

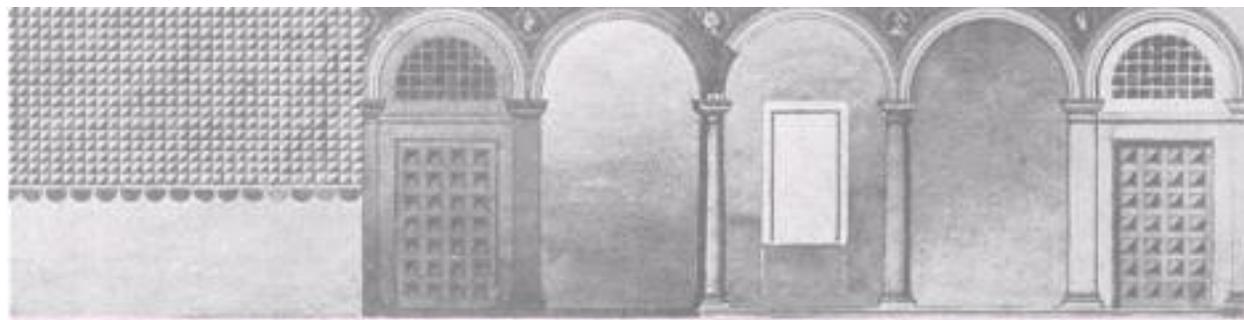
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA TRE – FACOLTA' DI ARCHITETTURA

A.A. 2008-2009

LABORATORIO DI RESTAURO A

Restauro Architettonico – MICHELE ZAMPILLI

Modulo di Conservazione e riqualificazione tecnologica degli edifici – FRANCESCA GEREMIA



Mercoledì 10 Dicembre
ore 9.00

GIOVANNI CANGI _ ingegnere

IL MANUALE DEL RECUPERO STRUTTURALE ANTISISMICO

ELEMENTI DI MECCANICA DELLE MURATURE



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

Dott. Ing. Giovanni Cangì
Via della Quercia, 3/F
06012 – Città di Castello (PG)
E-mail: ingcangi@tiscali.it

1) MURATURE STORICHE IN ZONA SISMICA.

Meccanica delle murature, tipi di dissesto e criteri di analisi strutturale.

1.1 Aspetti generali

Un corretto approccio all'analisi strutturale degli edifici in muratura di tipo tradizionale non può prescindere dall'osservazione critica dei meccanismi di dissesto che definiscono gli scenari di danno tipici dell'edilizia storica in zona sismica. Gli scenari di danno sono infatti caratterizzati dall'aspetto ripetitivo di molti meccanismi, che si manifestano con varianti poco significative dovute alla specifica configurazione geometrica ed alla qualità dei materiali, ma sostanzialmente identici nella loro formazione ed evoluzione.

Un'altra caratteristica propria delle murature tradizionali, che emerge dall'osservazione dei quadri di dissesto, riguarda il carattere locale dei principali meccanismi di danno, per cui alcune parti della struttura possono rovinare mentre altre ne restano del tutto escluse.

Questo tipo di risposta alle sollecitazioni sismiche è molto diverso da quello degli edifici intelaiati, dove un'azione qualsiasi, applicata in un punto generico, coinvolge comunque l'intera struttura.

Questo carattere distintivo della muratura tradizionale fornisce indicazioni importanti e suggerisce l'idea di una possibile scomposizione dell'organismo edilizio in porzioni elementari, tale da semplificare l'analisi delle singole parti e quindi dell'edificio nel suo complesso.

A tal fine è utile procedere allo studio di strutture semplici, di configurazione elementare, costituite da pareti singole ed isolate, per esaminarne la reazione ai carichi statici verticali ed alle azioni sismiche orizzontali.

La comprensione dei fenomeni che condizionano la risposta delle pareti isolate permetterà di prendere in esame strutture più articolate, come quelle ottenute dal collegamento di due muri ortogonali, per passare successivamente all'analisi della cellula muraria vera e propria, che costituisce l'embrione di qualsiasi organismo edilizio e che mette in gioco un sistema di connessioni di livello superiore.

Questa progressiva articolazione dello schema statico di riferimento favorisce la comprensione del comportamento statico, permette di analizzarne le cause e facilita la messa a punto di appropriati modelli di analisi.

