

**Dott. Ing. Giovanni Cangi**

Tel/Fax 0758550881

E-Mail: [ingcangi@tiscalinet.it](mailto:ingcangi@tiscalinet.it)

## **V Convegno Nazionale ARCo – Castello di Baia (Napoli) 4-5 Giugno 2004.**

\* \* \*

### **MIGLIORAMENTO SISMICO QUANTIFICATO E CRITERI DI ANALISI STRUTTURALE ESEMPI APPLICATIVI**

Giovanni Cangi

Nella normativa nazionale il miglioramento sismico degli edifici esistenti in muratura portante, ha una valenza puramente propositiva ed indirizza verso scelte progettuali supportate da analisi qualitative, a differenza dell'adeguamento, che invece richiede verifiche numeriche tese a dimostrare la capacità delle strutture di resistere alle azioni sismiche di progetto.

La soglia di passaggio fra miglioramento e adeguamento non è definita con esattezza; le due tipologie d'intervento si distinguono essenzialmente per le modifiche che producono sul comportamento globale, per cui la scelta è affidata alle valutazioni del progettista.

L'adeguamento sismico comporta modifiche radicali nell'assetto strutturale e viene praticato soprattutto nell'edilizia ordinaria, per la quale sono possibili maggiori trasformazioni. Al contrario, per l'edilizia monumentale è consuetudine far ricadere gli interventi nella categoria del miglioramento, perché previsto per legge, suggerito dal "Comitato nazionale per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico" ed ampiamente giustificato da esigenze di tutela e conservazione.

La legge va interpretata nel senso che gli interventi strutturali su edifici monumentali, spinti oltre la soglia del miglioramento sismico, possono stravolgere la configurazione statica e quindi le stesse caratteristiche costruttive originali.

Nella categoria del miglioramento rientrano tradizionalmente gli interventi rivolti a singoli elementi strutturali, come la sostituzione delle coperture o dei solai di piano, che danno la possibilità di realizzare connessioni in grado di ridurre la vulnerabilità sismica globale. Se però si va ad intaccare l'assetto distributivo delle aperture è facile ricade nell'ambito dell'adeguamento, con tutti gli obblighi che ne derivano.

Nell'esperienza della ricostruzione in Umbria seguita al sisma del 1997 è stato adottato un criterio che prevede l'esecuzione di verifiche sismiche anche nei casi di miglioramento, allo scopo di dimostrare e quantificare i benefici conseguibili ed indirizzare le scelte progettuali verso un razionale utilizzo delle risorse; un approccio ripreso in parte dall'Ordinanza 20 Marzo 2003 n. 3274 e che pertanto va assumendo valenza normativa.

Nel caso della ricostruzione post-sismica in Umbria-Marche non si è trattato di un miglioramento sismico secondo le prescrizioni normative, quanto di un adeguamento in tono minore, nel senso

che il legislatore ha imposto il rispetto di un moltiplicatore sismico di progetto ridotto al 65% del valore di riferimento. Il miglioramento sismico quantificato consiste invece nel dimostrare il conseguimento di una maggiore resistenza globale rispetto alla situazione originaria, senza porre limiti definiti.

L'opera di miglioramento deve certamente rispettare quelle raccomandazioni qualitative proprie della cultura costruttiva antisismica, finalizzate ad assicurare un buon comportamento d'insieme dell'organismo edilizio, tuttavia le nuove indicazioni normative indirizzano ad un riscontro quantitativo sul livello di sicurezza conseguito.

In questo caso il problema si sposta verso la definizione di appropriati modelli di analisi, per i quali ci si affida a programmi d'uso comune, anche se non costituiscono l'unica e sicura strada percorribile per arrivare ad una esatta quantificazione della risposta sismica. Al contrario, gran parte dei modelli di calcolo forniscono risultati compromessi dall'assunzione di ipotesi preliminari necessarie ma quasi mai rispettate, che allontanano da una realistica previsione del comportamento statico.

Di fronte a queste incertezze si corre il rischio concreto di favorire gli interventi strutturali più aderenti alle esigenze operative dei programmi di calcolo, piuttosto che al reale comportamento degli edifici storici. Questo si è già verificato in passato dopo i terremoti del Friuli e dell'Irpinia, quando si è perseguito il raggiungimento di configurazioni scatolari poste a fondamento degli stessi modelli di analisi.

La realizzazione di cordoli in breccia e l'inserimento di solai in latero-cemento costituisce l'espressione più concreta di questa tendenza, contrastata da una cresciuta sensibilità generale verso le problematiche del recupero edilizio, cui ha contribuito pure la diffusione della manualistica di settore, con la proposta di un modo di operare più attento e rispettoso della tradizione costruttiva.

L'orientamento attuale prevede la ricerca di modelli strutturali attraverso il recupero di quell'approccio pratico ed intuitivo tipico dei mastri muratori del passato, capaci di trarre dall'osservazione diretta e dall'esperienza i suggerimenti utili per una continua opera di miglioramento delle tecniche costruttive e quindi del comportamento strutturale; metodi empirici, che hanno segnato l'evoluzione della tradizione costruttiva in zona sismica, a volte impiegati per la messa a punto di adeguate tecniche di rinforzo e prevenzione dimostrate pienamente efficaci.

Fra i modelli strutturali che rispondono a questa impostazione e permettono di comprendere il reale comportamento meccanico delle murature, il più adatto è certamente il *metodo dei cinematismi di collasso*, che ipotizza la formazione di catene cinematiche, caratterizzate dal distacco di solidi murari rigidi e dalla formazione di cerniere nei punti di contatto. Ciò presuppone una capacità dei muri tutta da verificare, ovvero, di arrivare al collasso senza disgregarsi, per cui si comprende l'importanza di tutti gli interventi preventivi sulle pareti volti a conferire una consistenza monolitica.

