CORSO DI RESTAURO
organizzato da
ARCo - Associazione per il Recupero del Costruito

DIREZIONE REGIONALE PER I BENI CULTURALI E PAESAGGISTICI DELLA LOMBARDIA

ORDINE DEGLI ARCHITETTI, PIANIFICATORI, PAESAGGISTI E CONSERVATORI DELLA PROVINCIA DI MILANO

Milano, 30 ottobre 2006 – 4 dicembre 2006

MECCANICA DELLE MURATURE E DEGLI ARCHI DI PARETE ATTRAVERSO IL METODO DEI CINEMATISMI DI COLLASSO

Elaborato tratto dal *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico*
di Giovanni Cangi – DEI Tipografia del Genio Civile di Roma, 2005

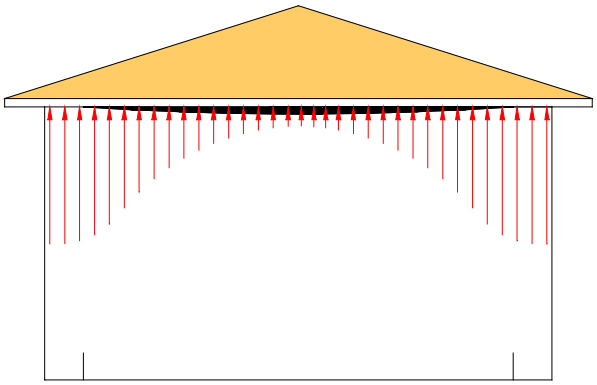
Dott. Ing. Giovanni Cangi

Premessa

Negli anni settanta e ottanta, in seguito ai disastrosi terremoti che interessarono il Friuli, la Val Nerina e poi l'Irpinia nel 1980, si presentò la necessità di intervenire con urgenza sugli edifici colpiti dagli eventi calamitosi ed in modo particolare sull'edilizia storica che risultò fortemente danneggiata. In quegli anni il patrimonio edilizio storico non aveva goduto di molte attenzioni, nel senso che dal dopoguerra l'attività edilizia era stata indirizzata all'uso dei nuovi sistemi costruttivi e del c.a. in particolare, quindi emerse l'esigenza di definire un quadro normativo per regolare l'opera di riparazione e ricostruzione degli edifici dissestati e, in una prospettiva a lungo termine, operare ai fini della prevenzione, per scongiurare il ripetersi di scenari analoghi.
L'istituzione della Protezione Civile, prima come organismo del Ministero dell'Interno, quindi come Ministero autonomo, prese origine proprio da questi tragici eventi, per organizzare i soccorsi alla popolazione colpita e per indirizzare le fasi successive.
La necessità e l'opportunità di intervenire sul patrimonio edilizio storico non fu solo conseguenza degli eventi sismici; il problema era già stato posto a vari livelli e tradotto in modo pratico nell'ambito degli strumenti urbanistici , ma certamente con i terremoti la questione del recupero edilizio si manifestò come una reale necessità.
E' opportuno ricordare che in quel periodo i corsi di studio a livello universitario non davano molto risalto ai temi del recupero edilizio, soprattutto nelle facoltà di Ingegneria, dove gli argomenti dominanti ruotavano attorno alla teoria ed alla tecnica del cemento armato.
Oggi, al contrario, in molte università si seguono corsi indirizzati allo studio del recupero strutturale ed al consolidamento degli edifici storici, sia nelle facoltà di Architettura, sia in quelle di Ingegneria.
Nel recupero edilizio l'attenzione alla "conservazione" costituisce un ulteriore fattore di qualità che è emerso di recente. Nei decenni cui si è fatto riferimento, infatti, la normativa tecnica (L. n. 64/74 - D.M. 26.01.'86 – Circ Min. LL.PP n. 21745/81, ecc…) prescriveva interventi e criteri di analisi strutturale trasferiti direttamente dalla teoria del cemento armato e poco sensibili ai principi della tutela e salvaguardia del costruito; non è un caso che i primi modelli di analisi, che costituiscono tuttora la base dei moderi programmi di calcolo per gli edifici in muratura, pretendevano di schematizzare l'edificio murario come un ideale struttura intelaiata, con i pilastri sostituiti da pannelli resistenti a taglio e le travi inglobate nei solai di piano "infinitamente rigidi".
Proprio questa costituiva una delle ipotesi più importanti, al punto tale da indirizzare l'opera di consolidamento verso la sistematica sostituzione dei solai in legno esistenti con nuovi elementi in latero-cemento. Tale operazione richiedeva l'esecuzione di strappi orizzontali nelle murature a livello di ogni piano per inserire i cordoli di collegamento in cemento armato e per costruire, infine, dei tetti molto pesanti al fine di garantire il cosiddetto "comportamento scatolare" che costituiva il modello di riferimento per l'impostazione di qualsiasi calcolo da presentare agli uffici del Genio Civile.
A distanza di tempo e con l'esperienza maturata in seguito ad altri eventi sismici si può affermare, prove alla mano, che questo modello non ha funzionato secondo le aspettative: primo perché non è servito ad interpretare correttamente la risposta degli edifici colpiti dal sisma; secondo, perché gli edifici consolidati in questo modo hanno mostrato un comportamento piuttosto anomalo, molto diverso e a volte più pericoloso di quello prevedibile nella configurazione originaria, da sempre riscontrato nelle costruzioni in muratura tradizionale non alterate.

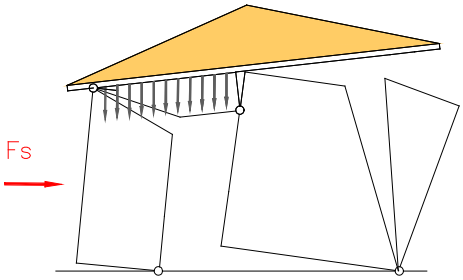
Le prove più evidenti l'ha fornite il terremoto del 1997 in Umbria e Marche, che ha interessato un territorio già colpito da un altro sisma alla fine degli anni '70 e dove si era ricostruito in modo "pesante", ovvero, secondo i criteri sopra illustrati. L'occasione, per quanto drammatica, ha costituito un banco di prova per la verifica delle tecniche di consolidamento impiegate.
Le strutture "scatolari" durante l'evento sismico hanno mostrato delle anomalie nel comportamento delle coperture rigide realizzate con cordoli sommitali in cemento armato, peraltro in conformità alle prescrizioni normative vigenti, vincolanti anche ai fini dell'ottenimento del contributo finalizzato alla riparazione del danno.

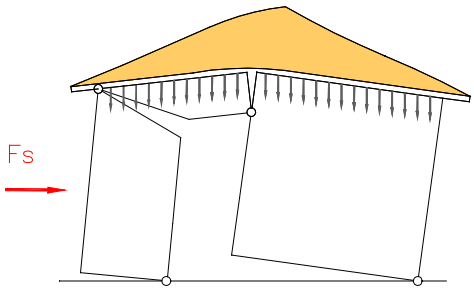
L'esperienza ha dimostrato che nella risposta sismica di questi edifici si manifestano degli effetti "secondari", capaci di modificare negativamente il comportamento statico ipotizzato.
Un primo effetto, di natura statica, è dovuto all'eccessiva rigidezza dei cordoli in c.a.. Questo è noto come *effetto trave* e porta il cordolo a scaricare delle azioni concentrate alle estremità, invece di distribuire i carichi in modo uniforme sulla muratura d'imposta.
Un altro effetto negativo emerge da una lettura cinematica delle pareti sollecitate nel piano; la rotazione della parete tende a produrre il distacco di una parte della copertura dai muri d'appoggio, che pertanto non possono usufruire dell'effetto stabilizzante dei carichi sovrastanti.



Effetto trave dei cordoli in cemento armato.

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

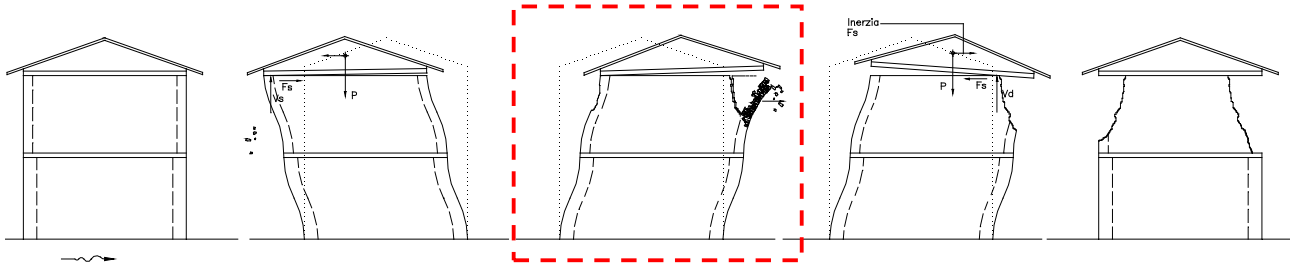




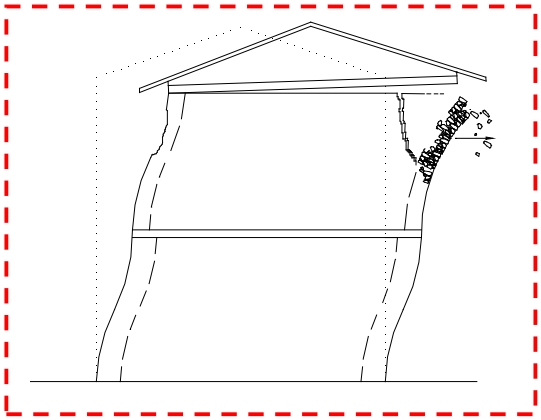
Fenomeno di rotazione del tetto rigido indotto dal cinematismo della parete sollecitata da azioni complanari.

Risposta cinematica delle parete in presenza di tetti deformabili

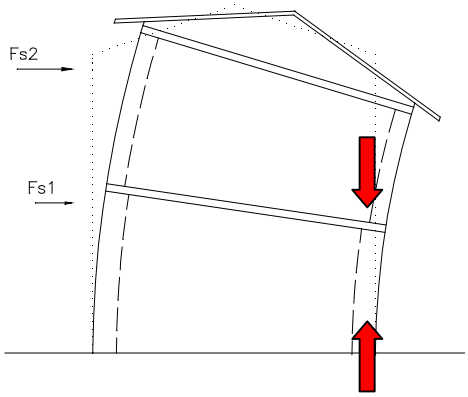
Un terzo effetto, non meno preoccupante, è associato al comportamento dinamico delle coperture rigide. Il tetto rigido viene trascinato nel moto oscillatorio per effetto del taglio trasferito dai muri sottostanti a livello del piano d'imposta.
Per inerzia la copertura tende a sollevarsi e quindi a scaricare la parete sottovento nel momento stesso in cui questa viene sollecitata dal pericoloso "colpo di frusta" che la fa ribaltare.



Ricostruzione delle fasi dinamiche dell'azione sismica e del colpo di frusta sulla parete sottovento.



