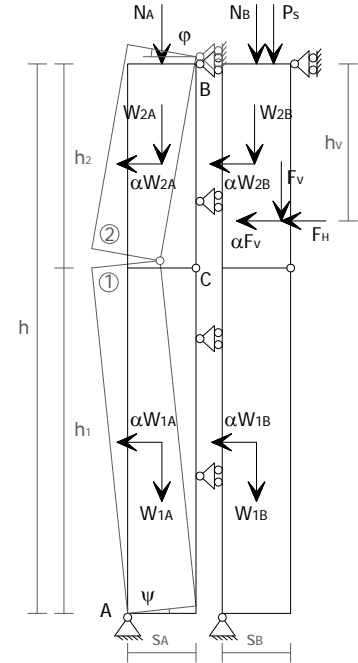
$$\alpha \cdot [W_{1A} \delta_{1Ax} + W_{2A} \delta_{2Ax} + \rho W_{1B} \delta_{1Bx} + \rho W_{2B} \delta_{2Bx} + \rho F_V \delta_{Vx}] + \rho F_H \delta_{Vx} - W_{1A} \delta_{1Ay} - W_{2A} \delta_{2Ay} - N_A \delta_{Ny} = 0$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{W_A s_A + N_A \frac{s_A}{2} (\mu + 1) - \rho F_H h_V (\mu - 1)}{\frac{h (\mu - 1)}{2 \mu} (W_A + \rho W_B) + \rho F_V h_V (\mu - 1)}$$

Il valore di  $\alpha$  è valutato al variare di  $\mu$ , termine che consente di individuare la posizione della cerniera cilindrica lungo l'altezza della parete:

$$h_1 = \frac{\mu - 1}{\mu} h; \quad h_2 = \frac{h}{\mu}; \quad W_2 = \frac{W}{\mu}; \quad W_1 = \frac{\mu - 1}{\mu} W$$



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.

Equazione dei lavori virtuali:

$$\alpha \cdot [W_{1A} \delta_{1Ax} + W_{2A} \delta_{2Ax} + \rho W_{1B} \delta_{1Bx} + \rho W_{2B} \delta_{2Bx} + \rho F_{V1} \delta_{V1x} + \rho F_{V2} \delta_{V2x} + \rho P_{S1} \delta_{Px} + \rho F_{H1} \delta_{V1x} + \rho F_{H2} \delta_{V2x} - T \delta_{Px} - W_{1A} \delta_{1Ay} - W_{2A} \delta_{2Ay} - N_A \delta_{Ny}] = 0$$

Moltiplicatore di collasso:

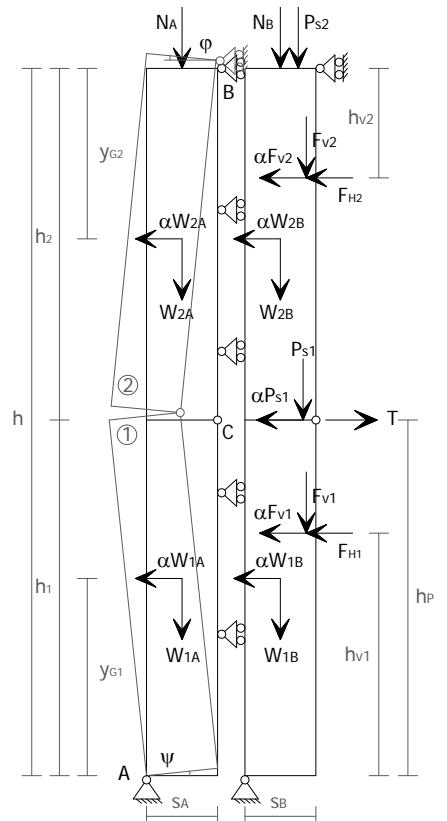
$$\alpha = \frac{W_{1A} \frac{s_A}{2} + s_A (W_{2A} + N_A) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{h_1}{h_2}\right) + T h_p - \rho F_{H1} h_{V1} - \rho F_{H2} h_{V2} \frac{h_1}{h_2}}{E}$$

Il termine E indica la seguente espressione:

$$E = (W_{1A} + \rho W_{1B}) y_{G1} + (W_{2A} + \rho W_{2B}) y_{G2} \frac{h_1}{h_2} + \rho P_{S1} h_p + \rho F_{V1} h_{V1} + \rho F_{V2} h_{V2} \frac{h_1}{h_2}$$



Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009





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.