Il criterio adottato è aderente alla concezione strutturale dell'edilizia premoderna, realizzata mediante assemblaggio di elementi strutturali connessi fra loro attraverso vincoli monolateri e, inoltre, risulta in linea con le indicazioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - I Sezione, che nell'adunanza del 27.02.92 - prot. n. 29, si è espresso 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. L'analisi sismica *globale* prevista dalle norme va dunque in questo caso 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. Ciò è possibile attraverso la suddivisione della compagine muraria in porzioni elementari coinvolte nei singoli meccanismi resistenti.

Per effettuare un'analisi aderente al reale comportamento delle strutture murarie è opportuno recuperare quell'approccio pratico ed intuitivo che caratterizzava l'opera dei mastri muratori del passato, capaci di trarre dall'osservazione e dall'esperienza i suggerimenti utili per una continua opera di miglioramento delle tecniche costruttive; metodi empirici, che hanno scandito l'evoluzione della tradizione costruttiva antisismica.

Fra i modelli di analisi che rispondono maggiormente a questa impostazione, il più adatto è certamente 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 che deve essere sempre verificata, ovvero quella di poter arrivare al collasso senza disgregarsi, per cui si comprende l'importanza di tutti gli interventi preventivi sulle pareti volti a conferire una consistenza tendenzialmente monolitica ad ogni parete.

Meccanismi di questo tipo consentono una modellazione matematica accurata ed una previsione attendibile della loro evoluzione.

L'ipotesi di "*corpo rigido*" non è realistica, ma è compatibile con il reale comportamento della muratura, che non può essere certamente assimilata ad un materiale elastico, omogeneo ed isotropo, secondo le note ipotesi della Scienza delle Costruzioni.

La teoria dell'elasticità non è facilmente applicabile all'analisi delle murature, tuttavia è opportuno non adottare visioni così estreme che fanno preferire un modello escludendo l'altro. La realtà è che la muratura,

se pure entro limiti ristretti, risponde alle leggi del comportamento elastico, ma la debole resistenza a trazione e la repentina formazione di lesioni ne modificano la risposta, spingendo la struttura verso l'innescio di catene cinematiche.

In corrispondenza delle cerniere, dove si trasferiscono i flussi di compressione da un solido all'altro, si possono verificare fenomeni di plasticizzazione con schiacciamento della muratura, in grado di anticipare il collasso per rotazione rigida della parete.

E' evidente, quindi, che le caratteristiche meccaniche del materiale influiscono sulla risposta sismica, ma soprattutto appare chiaro che l'ipotesi di comportamento elastico-plastico non è in contraddizione con il metodo di analisi dei cinematismi di collasso.

1.2 Meccanismi di danno elementari.

L'analisi sismica con il metodo dei cinematismi di collasso, pone grossi problemi, non tanto per la modellazione matematica, quanto per l'individuazione dei meccanismi di danno più pericolosi fra tutti quelli ragionevolmente 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.

Quelli illustrati in figura costituiscono degli esempi fra i più intuitivi e significativi, la cui comprensione fornisce una chiave d'interpretazione per configurazioni 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 ciascuna parete si comporta come elemento isolato.

Se si ipotizza l'azione sismica agente in senso ortogonale ad una delle pareti e complanare all'altra, il dissesto sarà caratterizzato dalla formazione di una cerniera cilindrica attorno alla base della prima, cui corrisponde il ribaltamento della mensola.

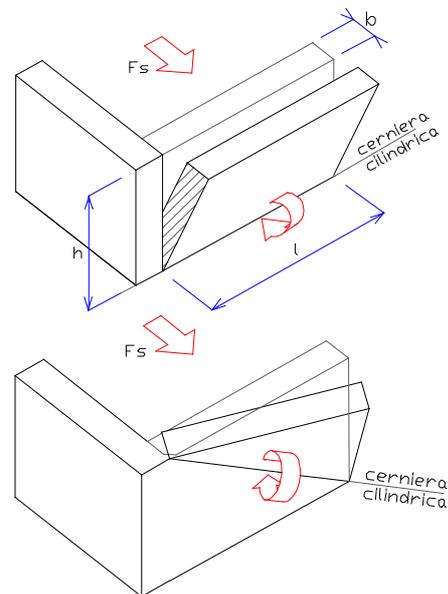
Il secondo è un caso più comune e prevede lo stesso tipo di sollecitazione agente su una struttura costituita da muri ben connessi tra di loro e di buona resistenza. La cerniera cilindrica tende a disporsi secondo la diagonale della mensola, che costituisce la linea debole ed esclude il cantonale dal meccanismo di danno.