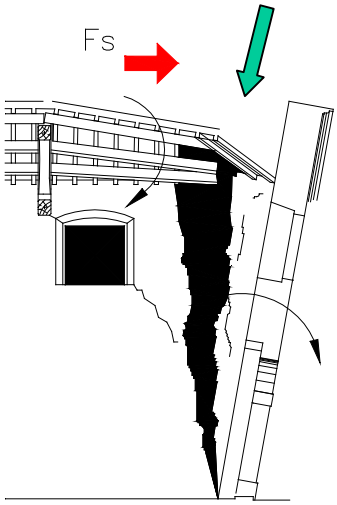
Colpo di frusta sulla parete sommitale sottovento.



Modello statico

L'analisi statica equivalente non permette di apprezzare questo pericoloso fenomeno e addirittura invita a considerare un maggiore stato di compressione della parete sottovento a causa del momento indotto dall'azione sismica. Questo effetto in realtà è ritardato e la compressione della parete di valle si verifica quando il muro è già collassato. Anche in questo caso le coperture deformabili sono capaci di contrastare meglio l'innesco del fenomeno.
L'introduzione del cemento armato e delle tecniche proprie del cantiere moderno nel recupero dell'edilizia storica, abbinati ad una progressiva perdita della capacità operativa e delle conoscenze proprie di una tradizione costruttiva tramandata per lungo tempo dai mastri muratori, ha determinato una trasformazione radicale del tessuto edilizio minore, quello non tutelato dalle Soprintendenze ed in moti casi non salvaguardato neanche dagli altri enti di controllo.

Per secoli si è costruito allo stesso modo e soprattutto si è intervenuti per riparare e consolidare gli edifici esistenti utilizzando le medesime tecniche impiegate nella costruzione; anche il modo di danneggiarsi delle strutture pertanto si è conservato invariato nel tempo.
A riguardo è interessante mostrare la corrispondenza del quadro fessurativo manifestato da una vecchia chiesa danneggiata dal terremoto del 1997 in Umbria con quello dipinto alla fine del '400 da Benozzo Gozzoli nel ciclo pittorico di S. Francesco a Montefalco (PG). L'artista ha riprodotto con cura un meccanismo di danno che sicuramente aveva osservato dal vero in qualche struttura anch'essa danneggiata dal terremoto, per inserirlo nell'immagine simbolica del Santo che sostiene la chiesa.

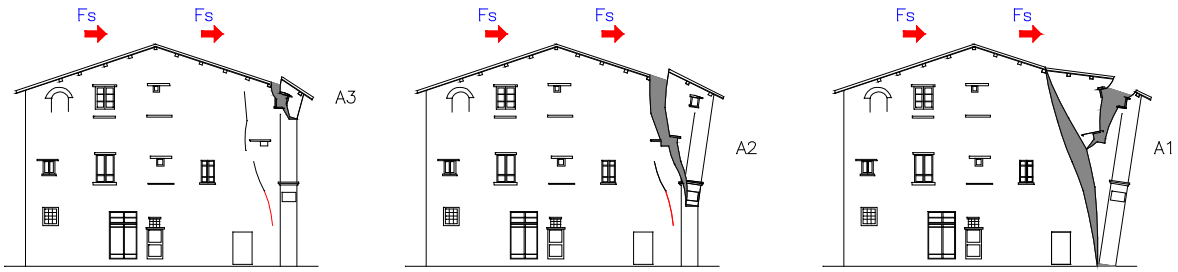


Santo Stefano di Bonsciano – Città di Castello (PG).
Cinematismo classico di ribaltamento della facciata.

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

Negli anni '80, c'era pure chi affrontava questi problemi cercando di correggere la tendenza ad eseguire interventi pesanti con azioni propositive in controtendenza. Quest'azione "pionieristica" si concretizzò con la redazione dei primi manuali del recupero, sui quali si soffermerà certamente Francesco Giovanetti.
In questa sede merita ricordare il Manuale del Recupero di Roma, il primo, curato dallo stesso Giovanetti, ed il Prontuario del Restauro di Pesaro di Francesco Doglioni.
A queste importanti esperienze si aggiunse poi il Manuale del Recupero di Città di Castello, centro Altotiberino situato a ridosso dell'Appennino in una zona ad alta sismicità. Quella fu l'occasione per affrontare i temi del recupero strutturale conservativo, partendo dalla conoscenza delle tecniche costruttive e degli elementi caratteristici dell'edilizia storica locale, tipici di tutta l'Italia centrale.
Il contrasto fra le tecniche d'intervento proposte nei manuali e le indicazioni della normativa sismica apparvero subito evidenti.
Gli Uffici del Genio Civile che all'inizio giudicarono inaccettabili le proposte d'intervento suggerite dai nuovi manuali, assunsero posizioni sempre più aperte al confronto. Su questo aspetto va riconosciuto il contributo, sempre maggiore, fornito dalle Università nella formazione dei giovani tecnici, Ingegneri ed Architetti, specializzati nel settore del recupero e sensibili alle esigenze della conservazione.

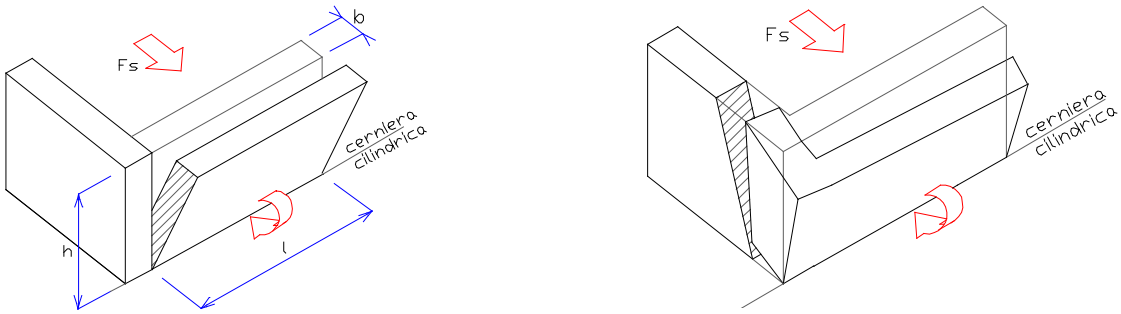
Indicazioni innovative arrivarono anche a livello normativo attraverso il parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - I Sezione, che nell'adunanza del 27.02.92 - prot. n. 29, si espresse in merito ai *"Quesiti sulle norme tecniche da applicare in caso di progettazione di opere in muratura*", affermando che non è quasi mai realistico studiare l'intero edificio come un'unica scatola pluriconnessa; parere che è in chiaro contrasto con l'impostazione dei principali programmi di calcolo.
In questa valutazione il C.S.LL.PP. seguì un criterio aderente alla concezione strutturale dell'edilizia premoderna, realizzata mediante assemblaggio di elementi strutturali connessi fra loro attraverso vincoli monolateri. L'analisi sismica *globale* prevista dalle norme andava intesa nel senso che *la globalità* dell'edificio doveva essere passata in rassegna per individuare i possibili meccanismi di dissesto che l'azione sismica può provocare in ogni sua parte.
Questo criterio è ancora valido, anzi, proprio in questa fase di definizione del nuovo quadro normativo tale approccio trova un pieno riconoscimento, per cui in questa relazione si intende fornire degli elementi utili per la trattazione qualitativa del problema attraverso un approccio alla meccanica delle murature, che potrà essere approfondito attraverso le indicazioni contenute nel Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico.
Per effettuare un'analisi aderente al reale comportamento delle strutture in muratura tradizionale è necessario recuperare quell'approccio pratico ed intuitivo che caratterizzava l'opera dei mastri muratori del passato e che ha scandito l'evoluzione delle tecniche costruttive antisismiche premoderne.
Fra i modelli di analisi che rispondono meglio a questa impostazione, si distingue il *metodo dei cinematismi di collasso*, che ipotizza la formazione di catene cinematiche caratterizzate dal distacco di solidi murari assimilabili a corpi rigidi e dalla formazione di cerniere nei punti di contatto.
L'applicazione di questo metodo presuppone una capacità dei muri di arrivare al collasso senza disgregarsi; meccanismi di questo tipo consentono una facile modellazione matematica ed una previsione attendibile della loro evoluzione.
Il metodo dei cinematismi di collasso pone comunque dei problemi nell'individuazione dei meccanismi di danno più pericolosi fra tutti quelli prevedibili sulla base dell'esperienza e dell'osservazione diretta.
Nella pratica si distinguono due situazioni tipiche: la prima quando il quadro fessurativo permette di riconoscere con chiarezza i cinematismi strutturali in atto; l'altra, più complessa, si presenta quando la struttura non manifesta segni di dissesto indicativi dei potenziali meccanismi attivabili.
Per quest'ultimo caso è necessario definire dei criteri oggettivi e delle procedure da seguire per la costruzione delle catene cinematiche.



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

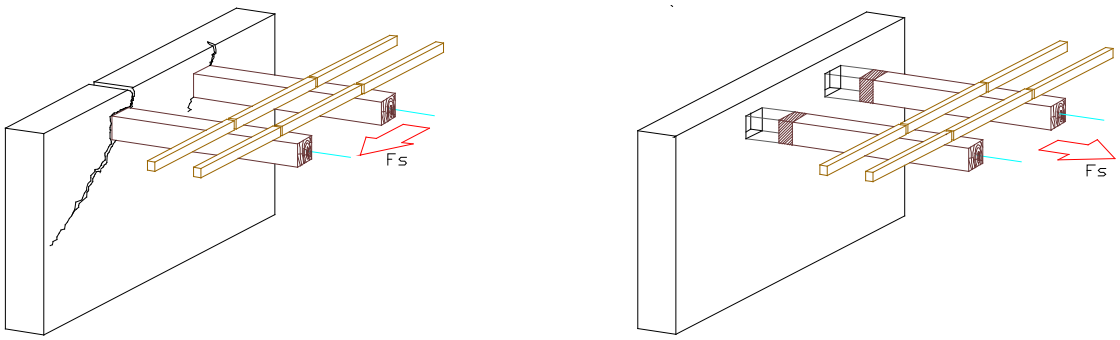
Comportamento di pareti isolate e meccanismi di danno elementari.

Un contributo metodologico alla soluzione del problema della costruzione di semplici modelli di analisi viene offerto dallo studio dei meccanismi elementari.
Gli schemi illustrati in figura costituiscono degli esempi fra i più intuitivi e significativi, la cui comprensione fornisce una chiave interpretativa per configurazioni anche molto più complesse.
Il primo, in particolare, mostra il collasso di un muro d'angolo caratterizzato dalla completa carenza di collegamenti strutturali fra le due pareti, per cui ciascun muro si comporta come se fosse un elemento isolato.
Il secondo meccanismo è apparentemente simile al primo, perché è caratterizzato dalla formazione della stessa cerniera di base, con la differenza che il muro ribalta trascinandosi dietro una porzione cuneiforme della parete ortogonale sollecitata nel piano. Questa rottura presuppone dei collegamenti efficaci fra le pareti, per cui lo strappo può avvenire solo a monte del cantonale.
L'attivazione di questo secondo cinematismo richiede un'azione sismica più elevata, pertanto è meno probabile del primo.