Questo metodo si adatta facilmente alla modellazione meccanica di porzioni elementari, mentre presenta limiti oggettivi nell'analisi di organismi edilizi complessi, tuttavia è bene ricordare il parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che esclude la necessità di studiare l'intero edificio murario come se si trattasse di un'unica scatola pluriconnessa; l'analisi sismica globale prevista dalle norme va intesa nel senso che la globalità dell'edificio deve essere passata in rassegna per individuare i possibili meccanismi di dissesto che l'azione sismica può provocare in

ogni sua parte. E' possibile, pertanto, suddividere la compagine muraria in porzioni elementari da analizzare separatamente con metodi semplificati.

Questo tipo di analisi a maggior ragione si presta alla quantificazione del miglioramento sismico, che per definizione stessa non deve stravolgere il comportamento d'insieme e può riguardare singoli elementi o porzioni strutturali.

Il miglioramento quantificato richiede quindi delle verifiche sismiche nelle condizioni pre e post-intervento, per confrontare i moltiplicatori di collasso corrispondenti ai cinematismi già manifestati dalla struttura in esame o ipotizzabili con ragionevole probabilità.

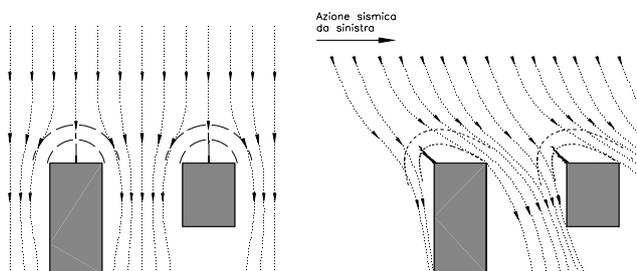
Il metodo dei cinematismi di collasso pone comunque grossi problemi nell'individuazione dei meccanismi di danno più pericolosi fra tutti quelli prevedibili sulla base dell'esperienza e dell'osservazione diretta.

Un contributo metodologico per la soluzione del problema mediante la costruzione di semplici modelli di analisi viene offerto dallo studio dei meccanismi elementari. E' opportuno tuttavia evitare una rigida suddivisione in base al primo e secondo modo di danno, certamente utile a livello didattico, ma poco realistica. Infatti non è poi così frequente trovare pareti prive di connessioni, mentre sono più probabili i meccanismi composti, quelli cioè, che coinvolgono contemporaneamente le pareti sollecitate nel piano e quelle disposte in senso ortogonale alla direzione del sisma.

Nell'analisi strutturale di questi cinematismi si possono distinguere due possibili situazioni estreme: la prima è quella in cui il quadro fessurativo permette di riconoscere con chiarezza i cinematismi strutturali in atto; l'altra, molto più complessa, è caratterizzata dall'assenza di qualsiasi segno indicativo dei potenziali meccanismi di danno. In questo caso è necessario definire dei criteri oggettivi per la costruzione delle catene cinematiche.

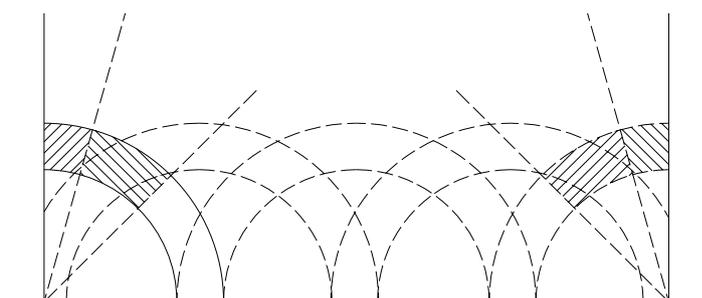
A tal fine è utile analizzare attentamente il comportamento meccanico dei muri sollecitati nel piano, che presenta aspetti molto complessi. Questi sono decifrabili, in parte, attraverso l'analisi dei flussi di compressione, dai quali derivano i processi di formazione delle catene cinematiche.

In particolare si osserva che i meccanismi resistenti si instaurano in condizioni statiche e sismiche attraverso la formazione spontanea di archi di scarico, condizionata dalla presenza di eventuali aperture e dalle dimensioni compressive delle pareti.



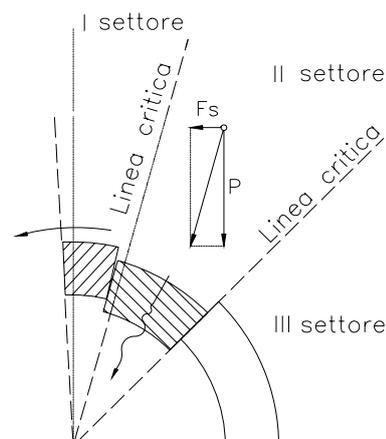
Diffusione dei flussi di compressione nei pannelli forati  
In condizioni statiche e sismiche

Il metodo proposto per l'analisi di pareti sollecitate nel piano, finalizzato ad una successiva verifica numerica e già utilizzato per la soluzione di problemi reali, prende spunto da queste osservazioni e consiste nello schematizzare le pareti attraverso un'ideale successione di archi, secondo una conformazione adeguata alle dimensioni ed alla geometria dei pannelli murari pieni o forati.



Modello della parete ad archi virtuali

Meccanismo di rottura delle testate di muro secondo l'analogia dell'arco

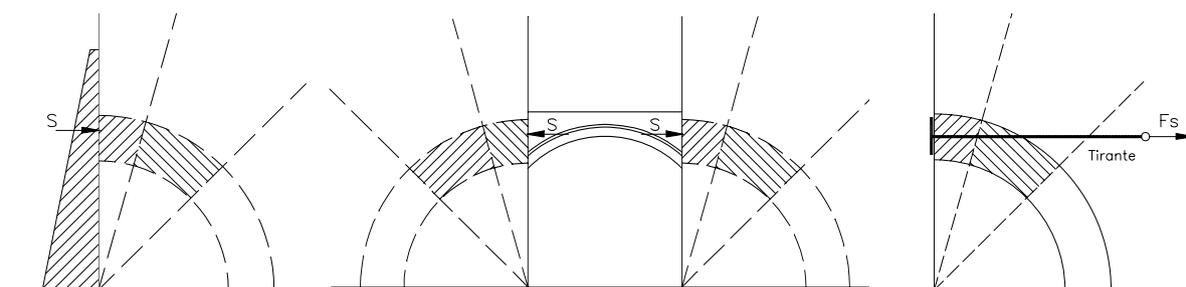


Il modello ad “*archi virtuali*”, così definito, non è da mettere in relazione alla reale disposizione dei filari, ma al comportamento cinematico delle pareti, riconducibile alla meccanica degli archi; un modello che indirizza, inoltre, verso la definizione di appropriati interventi di consolidamento.