Foto da: MEDEA – Papa e Zuccaro, 2001  
Figure: Gurreri, 1999 e BUR Marche, 2000



**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).

**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.

**Differenti varianti del meccanismo**

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.

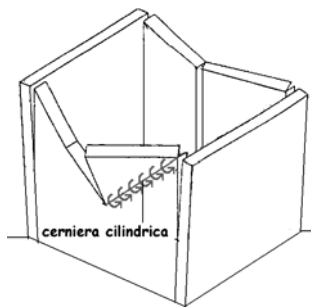
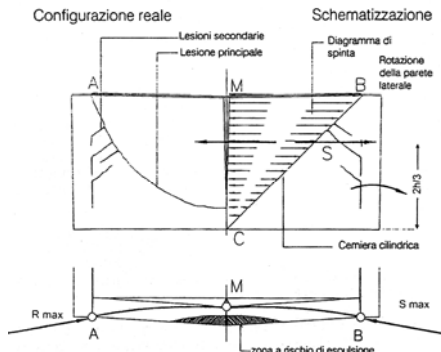


Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



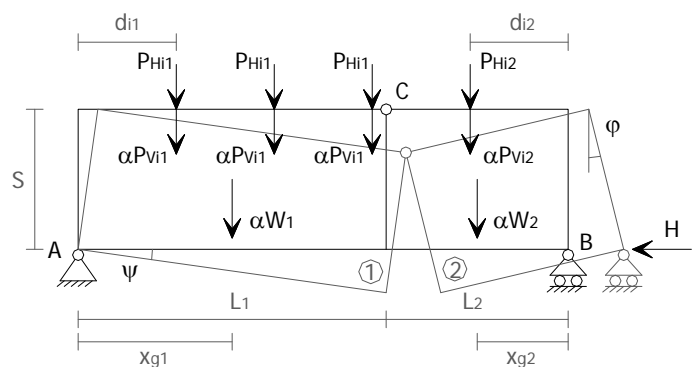
Equazione dei lavori virtuali:

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

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.





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.

Equazione di equilibrio nella sezione di mezzeria della parete:

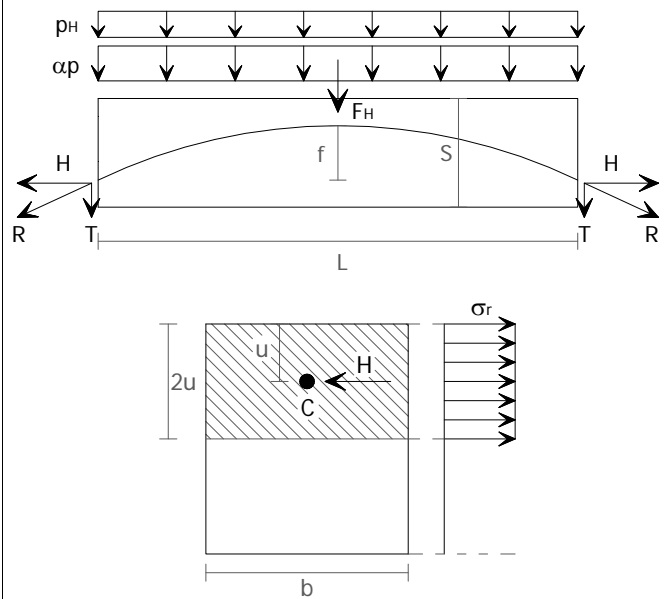
$$2\sigma_r ub = [(\alpha p + p_H)L^2 + 2F_H L] / 8f$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{16\sigma_r ub (s - 2u)}{pL^2} - \frac{p_H L + 2F_H}{pL}$$