L'attivazione del secondo cinematismo di collasso richiede un'azione sismica sensibilmente superiore, pertanto è meno probabile del primo. Il meccanismo di rottura, che interessa una struttura formalmente identica ma caratterizzata da una diversa configurazione dei vincoli, ne risulta sostanzialmente modificato.

Piuttosto frequente è il meccanismo di danno successivo, che introduce una variante interessante, rappresentata dalla cerniera che si dispone con un'inclinazione intermedia rispetto ai casi precedenti, per effetto di un collegamento comunque efficace fra i due muri.

La novità è rappresentata dal possibile strappo e trascinarsi di una porzione cuneiforme del muro sollecitato dall'azione complanare.

La complessità del problema è da mettere in relazione alle innumerevoli configurazioni di collasso che si possono verificare, fra le quali non è facile stabilire a priori la più probabile e pericolosa, se non attraverso calcoli piuttosto complessi per i quali si rimanda ai paragrafi successivi.

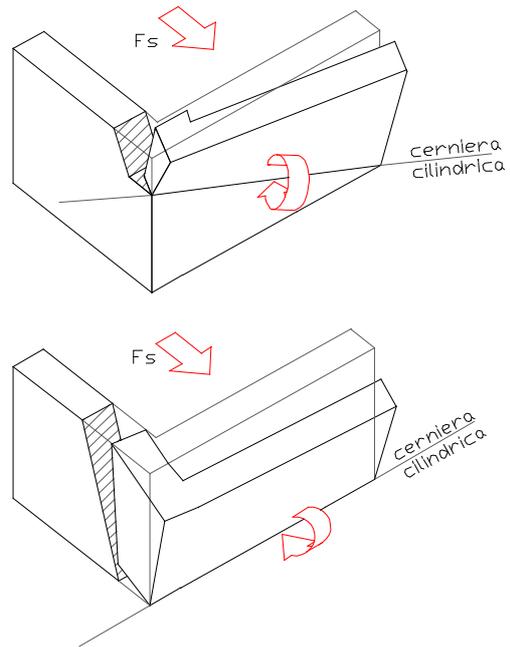


1.1 Meccanismi di danno elementari di pareti libere o vincolate ad una estremità.

L'ultimo schema è apparentemente simile al primo, perché caratterizzato dalla formazione della stessa cerniera di base. In realtà tale comportamento si manifesta solo se i muri sono perfettamente collegati, per cui l'eventuale strappo fra le due pareti non può avvenire che a monte del cantonale, dove è facilitata la formazione delle linee di frattura.

Questa condizione, piuttosto frequente nell'edilizia storica, comporta il distacco di un ampio cuneo murario, che funge da contrappeso e che, per propria forma, tende a contrastare il ribaltamento.

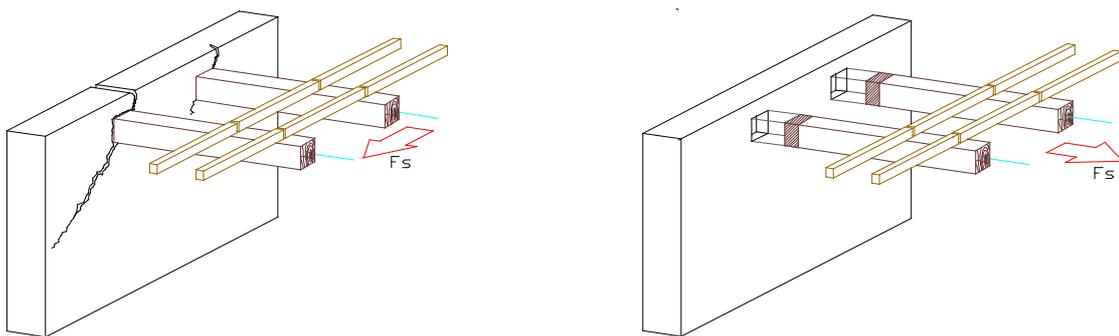
In questo modo si riduce di molto la possibilità d'innesco del meccanismo, che invece nella configurazione iniziale appare alquanto probabile. In pratica si tratta di una condizione ottimale che chiama in causa la qualità della muratura, dalla quale dipende l'ampiezza angolare del cuneo e la stessa resistenza che la parete oppone allo strappo. E' chiaro quindi che la conoscenza della sola geometria strutturale non è sufficiente per fare previsioni realistiche sul tipo di risposta attesa.