Alcuni cinematismi elementari trovano una chiave interpretativa in questo modello, che permette di assimilare le estremità di parete a dei semiarchi privi della necessaria forza equilibrante, pertanto soggetti a fenomeni di dissesto che non interessano le parti centrali.

Ogni testata di muro tende a dividersi in tre settori, equivalenti a conci di arco, per effetto delle azioni sismiche complanari, caratterizzati rispettivamente da un moto di rotazione (il primo) e di scorrimento (il secondo), mentre il terzo si mantiene costantemente in equilibrio.

Questa visione cinematica intuitiva prende spunto dalla teoria di Coulomb sulla spinta delle terre, per una ovvia similitudine con il comportamento meccanismo delle murature e consente, peraltro, una lettura critica di alcune delle più diffuse tecniche antisismiche premoderne che si basano sull'impiego degli speroni, degli archi di sbadacchio e dalle catene. La funzione di questi presidi antisismici è quella di sostituirsi agli elementi di chiave nella funzione equilibrante dei semiarchi d'estremità, a volte anche con soluzioni combinate.



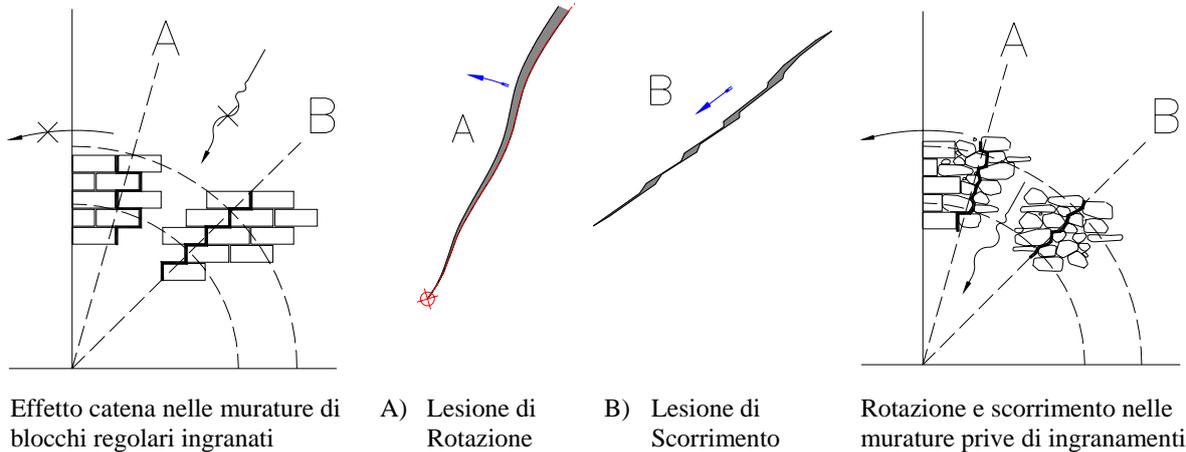
Speroni

Archi di sbadacchio

Tiranti di parete

Simili quadri fessurativi sono piuttosto frequenti ed evidenziano una chiara e tipica tendenza al dissesto delle murature tradizionali; le principali differenze fra i vari tipi di muratura emergono dall'inclinazione della prima lesione, che individua un parametro meccanico necessario per la verifica numerica, costituito dall'angolo critico caratteristico  $\alpha$ .

I meccanismi che determinano la rotazione del primo settore e lo scorrimento del secondo vengono normalmente contrastati dalla muratura stessa, quando le caratteristiche costruttive e meccaniche lo consentono, ovvero, quando l'ingranamento dei blocchi assicura quell'effetto catena che non si riscontra quasi mai nelle murature incoerenti, prive di ortostati o di connessioni a cavallo delle linee critiche.



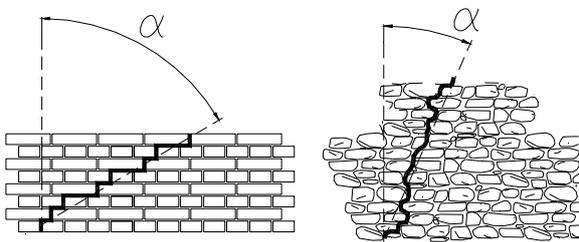
Effetto catena nelle murature di blocchi regolari ingranati

A) Lesione di Rotazione

B) Lesione di Scorrimento

Rotazione e scorrimento nelle murature prive di ingranamenti

L'inclinazione del primo settore costituisce una caratteristica propria di ciascun tipo di muratura, riconoscibile da un allineamento di giunti privo di ingranamenti e rilevabile attraverso una semplice analisi superficiale del paramento murario.