Il valore di  $\alpha$  è valutato al variare di  $u$ , semialtezza della sezione reagente; per  $u = s/4$  si ha il massimo valore di  $\alpha$  sopportabile dalla parete:

$$\alpha_{max} = \frac{2\sigma_r s^2 b}{pL^2} - \frac{p_H L + 2F_H}{pL}$$



Il meccanismo si manifesta con l'espulsione di materiale costituente la cortina esterna della zona sommitale della parete e col distacco in essa di corpi cuneiformi accompagnato dalla formazione di cerniere cilindriche oblique e verticali per azioni fuori dal piano. In assenza di confinamento il moltiplicatore è calcolato ignorando l'interazione tra i due paramenti ed ipotizzando un cinematismo che li coinvolge entrambi. Osservando che il meccanismo interessa spesso la sola cortina esterna è sufficiente utilizzare le stesse espressioni di  $\alpha$  valide nel caso di parete monolitica ma riferite, in questo caso, al solo paramento esterno. In presenza di confinamento il moltiplicatore di collasso è invece calcolabile fissando una quota delle azioni che il paramento interno trasferisce a quello esterno, tenendo presenti le difficoltà di un inquadramento rigoroso del fenomeno.

Moltiplicatore di collasso:

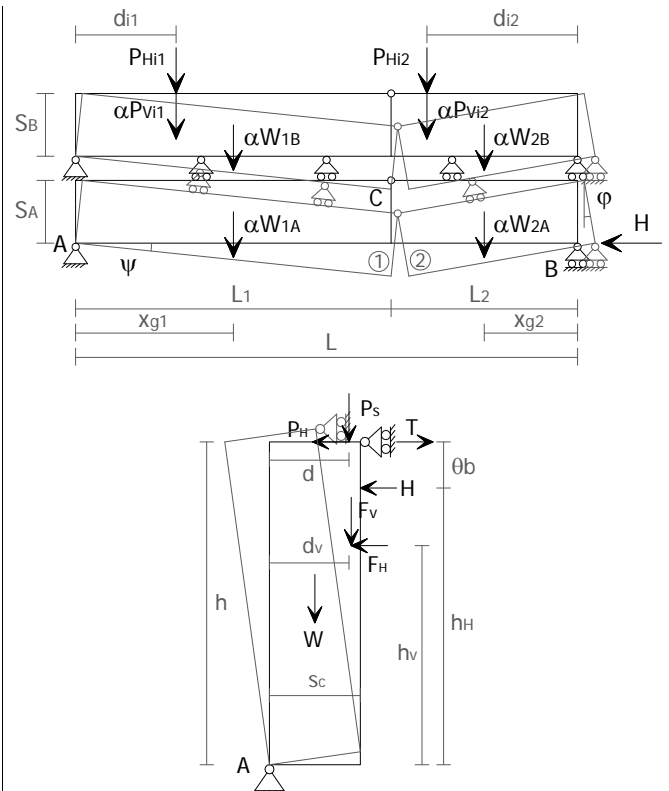
$$\alpha = \frac{H s_A (1 + \frac{L_1}{L_2}) - \sum_i P_{Hi1} d_{i1} - \sum_i P_{Hi2} \frac{L_1}{L_2} d_{i2}}{E}$$

Il termine E indica la seguente espressione:

$$E = (W_{1A} + W_{1B}) x_{G1} + (W_{2A} + W_{2B}) \frac{L_1}{L_2} x_{G2} + \sum_i P_{Vi1} d_{i1} + \sum_i P_{Vi2} \frac{L_1}{L_2} d_{i2}$$

Il termine H, reazione alla spinta dovuta all'effetto arco orizzontale nello spessore della parete, può essere stimato considerando le condizioni di equilibrio limite al ribaltamento delle pareti di controvento, secondo la seguente espressione:

$$H = \frac{1}{h_H} \left( W \frac{s_c}{2} + F_v d_v + P_s d + T h - F_H h_v - P_H h \right)$$



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. Il cinematismo è analizzato considerando il problema simmetrico rispetto alla verticale passante per il colmo della parete del timpano ed ipotizzando che i due macroelementi possano ruotare ciascuno attorno ad una delle cerniere cilindriche oblique e reciprocamente entrambe rispetto ad un punto di contatto (punto C); nel contempo si ammette che essi subiscano scorrimenti verso l'alto lungo le suddette cerniere inclinate. La geometria dei corpi è definita in relazione all'angolo di inclinazione  $\beta$  delle cerniere oblique rispetto all'orizzontale. Si osserva a tale riguardo che quanto più l'angolo  $\beta$  è piccolo tanto più il meccanismo di sfondamento della parete del timpano può essere assimilato ad un meccanismo di ribaltamento semplice attorno ad una cerniera cilindrica orizzontale alla sua base; in corrispondenza di  $\beta = 0$  l'espressione formulata per il calcolo del moltiplicatore di collasso descrive proprio le condizioni di ribaltamento semplice del timpano.