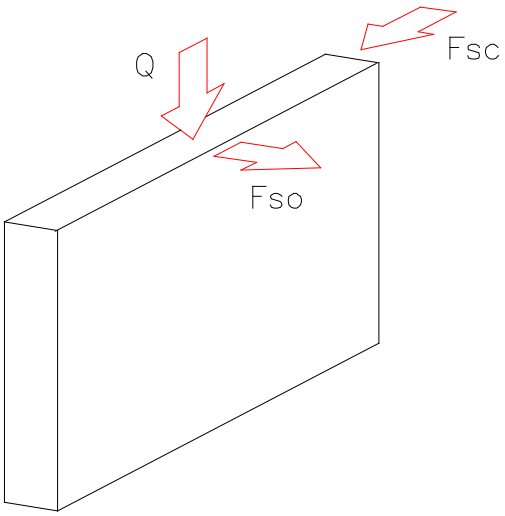
Meccanismi di danno elementari di pareti libere o connesse

La conoscenza della sola geometria strutturale non è sufficiente per fare previsioni realistiche sul tipo di risposta attesa in questi casi.
Sono molteplici i fattori in grado di influenzare l'innesco del cinematismo: la qualità delle connessioni fra i due muri ortogonali, il tipo di muratura e le caratteristiche di posa in opera dei materiali, nonché gli spessori, l'altezza e tutti i parametri geometrici condizionano la risposta globale della struttura e ne determinano il modo di danneggiamento.
La presenza di orizzontamenti capaci di interagire con le pareti nell'assorbimento e trasferimento delle forze sismiche rende il sistema ancora più difficile da analizzare, ma potenzialmente più stabile, a condizione che si possano sfruttare le possibilità che offre ciascun elemento strutturale per migliorare la qualità delle connessioni.



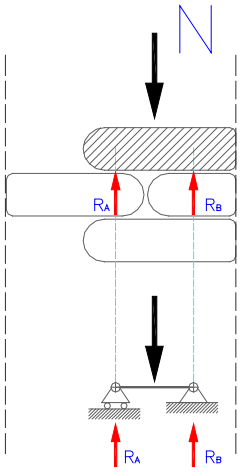
Influenza degli orizzontamenti lignei orditi in direzione ortogonale o parallela alla direzione di propagazione del sisma

Per comprendere meglio questi fenomeni è necessario approfondire l'esame di una parete singola ed isolata, ricordando che le murature sono elementi strutturali concepiti per contrastare principalmente le azioni statiche verticali, mentre le azioni sismiche orizzontali producono degli stati tensionali anomali rispetto a quelli ordinari, per i quali non tutte le murature sono efficacemente predisposte.
Un giudizio di qualità espresso in relazione alla sola capacità di risposta ai carichi verticali non è pertanto sufficiente.
La valutazione della qualità muraria deve derivare da un giudizio complessivo e tenere conto della capacità della parete di contrastare efficacemente qualsiasi tipo di azione verticale e orizzontale.

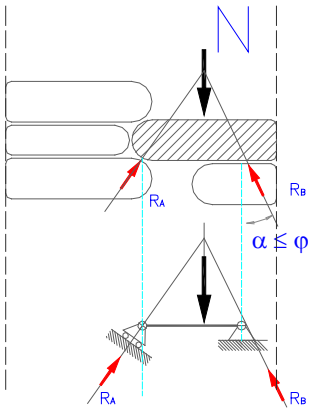


Configurazione parete sottoposta a:
Q – Carichi statici verticali
Fsc – Forza sismica complanare
Fso – Forza sismica ortogonale

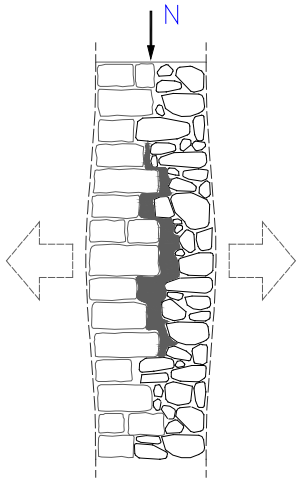
Agli inizi dell'Ottocento Nicola Cavalieri San-Bertolo, nelle sue *Istituzioni di Architettura Statica ed Idraulica*, riepilogò i principali aspetti della qualità muraria in una limpida definizione del sistema muro, ovvero "*[…] un ammasso artefatto di pietre, ordinate in modo, che ne risulti un solido di figura e dimensioni determinate, atto a conservare la propria forma sia per la forza di qualche materia glutinosa, cui si da il nome di malta o cemento, la quale avviluppi le pietre, e le tenga saldamente aderenti l'una all'altra; sia in grazia dell'equilibrio, in cui si trovi ciascuna pietra per la semplice sua posizione; sia finalmente perché le pietre si trovino tutte studiosamente disposte in guisa tale, che quelle forze, per cui tenderebbe ciascuna di esse a spostarsi, s'impediscano e si elidano nel vicendevole conflitto*".
Questa definizione richiama l'attenzione su aspetti generalmente trascurati, ovvero sul rispetto di quella "*regola dell'arte*" che sembra aver perso il tradizionale significato, nel senso che non fa più parte della comune cultura costruttiva.
In effetti la costruzione di murature nuove realizzate con blocchi squadrati non richiede abilità, mentre, al contrario, l'uso di pietrame sbozzato secondo le tecniche tradizionali metterebbe in difficoltà pure i muratori più esperti per la difficoltà di creare connessioni trasversali efficaci fra i paramenti.
Basta vedere che oggi si ricostruiscono murature di tipo tradizione più per un piacere estetico che non per reali esigenze statiche, con il risultato di paramenti che assomigliano più ad un pavimento che non ad una muratura. In queste murature la tendenza al distacco dei paramenti è associata alla forma delle pietre ed al modo in cui queste vengono disposte.



Condizioni di equilibrio di elementi lapidei ingranati fra i due paramenti



Effetti spingenti nella muratura costituita da elementi non bene ingranati

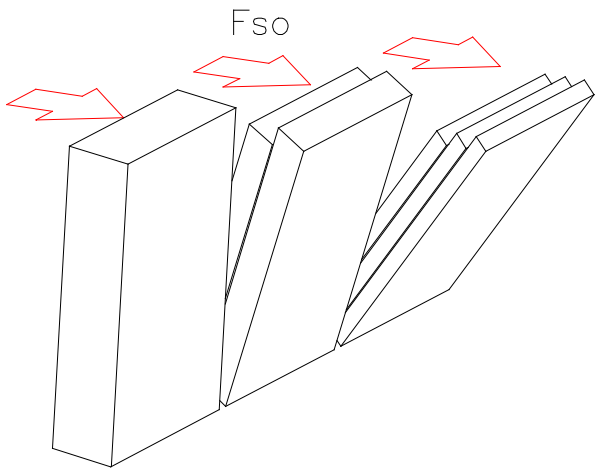


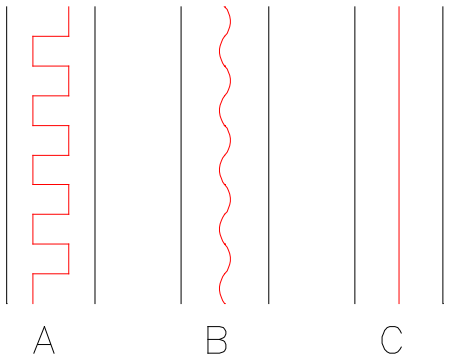
Distacco dei paramenti associato a fenomeno di instabilità

Se il contatto fra le pietre avviene senza un efficace ingranamento possono insorgere forze inclinate che rendono la muratura "*internamente spingente*" e favoriscono il distacco dei paramenti. Al contrario, una buona sovrapposizione dei blocchi garantisce l'equilibrio attraverso il trasferimento di forze verticali.
L'innesco di componenti spingenti produce effetti negativi sul comportamento monolitico della parete che costituisce l'obiettivo da raggiungere nella costruzione di qualsiasi muratura e che ne costituisce il più importante indicatore di qualità.

Risposta alle azioni sismiche ortogonali.

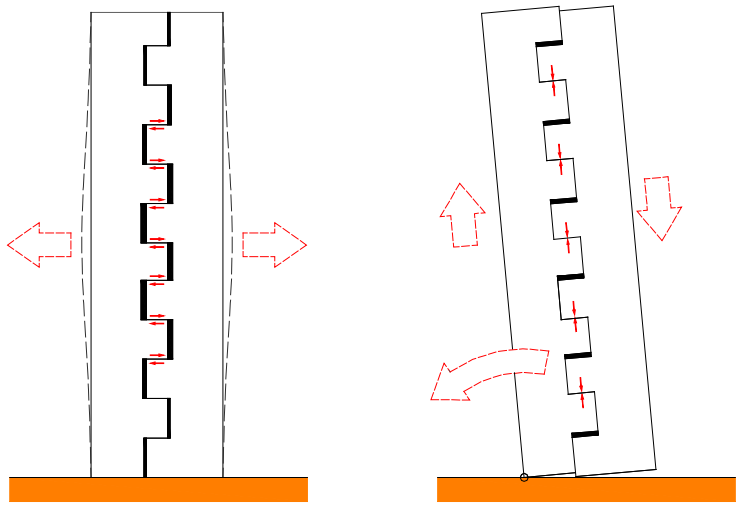
Il comportamento a mensola dei muri isolati sottoposti alle azioni orizzontali, è stato analizzato ed illustrato in modo efficace da J. Rondelet agli inizi del 1800, e ripreso in seguito in molti trattati sull'edilizia storica.
La risposta della parete alla sollecitazione trasversale dipende essenzialmente dalla natura e dalle caratteristiche della muratura stessa. In particolare, nel moto di rotazione attorno alla base la parete tende a scaricare il proprio peso sul lembo esterno, generando una forte sollecitazione di taglio lungo il piano medio.
In questa fase entra in gioco la capacità del muro di conservare la propria configurazione geometrica durante l'evoluzione del cinematismo.
Un muro privo di *diatoni*, ovvero di elementi passanti che collegano i due paramenti in senso trasversale, non offre sufficiente resistenza alla sollecitazione di taglio e può scomporsi, giungendo rapidamente al collasso.
Diversamente, in presenza di adeguati elementi di connessione trasversale, l'azione sismica tenderà a fare oscillare la parete attorno alla posizione di equilibrio, senza determinare la disgregazione del solido murario.
La vulnerabilità dell'organismo edilizio risulta fortemente condizionata dai meccanismi di danno di primo modo ed il controllo di questo tipo di dissesto rappresenta un obiettivo prioritario da perseguire sia in fase di costruzione, sia nell'eventuale opera di consolidamento.
Le murature idonee ad assorbire le azioni ortogonali sono, quindi, quelle che a parità di spessore garantiscono il migliore ingranamento fra i due paramenti.
Spesso, anche se può apparire paradossale, sono proprio i muri di spessore elevato a presentare minori connessioni trasversali, mentre quelli di spessore contenuto, rispetto alle dimensioni delle pietre, assumono una configurazione ottimale per un comportamento pressoché monolitico; il tutto dipende comunque dalle caratteristiche geometriche degli inerti e dalla qualità della malta.