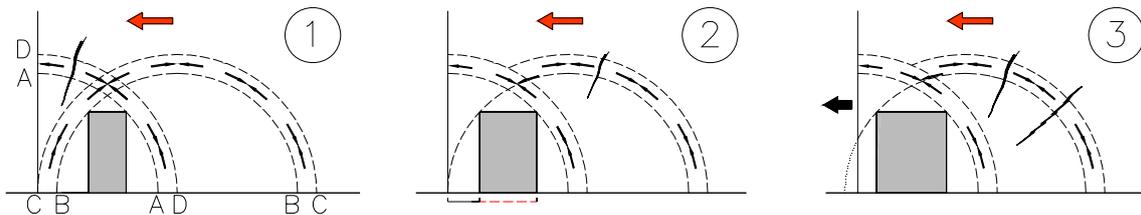


Angoli critici di murature in mattoni pieni e murature di pietrame sbozzato

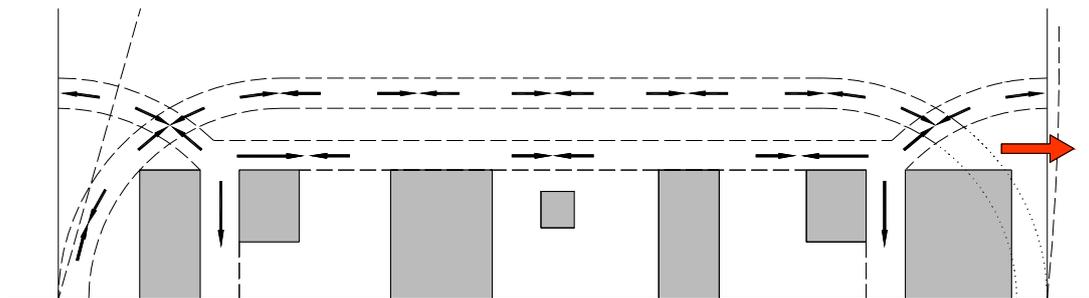
Sotto questo aspetto le murature di elementi quadrati si distinguono per un angolo critico molto ampio rispetto a quello dei muri ordinari realizzati con materiale di piccola pezzatura.

Il modello ad archi virtuali offre interessanti suggerimenti per la costruzione delle catene cinematiche anche nelle pareti dove la presenza di aperture condiziona la risposta sismica a seconda delle dimensioni (larghezza ed altezza) e della posizione dei vani.

Nell'edilizia seriale, ad esempio, la successione di aperture in facciata non costituisce un problema se la configurazione delle testate garantisce la chiusura degli archi ideali; in caso contrario l'assenza di un contrasto efficace può determinare la perdita di equilibrio della porzione di estremità.



Risposta sismica di pareti sollecitate nel piano influenzata dalle aperture posta in prossimità del cantonale.

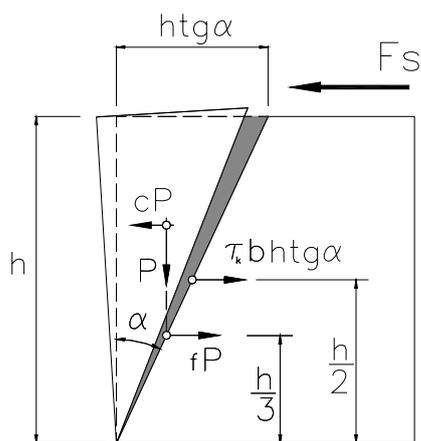


Meccanismo resistente nelle facciate di edifici a schiera con aperture disposte in successione

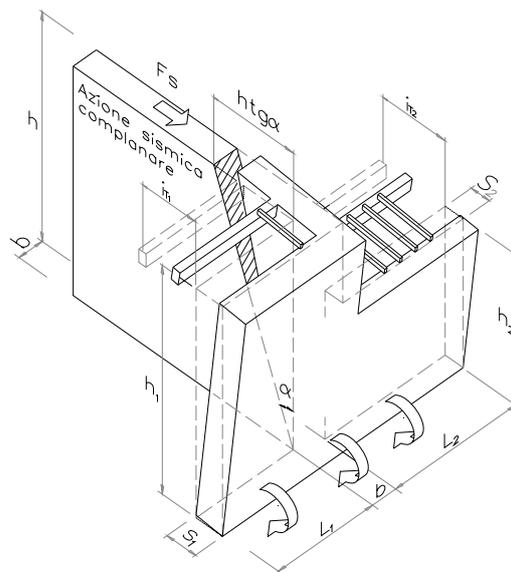
Dallo schema qualitativo all'analisi numerica il passo è breve, se si tiene conto dei principali parametri di resistenza che contrastano l'innesco e l'evoluzione dei cinematismi osservati.

Una semplice trattazione analitica del problema presuppone l'individuazione dei fattori principali che impediscono la rotazione del cuneo, costituiti dalla forma della porzione di parete distaccata, che funge da contrappeso, dall'attrito sviluppato lungo la superficie di fessurazione e dalla resistenza a taglio esercitata nella fase d'innesco lungo la stessa superficie di distacco.

Un altro importante fattore di resistenza è rappresentato dall'effetto catena dovuto all'ingranamento dei blocchi, che però ha effetto in un settore angolare limitato alla linea critica.



Meccanismo di danno elementare e fattori di resistenza:  
coesione - attrito - forma