1.2 Meccanismi di danno elementari per pareti ortogonali connesse.

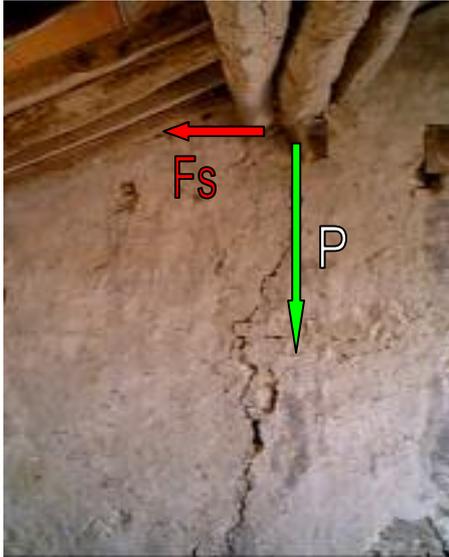
Sono molteplici i fattori in grado di influenzare l'innesco del cinematismo: la qualità delle connessioni fra i due muri ortogonali, il tipo di muratura e le caratteristiche di posa in opera dei materiali, nonché gli spessori, l'altezza e tutti i parametri geometrici condizionano la risposta globale 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 articolato e difficile da analizzare, ma potenzialmente più stabile, a condizione che si possano sfruttare le possibilità che offre ciascun elemento strutturale per la creazione di connessioni efficaci.

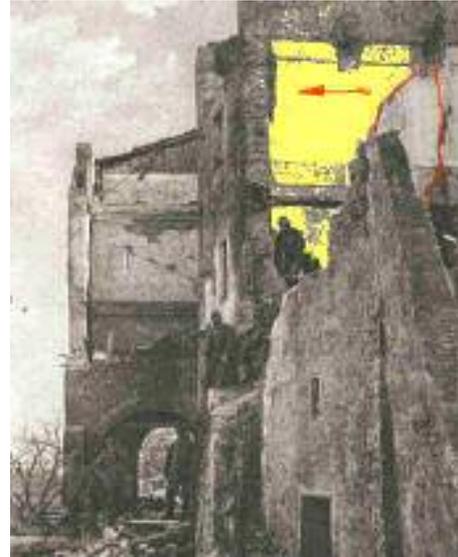


1.3 Influenza degli orizzontamenti lignei orditi in direzione ortogonale o parallela alla direzione di propagazione del sisma

In questo modo si possono largamente compensare gli effetti negativi determinati dalle travi maestre dei solai in legno, che trasferiscono forze concentrate agli appoggi capaci di sconnettere la muratura e di indirizzare la formazione delle fessure su percorsi preferenziali, in relazione alla direzione del sisma ed alla tessitura delle orditure.



1.4 Esempio di lesione di distacco convergente sull'appoggio della trave



1.5 Quadro fessurativo condizionato dalla posizione delle travi maestre - Citerna (PG), Terremoto del 26 aprile 1917

L'innesto delle travi determina ad esempio una concentrazione di sforzi che influenza la formazione del quadro fessurativo e determina l'ampiezza del cuneo di distacco nella parete complanare al sisma. La forza sismica agente in direzione parallela alle travi tende invece a produrre lo sfilamento delle orditure ed il ribaltamento del muro d'imposta.

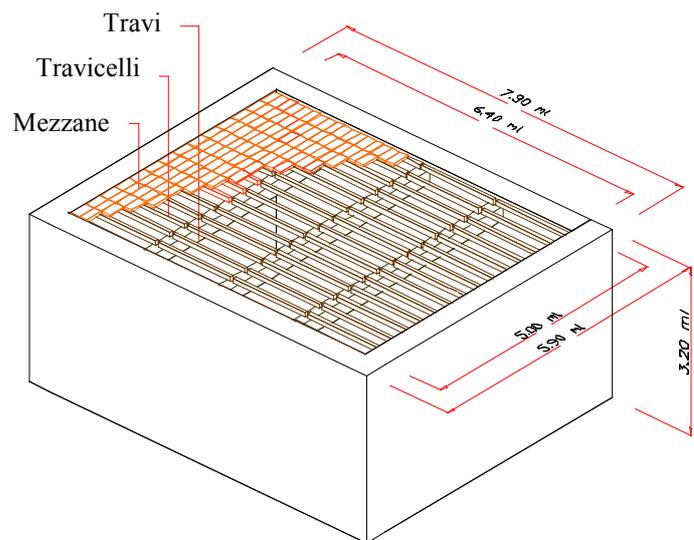
Gli esempi illustrati nelle figure costituiscono prove evidenti degli effetti prodotti dalle azioni sismiche complanari e della reciproca interazione fra solai lignei e muri d'appoggio.