Foto da: MEDEA - Papa e Zuccaro, 2001

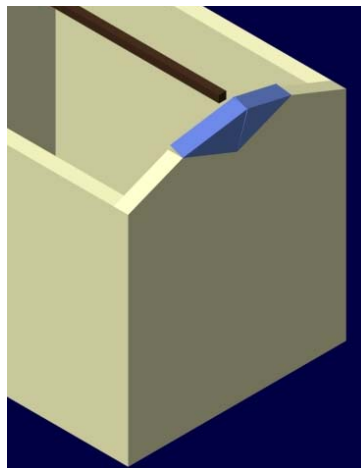
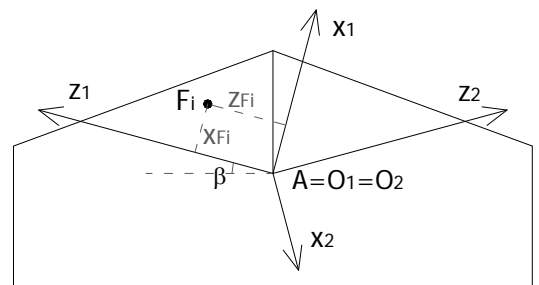
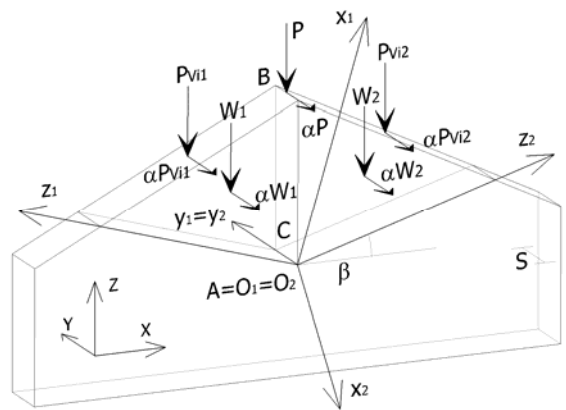
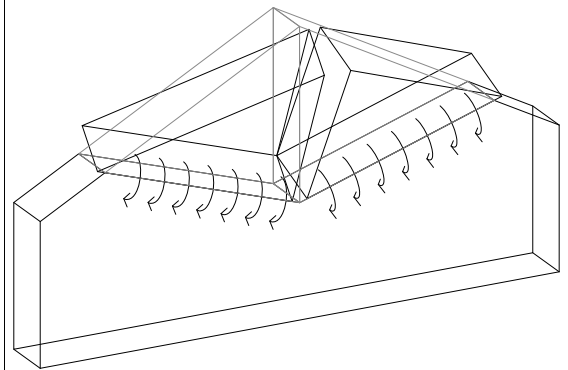


Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del. Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009



Equazione dei lavori virtuali:

$$\alpha \left[ W_1 \delta_{1Y} + W_2 \delta_{2Y} + P \delta_{PY} + \sum_{i,j} P_{vij} \delta_{pvijY} \right] =$$

$$= W_1 \delta_{1Z} + W_2 \delta_{2Z} + P \delta_{PZ} + \sum_{i,j} P_{vij} \delta_{pvijZ}$$

Moltiplicatore di collasso:

$$\alpha = \frac{(W_1 + W_2) \left( \frac{s}{2} \cos \beta + w \right) + P (d_p \cos \beta + w) + \sum_{i,j} P_{vij} (d_{ij} \cos \beta + w)}{W_1 x_{G1} + W_2 x_{G2} + P x_p + \sum_{i,j} P_{vij} x_{pvij}}$$

Nella precedente  $w = s \tan \beta \sin \beta$ ; inoltre le grandezze indicate con  $x_{Fi}$  ( $x_{Gi}$ ,  $x_p$  e  $x_{pvij}$ ) rappresentano le distanze, misurate lungo l'asse locale  $x_i$ , dei punti di applicazione di ciascuna delle forze  $F_i$  considerate rispetto all'origine del relativo sistema di riferimento (punto A di figura).