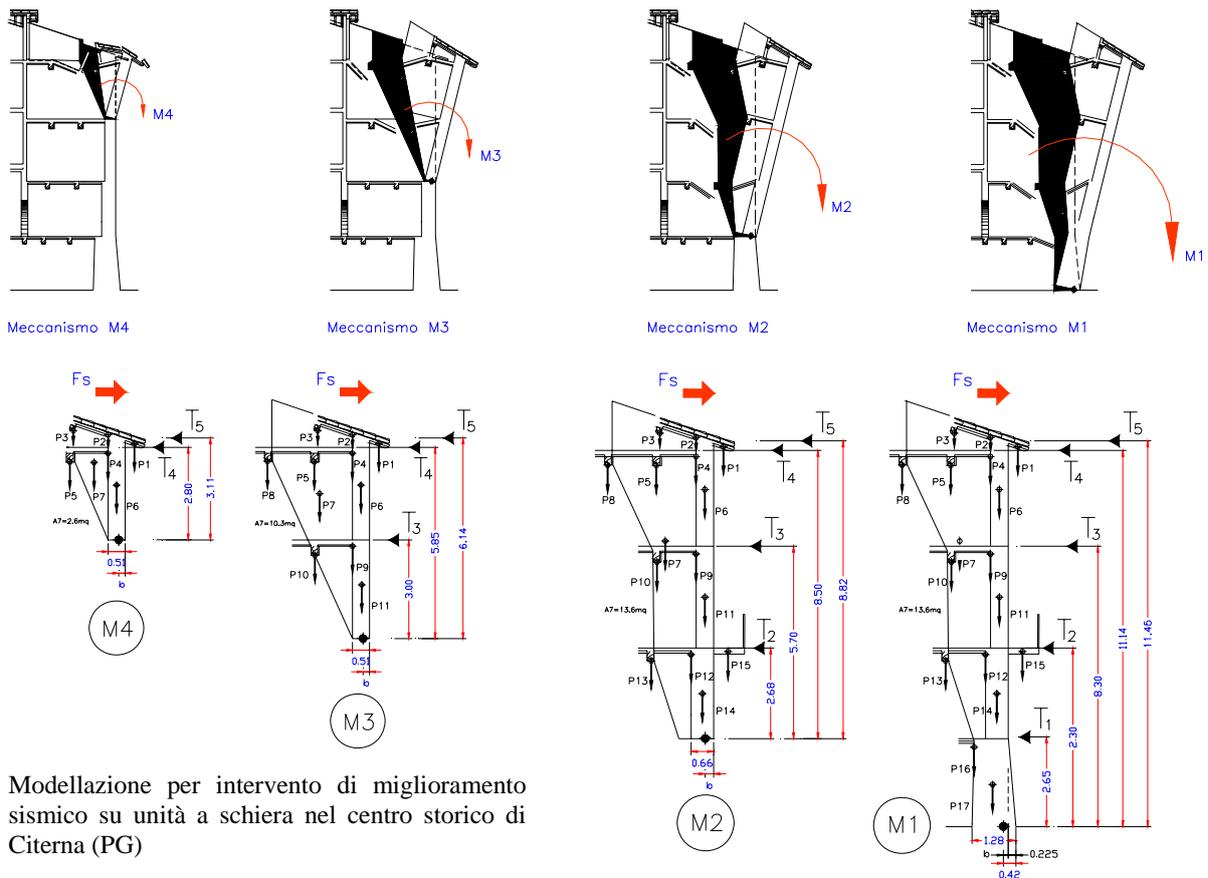
Nella fase d'innesco intervengono la coesione ( $\tau_k$ ) e l'attrito ( $f$ ) a contrastare il ribaltamento, ma alla comparsa della prima fessura viene a mancare il contributo della coesione ( $\tau_k=0$ ). L'attrito ( $f$ ) continua comunque a svolgere un ruolo attivo fino al distacco dei solidi, quando sopravviene il fattore di forma a contrastare da solo la fase di collasso.

Si comprende così l'importanza dei tradizionali interventi a scuci-cuci per il ripristino della continuità muraria e quindi per il recupero della coesione e della resistenza d'attrito.

La verifica sismica consiste nel calcolo del moltiplicatore  $c_0$  dei carichi orizzontali che porta ad una perdita di equilibrio del sistema; questo va confrontato con il valore di riferimento  $c_{rif}$ , attraverso il rapporto fra momento spingente  $M_s$  dovuto all'azione sismica e momento resistente  $M_r$  fornito dalla struttura.

La sovrapposizione dei diagrammi del momento in funzione dell'ampiezza angolare, consente di apprezzare le cause d'innesco del cinematismo, la sua naturale evoluzione ed infine le ragioni del collasso della struttura.

Questo modello elementare, con opportuni sviluppi e precisazioni, consente delle interessanti applicazioni pratiche. A titolo esemplificativo vengono illustrate delle verifiche effettuate su alcuni tipi di strutture; il primo esempio applicativo si riferisce all'analisi di una porzione di facciata, con relativo muro di controvento, di un edificio a schiera in configurazione di pendio situato nel centro storico di Citerna (PG).



Modellazione per intervento di miglioramento sismico su unità a schiera nel centro storico di Citerna (PG)

La parete di valle segue un meccanismo di ribaltamento testimoniato dal quadro fessurativo rilevato e dalla serie storica di danni documentati per edifici di simili caratteristiche. Lo schema dei cinematismi prende in considerazione quattro possibili situazioni di collasso, caratterizzate dalla formazione di cerniere plastiche alle quote dei solai.

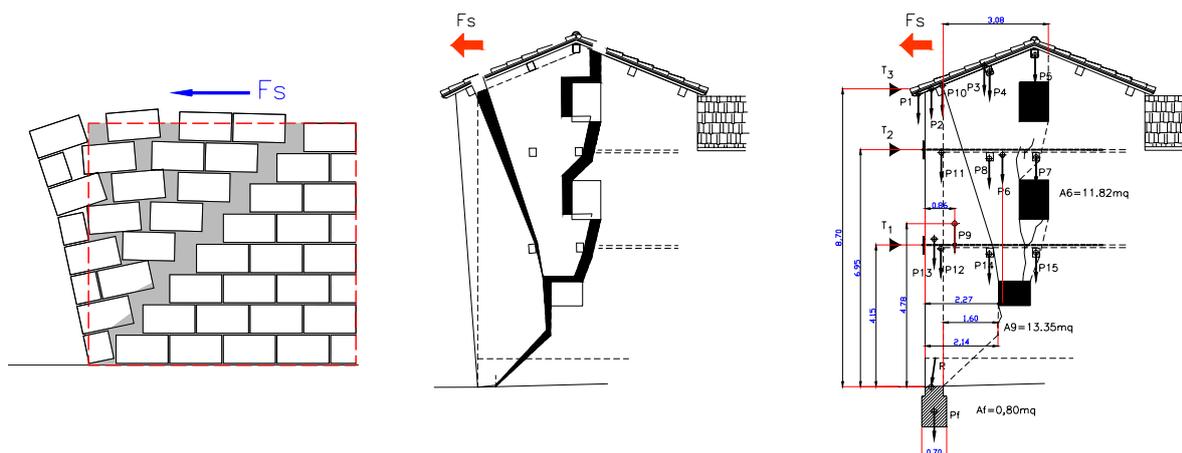
La costruzione grafica consente la definizione di un modello statico congruente con la configurazione dei cinematismi e permette di calcolare il tiro delle catene a ciascun livello necessario per contrastarne l'attivazione.