Per comprendere meglio questi fenomeni non è sufficiente fare riferimento ai semplici schemi sopra analizzati, che offrono un'idea piuttosto generica sulla risposta di una struttura muraria alle azioni orizzontali.

Una configurazione più significativa da prendere in esame è certamente quella della cellula elementare chiusa, delimitata da pareti perimetrali e da un solaio di copertura secondo lo schema riportato in figura.

In questo caso il problema diventa ancora più complesso, ma la configurazione si avvicina a quella reale delle strutture murarie, mentre le tipologie dei meccanismi di danno sono comunque riconducibili a quelle sopra analizzate.

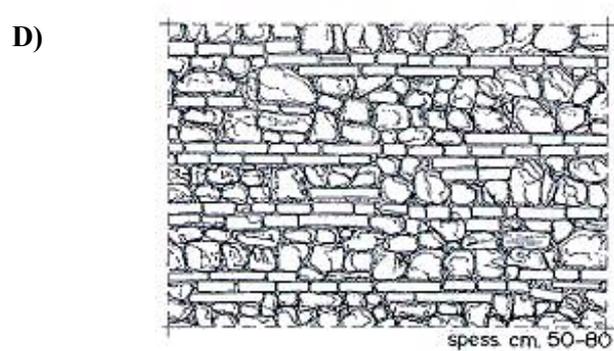
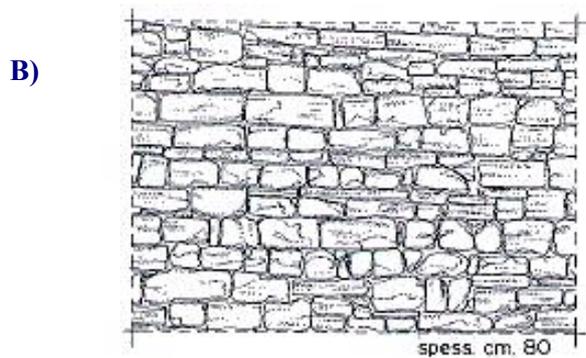
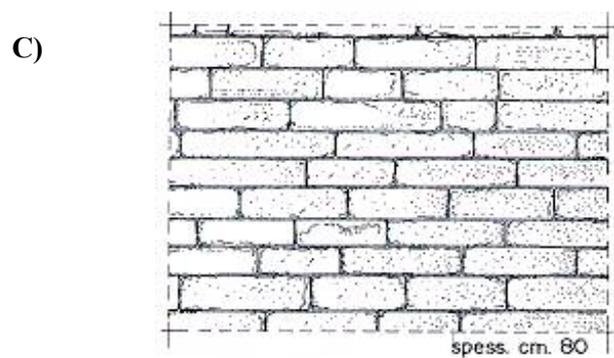
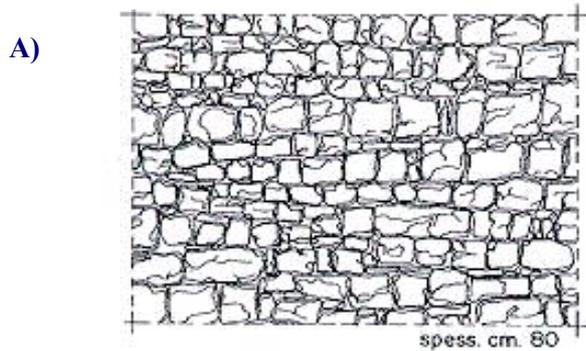
Tuttavia, prima di scendere nel dettaglio dell'analisi di strutture così articolate, è necessario chiarire alcuni aspetti determinanti per la comprensione dei fenomeni fisici elementari che condizionano la risposta delle pareti murarie singole e isolate.



1.6 Schema strutturale di una cellula muraria chiusa superiormente

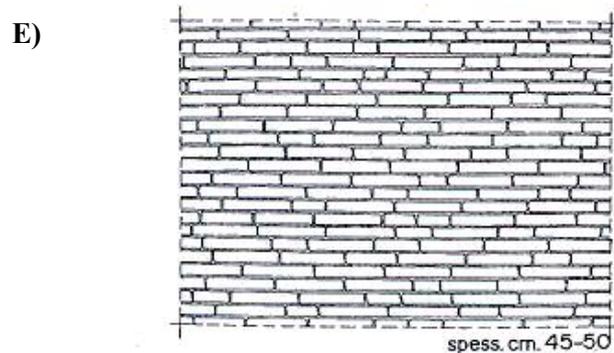
Soprattutto, è indispensabile mettere in relazione i tipi di danno che si manifestano con maggiore frequenza con le caratteristiche fisico-meccaniche della muratura.