Meccanismo di ribaltamento per muro monolitico, oppure a doppio o triplo paramento.
Schematizzazione del livello di ingranamento dei paramenti: A-Buono B-Medio C-Assente

L'analisi dei meccanismi di danno di primo modo permette di apprezzare un primo fattore di qualità della muratura, rappresentato dal livello di ingranamento fra i paramenti.
Il muro A è in grado di assicurare un comportamento monolitico, mentre il muro B ha dei margini di resistenza inferiori.
La completa assenza di collegamenti è rappresentata dal tipo C, a doppio foglio, incapace di contrastare qualsiasi azione di scorrimento lungo il piano medio.
A ciascun tipo di muratura corrisponde un determinato moltiplicatore di collasso, inteso come il valore minimo del coefficiente sismico "c" da applicare alle forze peso per il calcolo delle forze sismiche orizzontali capaci di portare la struttura al collasso.

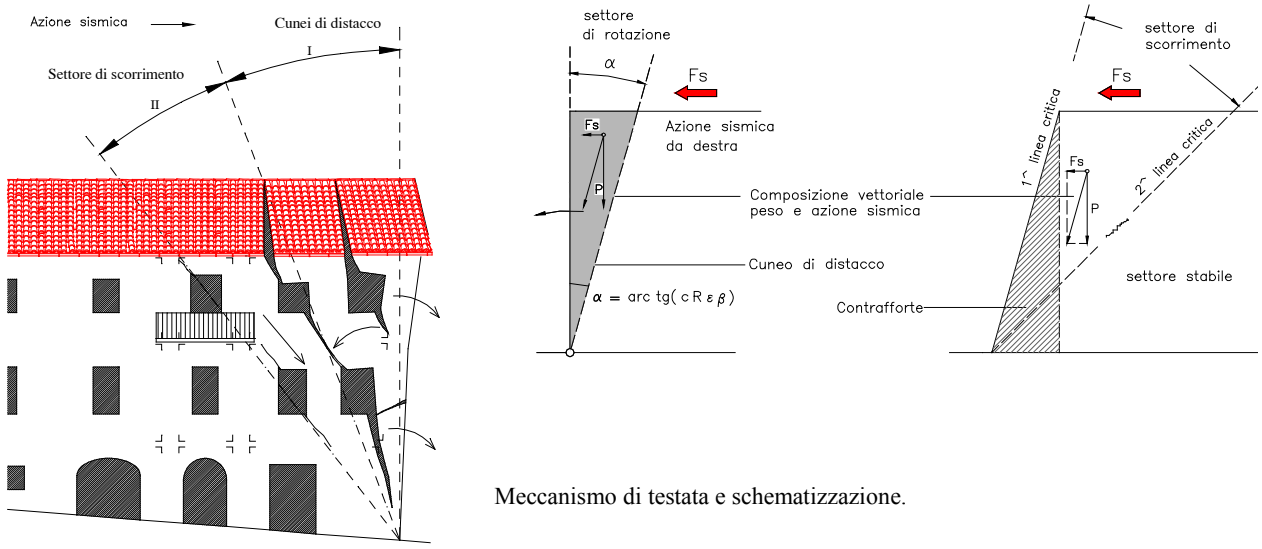


Ingranamento dei paramenti e azione di contrasto
dei meccanismi di dissesto.

Risposta alle azioni sismiche complanari.

Molto più complesso è il problema dell'analisi di setti murari sottoposti ad azioni sismiche complanari, che riveste grande importanza per la stabilità globale dell'organismo edilizio. Alle pareti disposte nella direzione del sisma compete, infatti, il ruolo di controventi, in grado di contrastare il ribaltamento dei muri ortogonali.
Secondo le norme vigenti i setti, per essere efficaci, devono avere una lunghezza superiore ad 1/3 dell'altezza, così da far prevalere la resistenza a taglio rispetto al ribaltamento flessionale.
Le azioni sismiche complanari producono nelle pareti la formazione di fessure che dipendono dalla diffusione dei flussi di compressione.
La combinazione dei pesi con le componenti sismiche orizzontali genera una risultante inclinata di un angolo pari all'arcotangente del coefficiente sismico, per cui si verifica che in una porzione del muro di testata la risultante delle forze agenti cade oltre la base d'appoggio e pertanto risulta soggetta a ribaltamento.
Una semplice costruzione grafica permette di individuare il settore angolare che tende a distaccarsi ruotando attorno alla base.

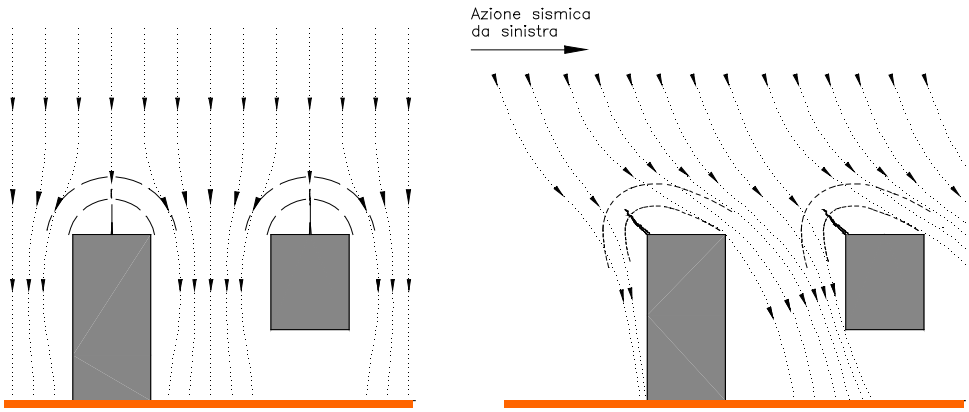
In realtà non è possibile conoscere a priori l'ampiezza angolare di detto cuneo. Per logica, si sarebbe portati di far coincidere la linea di strappo con l'inclinazione della risultante stessa, facendo corrispondere l'ampiezza del cuneo al coefficiente di intensità sismica.
In realtà questa relazione non esiste, mentre invece l'ampiezza angolare dello strappo dipende dal tipo e dalla qualità della muratura.
La lesione di distacco tende a formarsi lungo linee preferenziali definite dall'allineamento dei giunti e prive di ingranamenti; l'intensità sismica influisce solo sulla probabilità d'innesco del cinematismo.



Meccanismo di testata e schematizzazione.

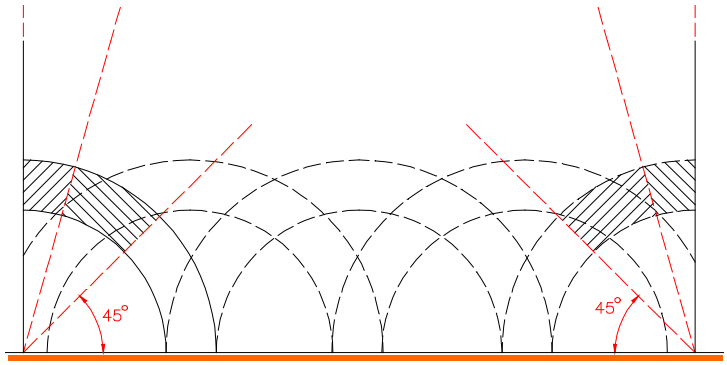
Modello ad archi virtuali e cinematismi di collasso.

Un aiuto concreto per comprendere i processi di formazione delle catene cinematiche è offerto dall'andamento qualitativo dei flussi di compressione all'interno delle pareti, che permette di decifrare alcuni aspetti ripetitivi della dinamica strutturale.
Si osserva, in particolare, che i meccanismi resistenti si instaurano in condizioni statiche e sismiche attraverso la formazione spontanea di archi di scarico, la cui conformazione è condizionata dalla presenza e dalla disposizione di eventuali aperture.

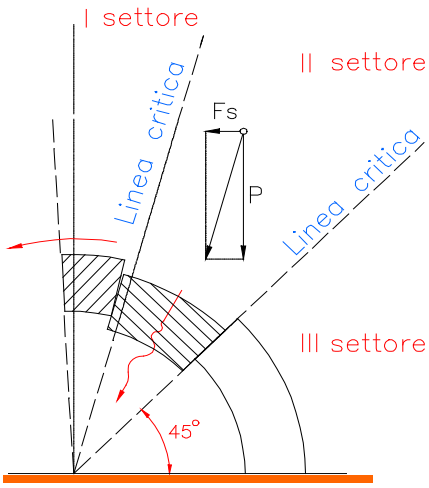


Diffusione dei flussi di compressione nei pannelli forati in condizioni statiche e sismiche

Il profilo delle fessure riflette i flussi di diffusione degli sforzi, per cui in condizioni statiche si formano lesioni sull'asse delle aperture, mentre l'azione sismica sposta la lesione verso gli appoggi, dove idealmente traslano le chiavi degli archi resistenti.
Il metodo proposto prende spunto da questa semplice osservazione e consiste nello schematizzare le pareti attraverso un'ideale successione di archi, congruente con le caratteristiche geometriche complessive di ciascuna parete.
La configurazione degli *archi virtuali* non risponde in alcun modo alla struttura fisica della muratura, costituita in realtà dalla sovrapposizione di filari orizzontali.
Nonostante questa apparente incongruenza, il modello si rivela particolarmente efficace nel simulare la risposta alle azioni sismiche complanari; questo perché l'innesco dei cinematismi indotti dalle spinte orizzontali è riconducibile alla meccanica degli archi.
Il modello virtuale, pertanto, favorisce l'analisi del comportamento meccanico e indirizza verso la definizione di appropriati interventi di consolidamento.
La successione degli archi termina alle estremità della parete con due semiarchi che tradiscono una precaria stabilità delle testate. Fra i principali meccanismi stimolati dalle azioni sismiche complanari si distinguono proprio quelli di testata, decifrabili attraverso l'analisi di questi caratteristici semiarchi, che a differenza di quelli interni mancano della forza equilibrante applicata in chiave, e che risultano pertanto soggetti all'innesco di evidenti fenomeni di dissesto.
In particolare, la scomposizione dei semiarchi in conci ideali, separati dalle linee critiche caratteristiche di ciascun tipo di muratura, permette di apprezzare il cinematismo di crisi della testata.