Secondo il criterio di verifica a rottura i tiranti di piano devono essere dimensionati per ricondurre la risultante dei carichi sismici entro il filo esterno della base d'appoggio; per un dimensionamento ottimale delle catene è opportuno procedere dall'alto verso il basso.

In questo tipo di struttura il meccanismo più probabile e pericoloso fra i quattro esaminati è quello associato al ribaltamento dell'intera facciata (M1), ma è sufficiente disporre un tirante al primo livello per scongiurarne l'innescio.

L'edificio illustrato nell'esempio successivo mostra una variante del comportamento strutturale piuttosto frequente e pericolosa per l'evoluzione del cinematismo, determinata dalla disgregazione del cuneo che viene trascinato nel moto di ribaltamento.

Il fenomeno è preoccupante perché implica una riduzione del momento resistente mentre permane l'effetto destabilizzante prodotto dalla forza sismica.



Fenomeno di disgregazione del cuneo di distacco

Cinematismo di collasso ed intervento di consolidamento del muro d'angolo di un edificio isolato caratterizzato da fenomeni di disgregazione del cuneo di distacco.

E' comunque possibile tenere conto di questo fattore che contribuisce a rendere ancora più precario l'equilibrio d'insieme.

La scheda utilizzata per la verifica sismica richiede l'assegnazione dei dati geometrici della catena cinematica desunti dal modello grafico e dei parametri meccanici relativi alla muratura ed al terreno, oltre all'entità dei carichi agenti, necessari per la stima delle sollecitazioni esterne e della risposta fornita dalla struttura.

Condizioni di carico verticale:			
W1 (Massimo sforzo normale):		$W1=1.4G+1.5(Qes+0.7neve)$	
W2 (Massima eccentricità):		$W2=1.0G+0.0(Qes+0.7neve)$	
Parametri per il calcolo delle azioni sismiche:			
Coeff.te intensità sismica	S =	9	
Coeff.te di struttura	$\beta$ =	4	Forza sismica:
Coeff.te di fondazione	$\varepsilon$ =	1	$F_s = c_{rif} \cdot R \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot I \cdot W$
Coeff.te di risposta	R =	1	$F_s = c_{rif} \cdot k \cdot W$
Coeff.te di protezione	I =	1	
$c_{rif} = (S-2)/100 =$	0,07	$k = R \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot I =$	4

Parametri meccanici per il calcolo di verifica

Ai fini del dimensionamento delle catene si farà riferimento alla seguente relazione:			
$T = f_y \cdot A / \gamma_m$	dove:	$f_y =$	Tensione di snervamento dell'acciaio
		A =	Sezione utile del tirante o armature cordolo
		$\gamma_m =$	Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale (1.15)
Si adotta acciaio Fe360 con	$f_y =$	3.150	daN/cm <sup>2</sup>
Caratteristiche della muratura:			
Muratura di pietrame bene organizzato	$P_S =$	2.000	daN/m <sup>2</sup>
Parametri di resistenza:	$f_k =$	7.000	daN/m <sup>2</sup> (valore cautelativo)
	$\mu =$	0,35	Coefficiente d'attrito
	$\sigma_k =$	200.000	daN/m <sup>2</sup>

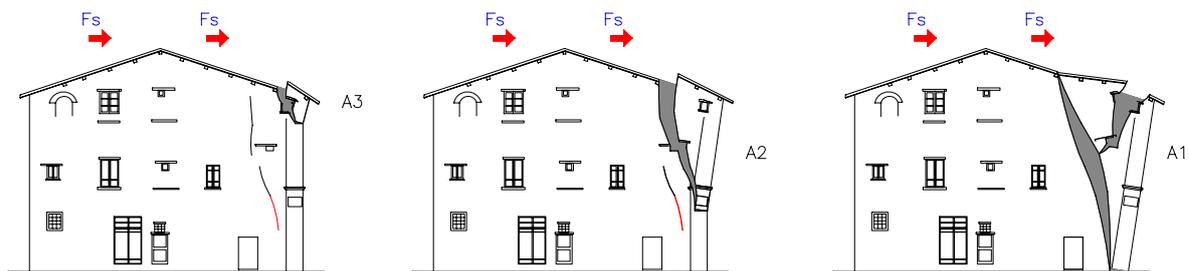
<b>Stima dei moltiplicatori di collasso pre-intervento:</b>			
1^a Fase: Innesco			
Parametri di resistenza: Coesione e attrito	$M^*r = M^*rc + M^*ra =$	9.713	
Moltiplicatore d'innescio:	$c_{in} = M^*r / (kMs) =$	0,009	Non verificato
2^a Fase: Fessurazione			
Parametri di resistenza: Attrito o forma	$M^*r = M^*ra =$	5.233	
Moltiplicatore di fessurazione:	$c_{in,f} = M^*r / (kMs) =$	0,064	Non verificato
3^a Fase: Collasso			
Parametri di resistenza: Forma	$M^*r = M^*rf =$	72.165	
Moltiplicatore di collasso:	$c_0 = M^*r / (kMs) =$	0,064	Non verificato