Le ricerche sviluppate in questi ultimi anni sulla tipologia delle murature tradizionali ci sono estremamente utili, anche se ai fini delle verifiche statiche bisogna evitare una eccessiva caratterizzazione, spinta oltre l'osservazione dei fattori veramente significativi per la definizione della qualità muraria e quindi per l'analisi del comportamento.



1.7 Esempi di murature tradizionali in pietrame e laterizio:

- A - Muro di pietrame sgrossato;
- B - Muro di pietrame di cava;
- C - Muro di pietra con paramento a conci squadrati;
- D - Muratura di pietrame con ricorsi di mattoni;
- E - Muratura di mattoni o mista di pietrame con paramento laterizio.

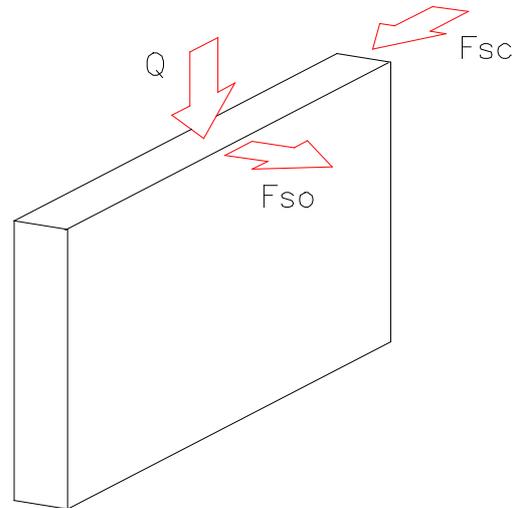


1.3 Comportamento di pareti isolate.

Per un approccio razionale, è consigliabile procedere in via preliminare con l'esame di una parete singola ed isolata sottoposta a configurazioni di carico elementari, a partire dall'azione dei soli carichi statici verticali (Q), per poi tenere conto degli effetti prodotti dalle azioni sismiche ortogonali al piano (Fso) e quindi passare al problema molto più complesso, rappresentato dalla risposta sismica alle forze complanari (Fsc).

E' necessario tenere presente che le murature sono elementi strutturali destinati principalmente a contrastare le azioni statiche verticali, mentre le azioni sismiche orizzontali introducono 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.



1..8 Parete sottoposta a:
 Q – Carichi statici verticali
 Fsc – Forza sismica complanare
 Fso – Forza sismica ortogonale

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.

Agli inizi dell'Ottocento Nicola Cavalieri San-Bertolo, nelle sue *Istituzioni di Architettura Statica ed Idraulica*¹, riassume questi 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 dà il nome di malta o cemento, la quale avvolge 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 in elementi artificiali o in blocchi naturali squadrati non richiede particolari conoscenze ed abilità per la corretta posa in opera, mentre, al contrario, l’uso di pietrame sbizzato secondo le tecniche tradizionali mette oggi in difficoltà pure i muratori dotati di maggiore esperienza.

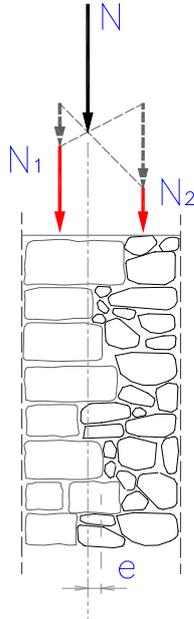
Per ragioni economiche, a volte per motivi puramente estetici, gran parte delle murature storiche presenta caratteristiche costruttive disomogenee, caratterizzate da paramenti che si differenziano sia per la qualità, sia per il tipo e la forma dei materiali impiegati.

Nelle murature medievali, ad esempio, è diffuso l’utilizzo della pietra a vista, combinata con elementi di spoglio recuperati da crolli o da scarti di lavorazione, mentre nei muri di epoca rinascimentale predomina la componente laterizia o mista pietra-laterizio, spesso abbinata a pietrame di recupero utilizzato per il paramento interno.