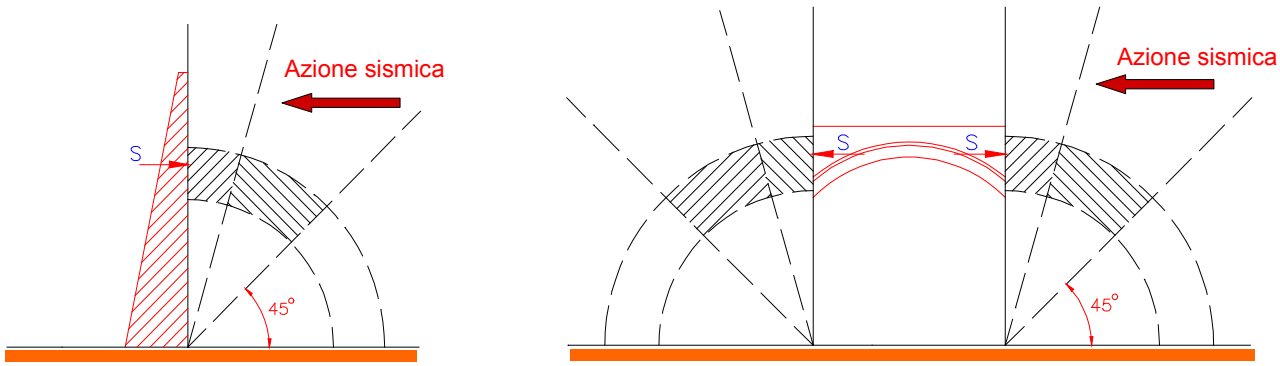


Configurazione della parete secondo il modello ad archi virtuali

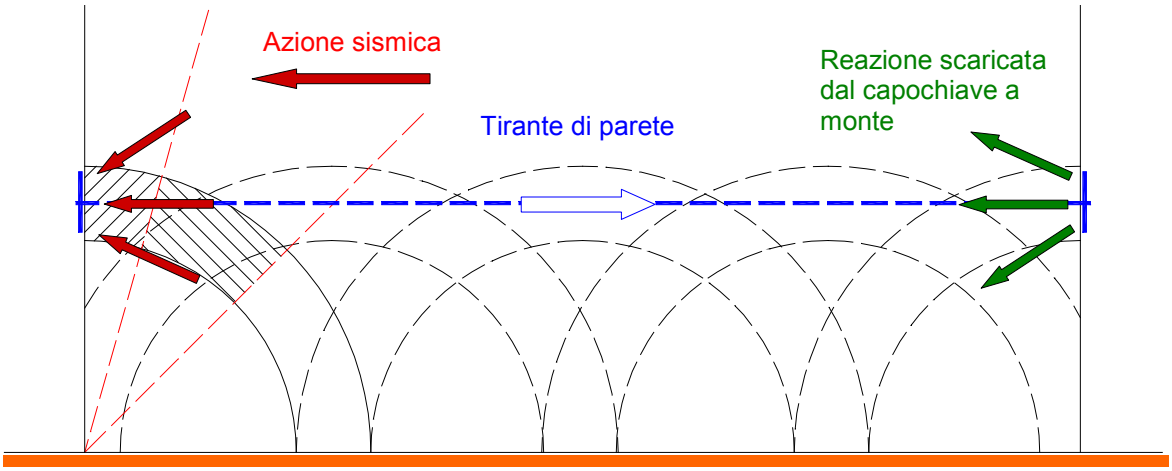


Meccanismo di rottura delle testate di muro secondo l'analogia dell'arco

Chi è abituato a trattare il problema della spinta delle terre contro i muri di sostegno secondo la teoria di Coulomb coglierà certamente delle analogie con il modello proposto.
Quello descritto è un tipo di approccio intuitivo che in passato ha suggerito la messa a punto di alcune delle più diffuse ed efficaci tecniche antisismiche premoderne. L'impiego degli speroni, ad esempio, largamente utilizzati nell'edilizia storica, è giustificato dalla spinta equilibrante che essi sono capaci di trasmettere ai semiarchi di estremità; allo stesso modo gli archi di sbadacchio assolvono la funzione di vere e proprie chiavi per la chiusura di semiarchi contrapposti.
Uno degli interventi più efficaci consiste comunque nella disposizione di tiranti complanari alla parete, vincolati alle testate mediante robuste chiavi di ancoraggio.

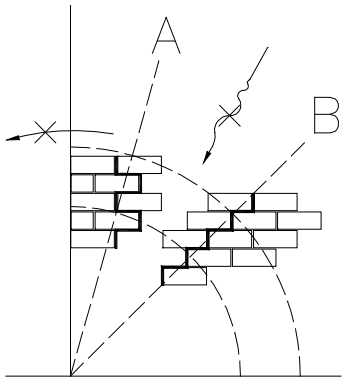


Presidi antisismici premoderni: speroni e archi di sbadacchio

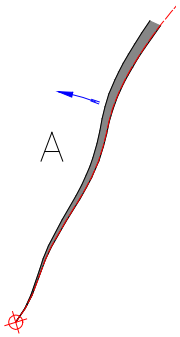


Presidi antisismici premoderni: tiranti di parete complanari

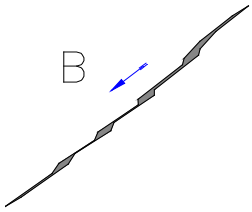
Un'analisi approfondita delle tecniche antisismiche premoderne richiederebbe altri spazi, tuttavia la chiave di lettura proposta è sufficiente a far comprendere i meccanismi resistenti che si instaurano nelle murature e le cause che inducono l'insorgenza dei principali fenomeni di dissesto.
I meccanismi di danno illustrati per le testate delle pareti non si innescano in modo automatico per tutti i tipi di muratura, bensì sono condizionati dalla qualità degli ingranamenti e quindi dall'effetto catena che si instaura nel piano della parete.
Quando le pietre sono ingranate ed i filari presentano piani di posa regolari, i meccanismi illustrati non si possono innescare facilmente. Nelle pareti lesionate l'attivazione dei cinematismi è favorito dall'assenza di connessioni, per cui gli interventi di scuci-cuci che si eseguono nelle murature storiche sono fondamentali per ripristinare la continuità muraria e ricreare l'effetto catena compromesso.
Nelle murature più scadenti, realizzate con ciottoli di pietra di piccola pezzatura e prive di *ortostati*, è molto probabile la formazione di lesioni anche sotto l'effetto di modeste sollecitazioni sismiche.



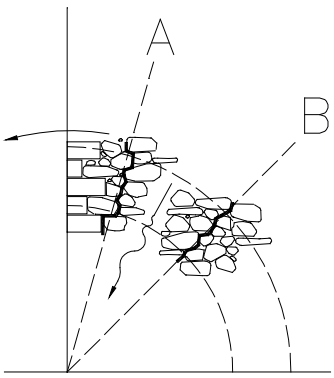
Effetto catena nelle murature di blocchi regolari ingranati



A) Lesione di Rotazione



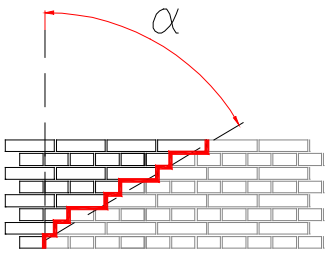
B) Lesione di Scorrimento



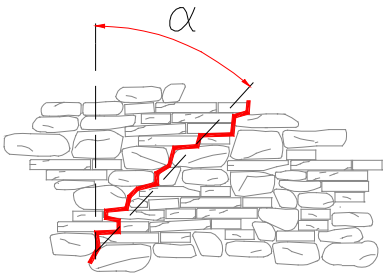
Rotazione e scorrimento nelle murature prive di ingranamenti

Angolo critico caratteristico della muratura.

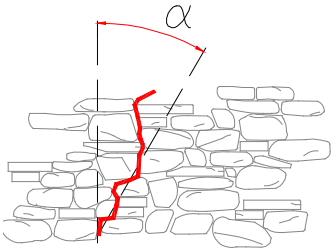
Le caratteristiche morfologiche delle lesioni che si creano per effetto dei cinematismi illustrati costituiscono degli indizi molto importanti per prevedere l'evoluzione dei meccanismi di danno.
Quella che caratterizza la prima linea critica (tipo A) è una lesione di strappo, mentre la seconda (tipo B) presenta uno scorrimento parallelo alla fessura .
Il cinematismo descritto è perfettamente sovrapponibile a situazioni di dissesto riscontrate di frequente negli edifici storici realizzati in muratura di pietrame incoerente. La lesione non segue mai un profilo rettilineo così netto come indicato nello schema grafico, inoltre l'inclinazione della seconda linea critica, individuata da un settore angolare di circa 45°, è puramente indicativa, anche se l'esperienza dimostra che in genere l'andamento reale della lesione non si discosta molto da questo profilo.
In base a quanto premesso, emerge un parametro caratteristico di ciascun tipo di muratura rappresentato dall'angolo critico α che individua la prima linea critica, che costituisce un parametro fondamentale per la trattazione analitica del problema.



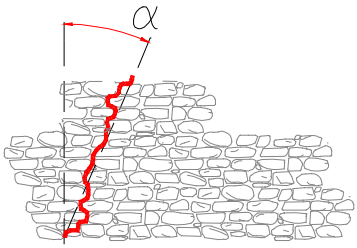
Muratura di mattoni pieni con filari alternati di testa e di costa.



Muratura mista di pietrame e laterizio.



Muratura di pietrame (prevalente) mista a laterizio.



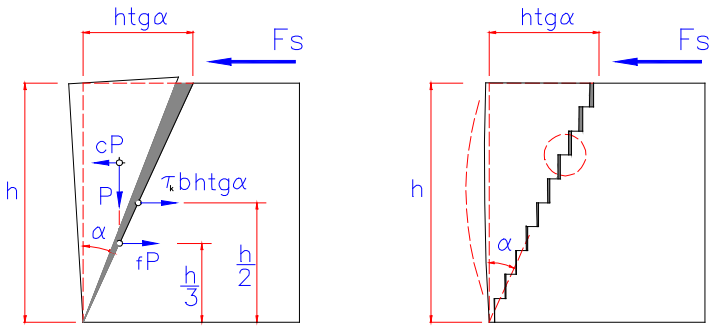
Muratura di pietrame sbozzato.

A seconda del tipo e qualità dei materiali impiegati e della tecnica adottata per la posa in opera, è possibile individuare l'angolo critico lungo l'allineamento diagonale dei giunti.
Le murature di mattoni pieni con tessitura *alla gotica* sono caratterizzate da angoli critici piuttosto grandi, mentre se i mattoni sono disposti per testa l'angolo si riduce nettamente. E' sufficiente, quindi, modificare la disposizione dei mattoni per migliorare o peggiorare la risposta alle azioni complanari.

Nei paramenti in muratura di pietrame o mista l'angolo critico costituisce uno degli indicatori più significativi della qualità muraria.
L'inclinazione della linea critica, infatti, dipende dalle dimensioni e dalla forma delle pietre, dal tipo di tessitura adottato e pertanto dall'ingranamento longitudinale.
Il fattore non è influenzato in alcun modo dalla resistenza meccanica delle pietre e dal tipo di malta impiegata.