<b>Stima dei moltiplicatori di collasso in presenza di tiranti:</b>			
1^a Fase: Innesco			
Parametri di resistenza: Coesione e attrito	$M^*r = M^*rc + M^*ra + M^*t =$	81.588	
Moltiplicatore d'innescio:	$c_{in} = M^*r / (kMs) =$	0,072	Verificato
2^a Fase: Fessurazione			
Parametri di resistenza: Attrito o forma	$M^*r = M^*ra + M^*t =$	77.108	
Moltiplicatore di fessurazione:	$c_{in,f} = M^*r / (kMs) =$	0,127	Verificato
3^a Fase: Collasso			
Parametri di resistenza: Forma	$M^*r = M^*rf + M^*t =$	144.040	
Moltiplicatore di collasso:	$c_{in} = M^*r / (kMs) =$	0,127	Verificato
	$c_{in} > c_0$		

Moltiplicatori d'innescio, fessurazione e collasso nelle configurazioni pre e post-intervento

La scheda impostata per il calcolo permette di ricavare i moltiplicatori dei carichi verticali in grado di attivare il cinematismo, di produrre la fessurazione della parete ed infine il crollo; l'esperienza dimostra che il moltiplicatore di collasso può essere inferiore a quello d'innescio, ovvero, che certi meccanismi che si attivano con difficoltà, possono evolvere rapidamente al collasso non appena si verifica lo strappo della parete. Questo significa che se una prima scossa violenta è in grado di lesionare il muro, quelle immediatamente successive, anche se smorzate, possono completare l'opera distruttiva.

Il fenomeno di disgregazione della porzione di parete trascinata nel cinematismo può essere dovuto alla scarsa qualità della muratura oppure alle eccessive dimensioni del cuneo, o ancora ad un'anomala distribuzione delle aperture che favorisce la formazione di fessure secondarie.



Monastero di Santa Chiara delle Murate – Città di Castello (PG): configurazioni di collasso della parete di facciata con trascinarsi del muro d'angolo

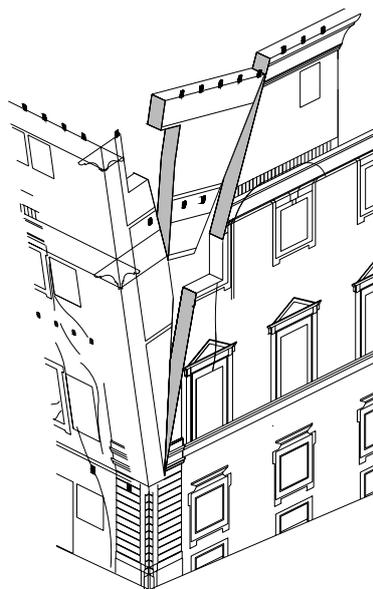
La configurazione del cantonale del Monastero di Santa Chiara delle Murate a Città di Castello fa ipotizzare un'evoluzione del danno fortemente condizionata dalla presenza di due piccole finestre sfalsate, poste in posizione d'angolo e in grado di compromettere la stabilità della facciata.

Un caso più complesso da interpretare, per le notevoli dimensioni del solido murario e per l'entità delle masse trascinate nel moto di ribaltamento, è quello di Palazzo Buonaccorsi a Macerata, edificio danneggiato dalla crisi sismica iniziata il 26 settembre 1997.

I cinematismi M1 e M2, costruiti attraverso una lettura critica del quadro fessurativo sulla base del modello ad archi virtuali, hanno un'elevata probabilità di manifestare dissesti secondari e forme di collasso composto.

Nonostante l'analisi si presenti piuttosto difficoltosa, gli interventi previsti per la creazione di connessioni ai piani, nonché a livello sommitale attraverso la realizzazione di cordoli in muratura armata, risultano comunque efficaci e generalmente risolutivi per la stabilità della porzione di struttura in esame.

Il cinematismo di danno individuato sul fronte principale trova corrispondenza nella facciata laterale quando investita da azioni complanari, per cui i criteri d'intervento adottati si dimostrano adeguati per molteplici configurazioni di danno.



Palazzo Buonaccorsi (Macerata)  
Meccanismo d'angolo M2 - lato destro

In ciascuno degli esempi illustrati emerge un aspetto importante dell'analisi strutturale da mettere in relazione alla riduzione degli stati tensionali in fondazione.

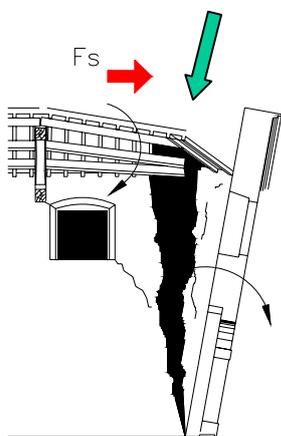
I cinematismi di ribaltamento, infatti, determinano una forte concentrazione dei carichi sulla base d'appoggio, evitabile attraverso il miglioramento delle connessioni ai piani e con l'introduzione di tiranti in grado di trattenere il cuneo nella posizione di riposo.

Questo argomento richiede degli approfondimenti, tuttavia si comprende come gli interventi di miglioramento sismico sulla struttura d'elevazione possono produrre effetti positivi indiretti anche sul terreno d'imposta.

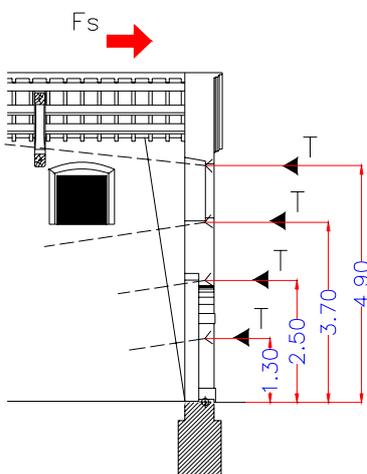
I cinematismi di danno illustrati evidenziano un comportamento tipico degli edifici tradizionali che conservano il carattere costruttivo originario, per cui emerge un modo di danneggiarsi che presenta elementi di similitudine per tutti gli edifici.