¹ “Istituzioni di Architettura Statica ed Idraulica” di Nicola Cavalieri San-Bertolo, Ingegnere Superiore nel Corpo di Acque, e Professore nell’Archiginnasio Romano della Sapienza (Dalla Tipografia Cardinali e Frulli). Bologna M DCCC XX VII)

1.3.1 Effetti prodotti dai carichi verticali

Nelle murature così costituite non vi è perfetta corrispondenza fra l'asse geometrico della parete e quello delle rigidezze, rispetto al quale vengono calcolate le eccentricità dei carichi, per cui può accadere che sforzi perfettamente centrati inducano sollecitazioni di pressoflessione per diversa ripartizione dei carichi assiali fra i due paramenti.



1.9 Ripartizione dei carichi statici verticali nelle murature con paramenti disomogenei

La realizzazione di un paramento esterno con apparecchio di pietre squadrate, distinto dalla parte interna del medesimo caratterizzata da minore qualità realizzativa, come si rileva in molti muri perimetrali medievali con pietra a vista, può amplificare questo anomalo comportamento statico.

La tendenza al distacco dei paramenti è associata alla forma delle pietre ed al modo in cui vengono disposte per dare corpo alla muratura; fattori che influiscono notevolmente sulla risposta strutturale.

Se il contatto fra le pietre avviene senza un efficace ingranamento, l'effetto può essere pericoloso, per l'insorgenza di forze inclinate necessarie per l'equilibrio, che rendono la muratura "internamente spingente".

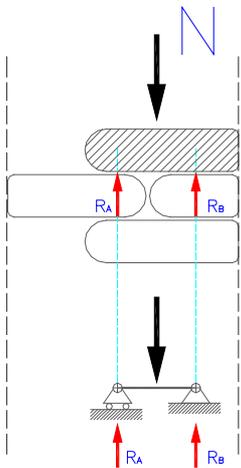
Questa condizione tende a produrre il distacco dei paramenti e si vedrà in seguito come la stessa azione dannosa si riscontra anche in direzione complanare alla parete.

Al contrario, la sovrapposizione dei blocchi garantisce l'equilibrio attraverso il trasferimento di sole forze verticali.

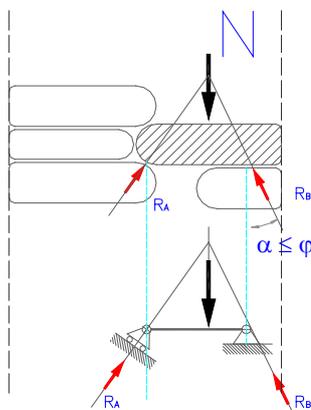
La conseguenza più preoccupante è determinata dal distacco dei paramenti, favorito dalla carenza di connessioni e dalla "spinta interna" che agisce nella fase d'innescò, ma perde effetto con l'evoluzione del meccanismo, che progredisce per sopraggiunta crisi di stabilità dei sottili paramenti distaccati.

Tutto ciò ha effetti negativi su quel comportamento monolitico che si ricerca sistematicamente nella costruzione di qualsiasi muratura e che ne costituisce il più importante indicatore di qualità.

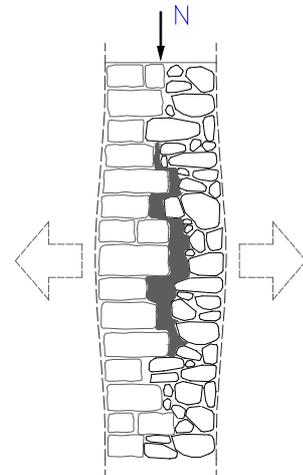
In effetti, gli aspetti analizzati hanno grande influenza sul comportamento delle murature, certamente superiore alla stessa qualità delle malte impiegate ed alle caratteristiche meccaniche delle pietre, che tuttavia sono elementi da non sottovalutare. In particolare, le malte assumono un ruolo molto importante nelle murature incoerenti, realizzate con pietrame di piccola pezzatura.