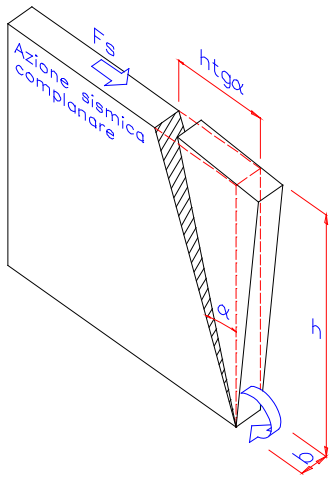
Criteri per la trattazione analitica del problema.

I meccanismi di rottura a flessione caratterizzati dalle modalità di collasso qui descritte non sono mai stati oggetto di analisi esaurienti, se non a livello puramente qualitativo. I programmi di calcolo più diffusi, infatti, non prendono in considerazione tale modalità di collasso, mentre in realtà questi sono i cinematismi di danno che caratterizzano maggiormente il comportamento delle murature storiche.



$$P = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^2 \cdot tg\alpha$$

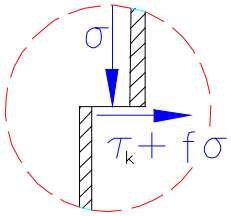
Modello grafico per la valutazione della risposta sismica di pareti murarie sollecitate nel piano (Rottura a flessione)



Vista assonometrica del cinematismo di collasso

Per un approccio analitico al problema si deve fare riferimento al modello grafico illustrato in figura, dove sono evidenziati i parametri di resistenza che intervengono per contrastare l'innesco e l'evoluzione del cinematismo di collasso.
Il modello strutturale si basa su un'analisi statica equivalente, con le forze agenti in direzione orizzontale e in grado di produrre la formazione di una lesione netta lungo la linea critica, individuata dal settore angolare α.
Il modello elementare riguarda l'esame di una parete isolata, per comprendere il ruolo che ciascun fattore di resistenza svolge nelle fasi d'innesco e di evoluzione del cinematismo di danno.
L'assunzione di un modello geometrico caratterizzato da una linea di strappo perfettamente rettilinea costituisce un'utile semplificazione ai fini del calcolo; in realtà il distacco si verifica sull'allineamento dei giunti e con un profilo scalettato, che permette di apprezzare meglio le componenti di resistenza.

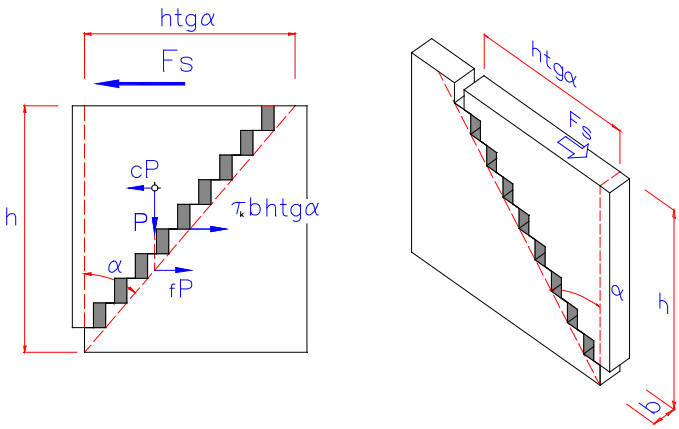
I principali fattori che si oppongono alla rotazione del cuneo sono costituiti dalla forma della porzione di parete distaccata, ovvero dal cuneo stesso che funge da contrappeso, oltre che dalla resistenza a taglio e dalla forza d'attrito esercitate in fase d'innesco lungo la superficie di distacco.
Un altro importante fattore di resistenza è rappresentato dall'ingranamento degli inerti (pietre o mattoni), che però ha effetto nel settore angolare sotteso dalla linea critica.



Formula di Coulomb

Esempio reale.

Nella fase d'innesco i fattori di resistenza attivi sono costituiti dalla coesione *(espressa dalla resistenza caratteristica a taglio della muratura - τ_k)* e dall'attrito (*f*); alla comparsa della prima fessura viene meno il fattore di coesione, mentre l'attrito (*f*) continua a svolgere un ruolo importante fino al distacco dei solidi, quando sopravviene il fattore geometrico a contrastare da solo la fase di collasso.
L'equilibrio permane fintanto che il momento ribaltante indotto dalla forza sismica orizzontale è bilanciato dal momento resistente garantito dalla coesione, dall'attrito e, in ultimo, dalla forma del cuneo stesso.
La verifica sismica consiste nel calcolo del moltiplicatore "c" dei carichi orizzontali che porta ad una perdita di equilibrio del sistema, ovvero del moltiplicatore minimo fra quelli d'innesco, di fessurazione e di collasso, da confrontare con il valore limite indicato dalle norme.
Una trattazione rigorosa del problema richiede anche la verifica a scorrimento del settore murario distaccato che nella gerarchia dei dissesti può precedere lo stesso ribaltamento.
Il moltiplicatore di collasso a scorrimento si ottiene in modo analogo a quello di rotazione attraverso l'equazione di equilibro fra il taglio sismico e la resistenza opposta della muratura, dovuta ancora alla coesione e all'attrito.

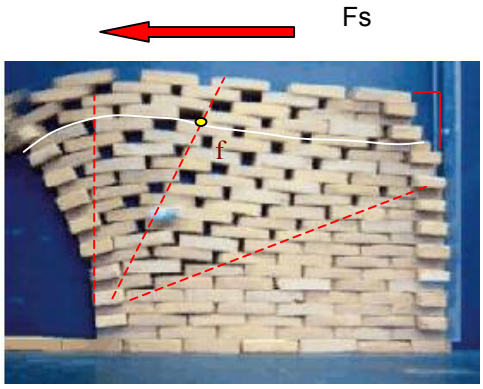


Modello grafico per la valutazione della risposta sismica di pareti murarie sollecitate nel piano (Rottura a taglio)

Il modello ad archi virtuali si dimostra adatto anche all'interpretazione di questo tipo di meccanismo, osservato di frequente in occasione del sisma del 1997 in Umbria.
Quando l'angolo critico caratteristico risulta piuttosto ampio, il meccanismo di rottura più probabile è quello che prevede lo scorrimento lungo la linea critica.
Questo tipo di meccanismo si manifesta soprattutto nelle murature con inerti di forma regolare, come quelle in pietra squadrata o di mattoni pieni.

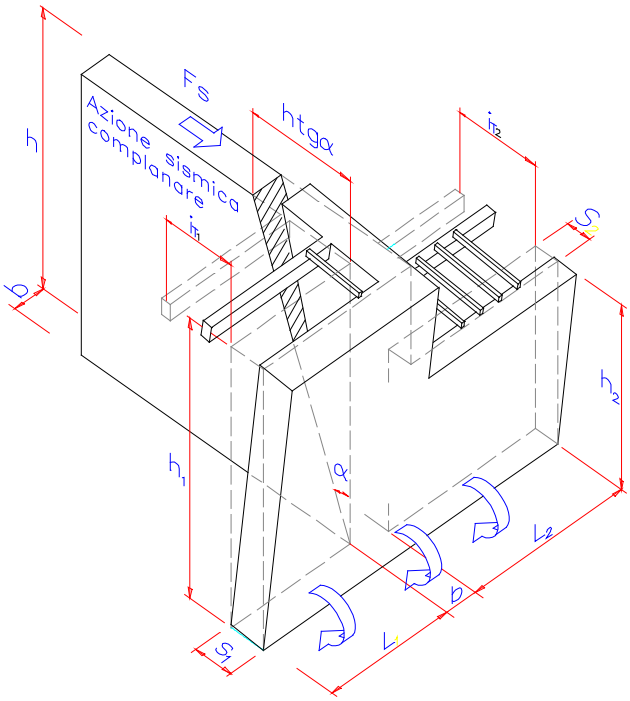
Per una migliore comprensione del fenomeno si è fatto ricorso allo studio di modelli in scala che permettono di evidenziare effetti che sfuggono ad un approccio puramente teorico.

La foto a lato mostra la risposta del modello in scala di una parete realizzata con mattoncini murati a secco, sottoposto ad un'accelerazione sismica orizzontale; in essa si può notare il diverso comportamento dei laterizi in relazione alla posizione angolare.
Per angoli piccoli prevale la rotazione, mentre per angoli maggiori i mattoni vengono trascinati in un moto di traslazione orizzontale.
Ciascun filare si dispone secondo un profilo ondulato caratterizzato da un punto di flesso; l'unione di questi punti individua una linea caratteristica che divide il settore soggetto alle rotazioni da quello in cui prevale lo scorrimento.



Comportamento di un modello in scala di muratura a secco.

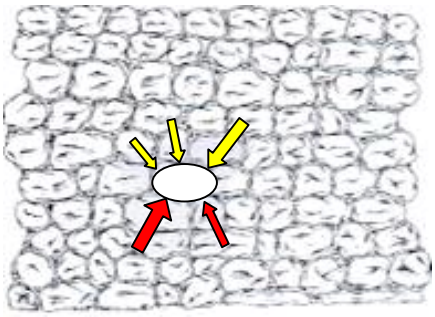
Una configurazione strutturale un po' più articolata, ma più vicina alla configurazione reale prevede l'introduzione di altri elementi caratteristici della struttura muraria, come l'inserimento di una parete trasversale al muro esaminato, in modo da creare un martello murario come quello tipico delle pareti di facciata collegate ai muri di spina.



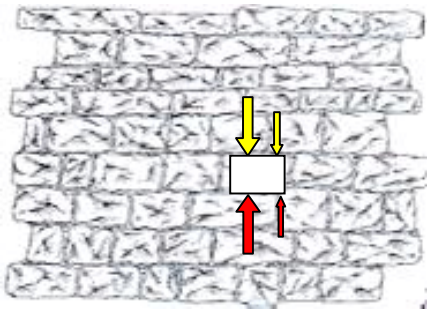
Il criterio di analisi del modello strutturale è analogo a quello illustrato per il muro isolato, con la variante di un maggior numero di elementi che contribuiscono all'evoluzione del meccanismo, solai compresi.
Negli edifici con più piani fuori terra le potenziali configurazioni di collasso da esaminare si moltiplicano.
Un altro importante fattore da considerare nella stima del moltiplicatore di collasso, riguarda una caratteristica intrinseca della muratura che deriva dalla forma delle pietre e dalle modalità di posa in opera, che influiscono sull'equilibrio interno della muratura.

Meccanismo composto - Modello generale

Il "vicendevole conflitto" fra le pietre cui fa riferimento Nicola Cavalieri San-Bertolo, è certamente indispensabile per l'equilibrio, ma gli schemi a alto dimostrano che può essere pure la causa d'innesco di alcuni meccanismi.
Il parametro che caratterizza la forma e la posa degli inerti può essere definito dal valore di un angolo caratteristico φ che tiene conto dell'inclinazione media delle forze equilibranti trasmesse fra gli elementi.
L'impiego di blocchi squadrati o di elementi arrotondati, disposti però con cura su piani orizzontali, scongiura l'innesco di spinte interne per l'equilibrio del sistema.
Al contrario, se le pietre arrotondate tendono a creare un ingranamento fra i filari sovrapposti, è inevitabile l'innesco di componenti orizzontali necessarie per l'equilibrio.
In questo modo la muratura assume una configurazione "internamente spingente" in direzione complanare alla parete.