Un esempio interessante emerge dal confronto fra il quadro fessurativo della chiesa di S. Stefano di Bonsciano a Città di Castello, che evidenzia il modo classico di danneggiamento della facciata e lo stesso cinematismo riprodotto in modo efficace da Benozzo Gozzoli nel ciclo pittorico di S. Francesco a Montefalco. L'artista ha ricostruito con cura un meccanismo di danno realistico, che aveva sicuramente osservato in qualche struttura danneggiata da eventi calamitosi. Questo conferma la validità di questo metodo di approccio intuitivo basato soprattutto sull'osservazione diretta.

Il fenomeno osservato è quello tipico del semiarco di estremità, che nel caso specifico trova soluzione attraverso la realizzazione di perfori armati ed una scrupolosa opera di scuci-cuci, necessaria per ridare continuità alle parti disunte e per riattivare i naturali meccanismi resistenti.



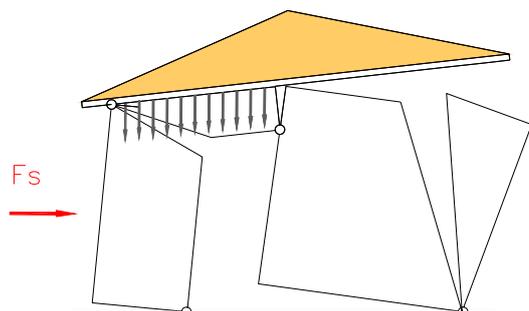
Santo Stefano di Bonsciano – Città di Castello (PG)  
Distacco della facciata ed intervento di consolidamento.



Particolare tratto dal ciclo pittorico di S. Francesco - Benozzo Gozzoli Montefalco (PG)

Al contrario, gli edifici alterati nella loro primitiva configurazione strutturale, mostrano delle anomalie nel comportamento che impediscono la formazione dei meccanismi elementari, a favore di altri non sempre prevedibili e spesso più pericolosi.

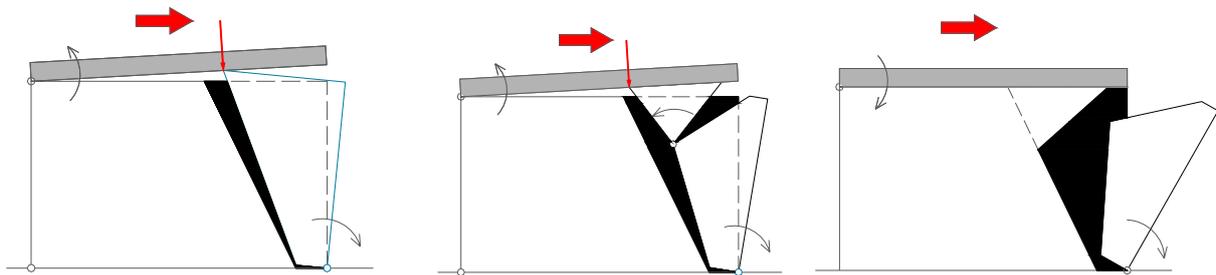
Un caso frequente è quello delle coperture in cemento armato che contrastano il cinetismo di collasso osservati in precedenza, con un'evoluzione che porta la parete sottovento a scaricarsi completamente, mentre il cuneo che funge da contrappeso si disgrega a causa di un effetto flessionale secondario.



Rotazione del tetto rigido



Risposta sismica anomala in presenza di coperture rigide – Umbria 1997



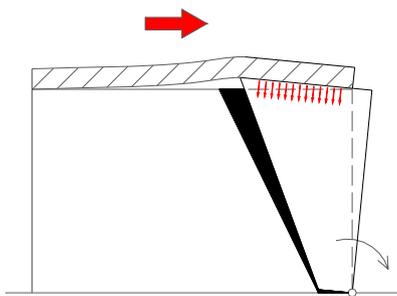
1^ fase

2^ fase

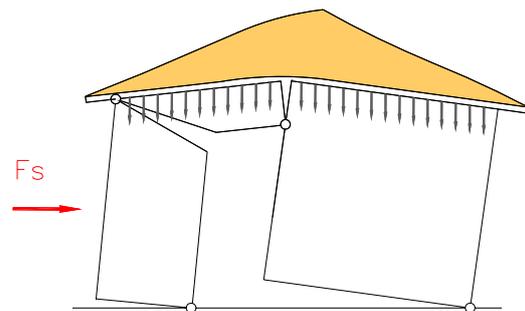
3^ fase

Variazione del cinematismo di collasso per azioni complanari in presenza di coperture rigide in cemento armato

Diverso è il comportamento dei solai deformabili e dei cordoli in muratura armata, quelli che con Francesco Giovanetti proponemmo nel Manuale del Recupero di Città di Castello, ora largamente utilizzati in Umbria nella fase di ricostruzione postsismica.

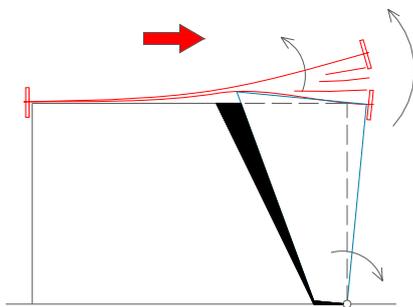


Meccanismo di rottura per azioni complanari in presenza di cordoli flessibili in muratura armata



Meccanismo di rottura per azioni complanari con tendenza all'espulsione della catene metalliche

Rispetto a questi cinematismi l'inserimento di semplici catene di coronamento, in assenza di un carico sovrastante adeguato, potrebbe risultare non altrettanto efficace.



Rischio di espulsione della catene metalliche sommitali in assenza di carichi adeguati.

Quanto illustrato vuole dimostrare che è possibile costruire modelli di analisi aderenti al reale comportamento meccanico delle murature e che consentono di effettuare verifiche sismiche semplici quanto significative; è necessario però individuare a priori i meccanismi di danno che in ciascuna struttura tendono ad attivarsi con maggiore probabilità.