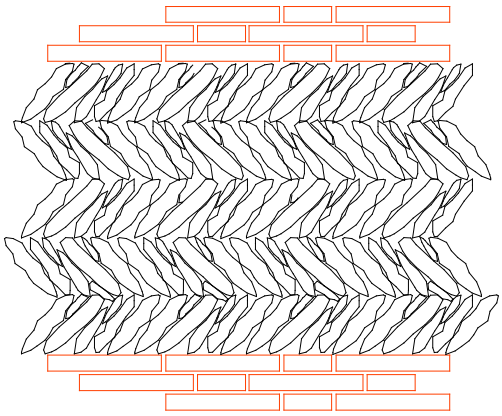


Posa di filari sovrapposti ingranati (muratura in ciottoli di fiume).



Posa dei filari su piani orizzontali (Pietra calcarea squadrata disposta su piani orizzontali).

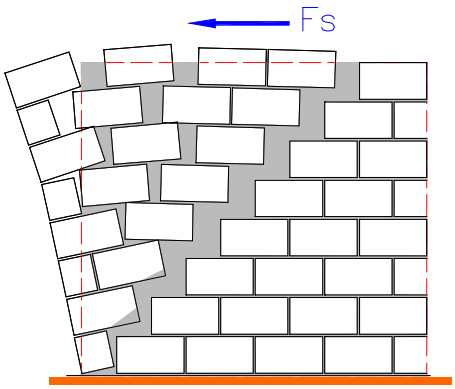
In linea di principio questo non costituisce un problema, anzi, per certi aspetti la precompressione orizzontale che si instaura fra le pietre contrasta la formazione di fessure verticali.
Per queste murature i problemi sorgono nelle porzioni estreme delle pareti, dove la componente "spingente" delle forze equilibranti favorisce il distacco del cuneo.
Vi sono tipi di murature dove questo effetto viene ricercato come elemento stabilizzante; è il caso, ad esempio, dell'*opus spicatum*, ovvero della muratura di pietrame realizzata in lastre sottili oppure di laterizi disposti a spina pesce, che trovano stabilità proprio attraverso lo stato di compressione orizzontale.



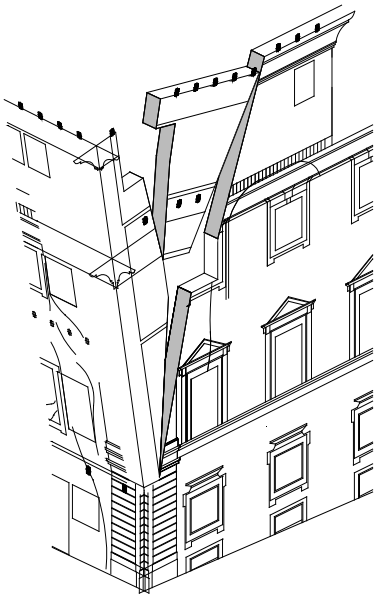
Muratura in *opus spicatum*

Ogni elemento è sottoposto ad azioni di contatto molto elevate, per cui si amplificano le forze d'attrito che impediscono qualsiasi movimento.
In questi casi la spinta interna esiste a prescindere dalla sollecitazione sismica e pertanto può indurre fenomeni di fessurazione anche in condizioni statiche ordinarie.

Un elemento di disturbo che in parte compromette pure la risposta sismica della parete sollecitata nel piano riguarda la possibile disgregazione del cuneo.
Il fenomeno è da prendere in considerazione quando la qualità della muratura è scadente, oppure quando il cuneo raggiunge dimensioni eccessive o, ancora, in presenza di un'anomala distribuzione delle aperture in prossimità del cantonale.
Nei muri di buona qualità è l'ampiezza eccessiva del cuneo a condizionare maggiormente il fenomeno.



Ipotesi di sconnessione del cuneo di distacco.

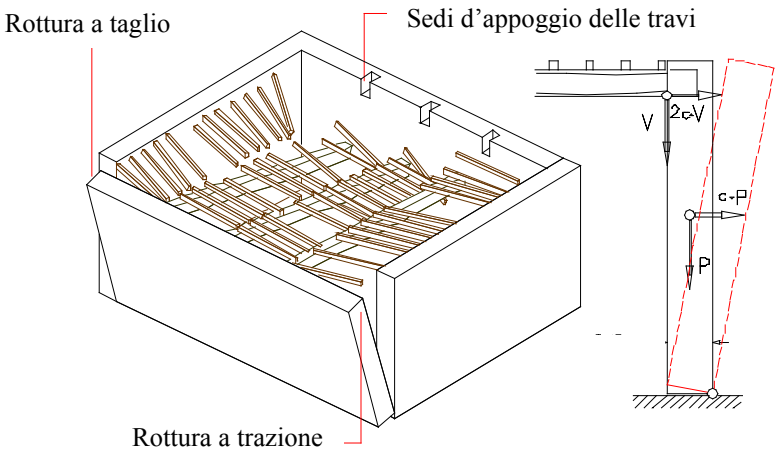


Palazzo Buonaccorsi (Macerata): meccanismo di danno del muro d'angolo al secondo ordine A2.

Le conseguenze negative per la stabilità della parete dipendono dal fatto che si riduce sensibilmente l'azione del momento resistente di forma, mentre rimane pressoché inalterato il momento spingente.
Si possono avere effetti ancora più gravi quando l'improvvisa disgregazione produce un'azione di rimbalzo sulla parte stabile, con un pericoloso urto che va istantaneamente ad amplificare la spinta.
L'analisi del cinematismo suggerisce il modo più efficace per contrastarne l'evoluzione attraverso la disposizione di tiranti posti a tutti i piani.
Per il dimensionamento dei tiranti è necessario procedere dall'alto verso il basso e per ogni configurazione si calcola il rispettivo moltiplicatore di collasso.
Quando il valore è inferiore a quello minimo prescritto dalle norme si calcola il tiro delle catene necessario per compensare il momento resistente e per assicurare adeguate condizioni di stabilità e sicurezza.

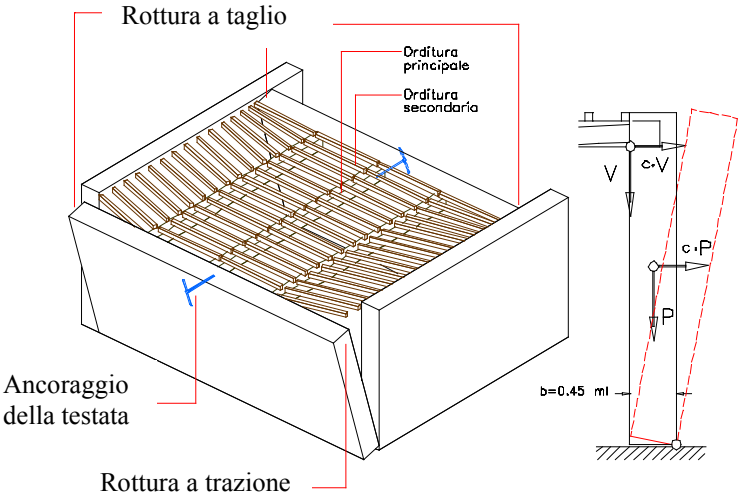
Analisi del comportamento sismico di cellule elementari.

Dopo aver puntualizzato alcuni dei criteri generali da seguire per le verifiche dei meccanismi elementari, è necessario fornire una visione più specifica del problema attraverso l'analisi del comportamento di semplici organismi edilizi, che tuttavia presuppongono una diversa interazione fra i vari elementi strutturali.
A tal fine si prende in esame una cellula isolata di forma rettangolare organizzata su un solo piano, con pareti prive di aperture per una opportuna semplificazione, ovvero una scatola chiusa da muri perimetrali e da un soffitto ligneo.



Meccanismo di primo modo della parete sottovento (Inefficacia delle ammorsature d'angolo).

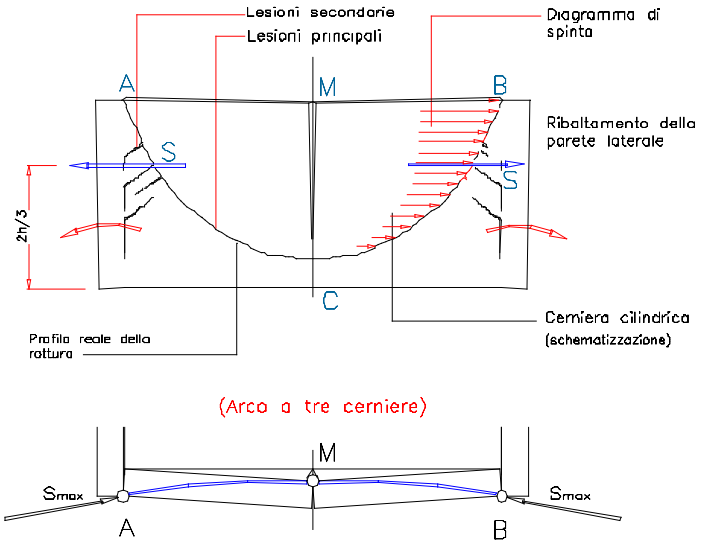
Il meccanismo di ribaltamento fuori del piano che si osserva nelle pareti libere è condizionato dalla presenza di eventuali connessioni con i muri di controvento e pure dalla spinta trasmessa dal solaio alla parete sottovento.
Il distacco del muro di facciata può avvenire in vari modi; i più pericolosi sono certamente quelli che comportano la sconnessione dei cantonali fra la facciata ed i muri di contrasto per rottura a taglio o trazione.
Il primo caso implica lo scorrimento nella sezione di contatto fra la parete che ribalta ed il muro di controvento, mentre con la rottura a trazione la facciata si tira dietro il muro d'angolo con la modalità indicata sul cantonale di destra.
La probabilità d'innesco di ciascun meccanismo dipende dalla qualità delle connessioni fra i muri ortogonali; per effettuare una stima attendibile sono necessarie indagini approfondite attraverso saggi mirati, ma può essere molto utile la ricostruzione delle fasi evolutive, che spesso permette di scoprire eventuali punti deboli.
Il solaio in legno condiziona l'evoluzione del meccanismo, con effetti che possono essere pure negativi per l'incremento della forza sismica sommitale. La carenza di connessioni con i muri portanti fa funzionare gli appoggi come vincoli monolateri, per cui l'intera forza sismica viene scaricata contro la parete sottovento, mentre le travi si sfilano dal muro opposto.

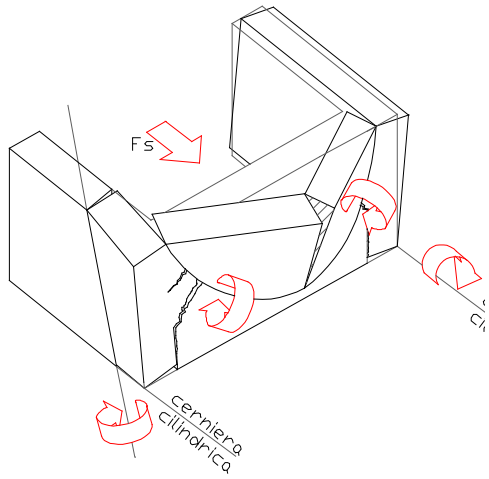


Meccanismo di primo modo delle pareti vincolate all'orditura principale dei solai.

E' sufficiente ancorare le testate delle travi ai muri portanti per prevenire questo tipo di collasso.
Non è necessario collegare tutte le orditure, ma basta vincolare la trave centrale in modo che possa funzionare da tirante/puntone, per ottenere un significativo miglioramento del comportamento d'insieme.
Una delle norme indicate dal Corpo Reale del Genio Civile per la riparazione degli edifici danneggiati dal terremoto di Citerna e Monterchi del 1917, stabilisce proprio che "Le travature dei solai devono, almeno ogni tre, poggiare su tutta la grossezza dei muri ed essere collegate con il telaio di consolidamento ove esiste".
In queste condizioni i muri investiti dalle azioni ortogonali sono obbligati a seguire oscillazioni sincrone, quando in assenza del vincolo proposto tendono invece a muoversi in modo indipendente. Il risultato consiste in un reciproco smorzamento delle oscillazioni con una conseguente riduzione della vulnerabilità sismica.
Le tecniche costruttive atte a scongiurare l'attivazione dei meccanismi di rottura a taglio o trazione prevedono la realizzazione di efficaci ammorsature fra i muri ortogonali.
La cura nella disposizione dei conci di pietra e nella realizzazione dei cantonali è finalizzata alla creazione di un corpo unico fra i due muri disposti su piani ortogonali.
L'efficacia delle connessioni d'angolo spinge il meccanismo verso la rottura a flessione, che determina il distacco di una porzione di parete di forma parabolica, il cui profilo dipende dall'interasse dei muri di controvento e dall'altezza del muro stesso.
La rottura a flessione si presenta più articolata; la parete viene spinta all'esterno nella parte centrale mentre si forma una lesione verticale lungo la linea di simmetria; il meccanismo in questo caso si affida alla formazione di archi orizzontali che si sviluppano nello spessore del muro e sfruttano il contrasto con i cantonali che fungono da imposte.

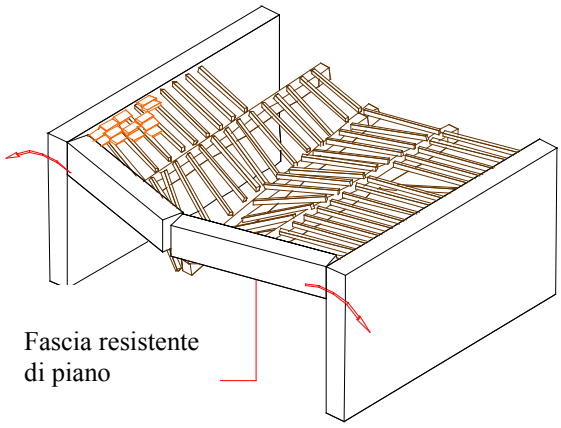
Lo spessore della parete di facciata e l'interasse dei muri laterali definiscono la configurazione e la curvatura più o meno accentuata degli archi di scarico.
Da ciò deriva l'entità delle spinte trasferite ai cantonali.
Le pareti sottili sono quelle che soffrono maggiormente questo tipo di sollecitazione, per problemi associati alla stessa configurazione geometrica.
La condizione limite di equilibrio corrisponde alla formazione di cerniere plastiche negli archi orizzontali, che coincidono con le classiche linee di fessurazione rappresentate nella figura a lato.



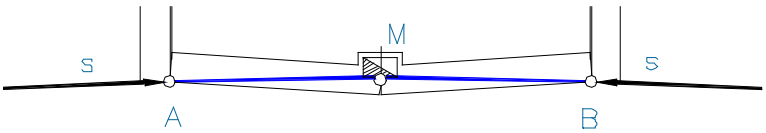


Meccanismo resistente con arco orizzontale a tre cerniere.

L'evoluzione del meccanismo dipende dalle caratteristiche meccaniche della muratura, oltre che dalla capacità dei muri laterali di sopportare le spinte degli archi; queste sono più intense a livello sommitale, dove la rotazione dei solidi contrapposti tende a produrre la maggiore compenetrazione.
Come effetto secondario si riscontra la formazione di lesioni diagonali nella zona sottesa dal profilo parabolico, da associare allo sforzo di taglio dovuto alle spinte.

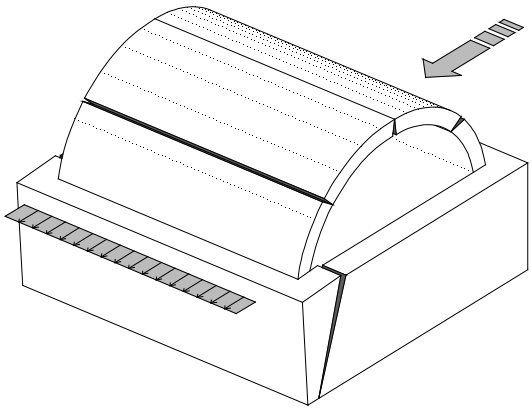


Variazione del meccanismo in presenza di aperture che riducono la parte resistente ad una sola fascia di piano.



Configurazione dell'arco ribassato in presenza di canne fumarie

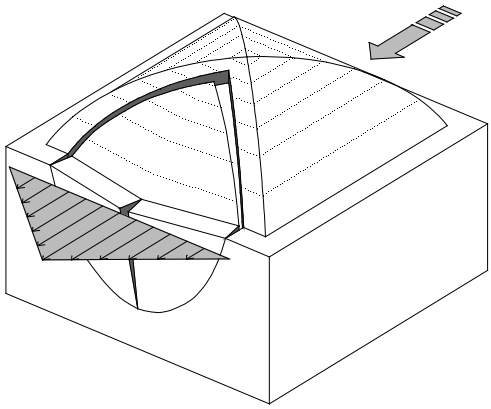
Se la parete di facciata presenta delle aperture, gli archi resistenti si concentrano in una fascia ristretta disposta sopra gli architravi ed il meccanismo risulta sensibilmente modificato.
Il meccanismo resistente può essere compromesso dall'indebolimento della parete causato dell'inserimento di canne fumarie nascoste nello spessore del muro o dalla realizzazione di semplici tracce verticali destinate alle canalizzazioni degli impianti che, sebbene richiuse, costituiscono comunque degli elementi di debolezza.
La configurazione di equilibrio in questi casi comporta l'arretramento della cerniera in chiave ed una curvatura meno accentuata dell'arco orizzontale, per cui ne deriva un sensibile incremento della spinta.
Il soffitto che chiude la scatola muraria assume un ruolo importante per la stabilità globale, soprattutto quando si tratta di un solaio piano che può essere utilizzato per creare un adeguato sistema di connessioni.



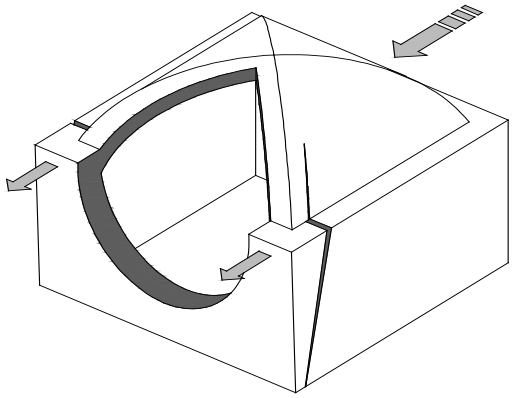
Meccanismo di ribaltamento amplificato dalla spinta distribuita della volta a botte.

Nel caso di copertura con elementi voltati in pietra o laterizio la situazione cambia sostanzialmente; i meccanismi di danno della cellula mostrano un'evoluzione diversa in relazione alla geometria della volta ed alla direzione del sisma. Per le volte a botte le differenze sono evidenti, dato che la spinta monodirezionale sottopone le pareti perimetrali ad uno *stress* diverso.
I muri di testata non risentono di alcun aggravio di carichi, anzi, la regola costruttiva prescrive che l'arcata della volta non vada ammorsata alle pareti, per cui le testate soffrono soprattutto la carenza di vincoli; almeno per quanto riguarda le azioni verso l'esterno, mentre sul lato interno il muro trova il contrasto passivo della volta che si comporta quindi come un vincolo monolatero.

La situazione cambia di poco se al posto della botte si trova una volta a padiglione oppure a crociera. Se vogliamo, quest'ultima tende a concentrare la spinta contro i peducci d'angolo, pertanto favorisce il distacco dei cantonali cui segue il ribaltamento della facciata, mentre quella a padiglione è più compatibile con il meccanismo di rottura a flessione del muro d'imposta, dato che trasmette la massima spinta nel tratto centrale della parete.

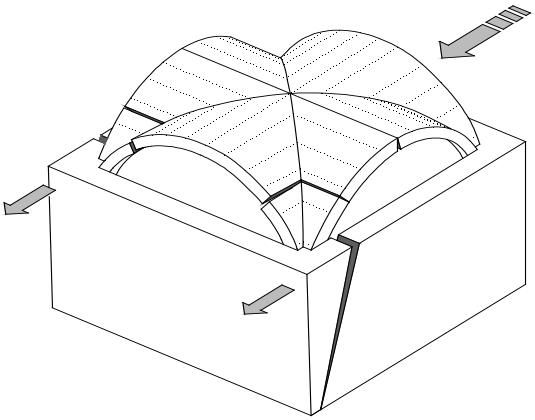


Meccanismo di rottura a flessione fuori del piano amplificato dalla spinta centrale del padiglione.



Evoluzione del cinematismo di danno conseguente al crollo dello spicchio centrale.

Al crollo della porzione del tratto centrale fa seguito però un meccanismo simile a quello prevedibile per le volte a crociera con il distacco dei cantonali.



Dissesto tipico delle volte a crociera.

Nell'edilizia seriale il problema delle spinte è risolto con successo attraverso una successione di elementi spingenti posti a contrasto fra cellule adiacenti che generano una mutua azione equilibrante.
Le volte a botte, per evitare le spinte contro le pareti esposte vengono disposte con asse perpendicolare alla facciata, mentre le crociere, utilizzate solo ai piani bassi dei fabbricati, sfruttano l'azione stabilizzante dei carichi sovrastanti, in grado di deviare le spinte verso le fondazioni.
Le volte a padiglione, meno diffuse, esercitano la massima spinta al centro della parete, dove la sollecitazione viene contrastata con maggiore difficoltà.

Giovanni Cangi