1.10 Condizioni di equilibrio di elementi lapidei ingranati fra i due paramenti



1.11 Effetti spingenti nella muratura costituita da elementi non bene ingranati



1.12 Distacco dei paramenti associato a fenomeno di instabilità

1.3.2 Risposta alle azioni sismiche ortogonali.

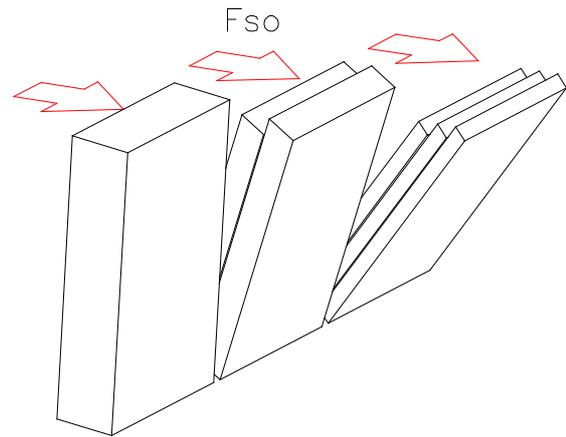
Il comportamento a mensola dei muri isolati sottoposti alle azioni orizzontali, già introdotto in premessa, è stato analizzato ed illustrato in modo efficace da J. Rondelet agli inizi del 1800, e ripreso in seguito in molti trattati sull'edilizia storica.

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.



1.13 Meccanismo di ribaltamento per muro monolitico, oppure a doppio o triplo paramento.

Le murature idonee ad assorbire le azioni ortogonali sono, quindi, quelle che a parità di spessore garantiscono il migliore ingranamento fra i due paramenti.

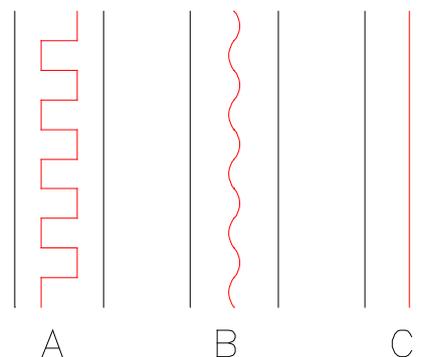
Spesso, anche se può apparire paradossale, sono proprio i muri di spessore elevato a presentare minori connessioni trasversali, mentre quelli di spessore contenuto, rispetto alle dimensioni delle pietre, assumono una configurazione ottimale per un comportamento pressoché monolitico; il tutto dipende comunque dalle caratteristiche geometriche degli inerti e dalla qualità della malta.

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.

I disegni in Fig. 1.14 rispondono ad un giudizio qualitativo basato su questo fattore attraverso schemi piuttosto efficaci.

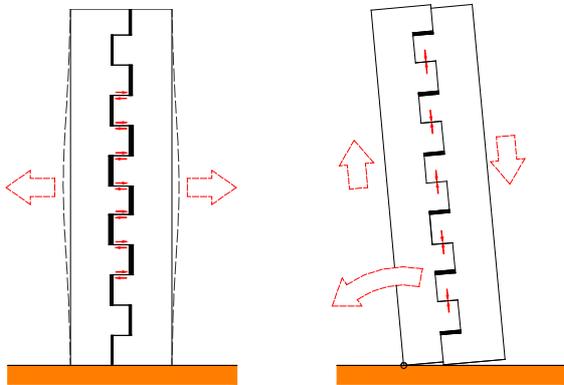
Il muro A è in grado di assicurare un comportamento monolitico, mentre il muro B ha dei margini di resistenza inferiori.

La completa assenza di collegamenti è rappresentata dal tipo C, cui corrisponde una parete a doppio foglio, incapace di contrastare qualsiasi azione di scorrimento lungo il piano medio.



1.14 Schematizzazione del livello di ingranamento dei paramenti:
A-Buono B-Medio C-Assente

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.



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

Una semplice equazione matematica permette di calcolare il moltiplicatore imponendo l'uguaglianza fra il momento resistente dovuto al peso proprio della parete ed il momento spingente determinato dal sisma.

Nel caso A il valore di "c" è fornito dal rapporto fra lo spessore e l'altezza del muro: $c=s/h$. Per tale motivo nel caso C il moltiplicatore si dimezza; la configurazione B, quella intermedia, è la più difficile da esaminare, ma ovviamente il moltiplicatore assumerà un valore compreso fra quelli delle due configurazioni estreme.

Per un ulteriore approfondimento nell'analisi di questo tipo di meccanismo è opportuno prendere in esame la cellula elementare, argomento che verrà ripreso più avanti.

1.3.3 Risposta alle azioni sismiche complanari.

Molto più complesso, come già anticipato, è il problema dell'analisi di setti murari sottoposti ad azioni sismiche complanari. Questo problema riveste grande importanza per la stabilità globale dell'organismo edilizio, perché alle pareti disposte nella direzione del sisma compete il ruolo di controventi, in grado di contrastare il ribaltamento di primo modo dei muri ortogonali.

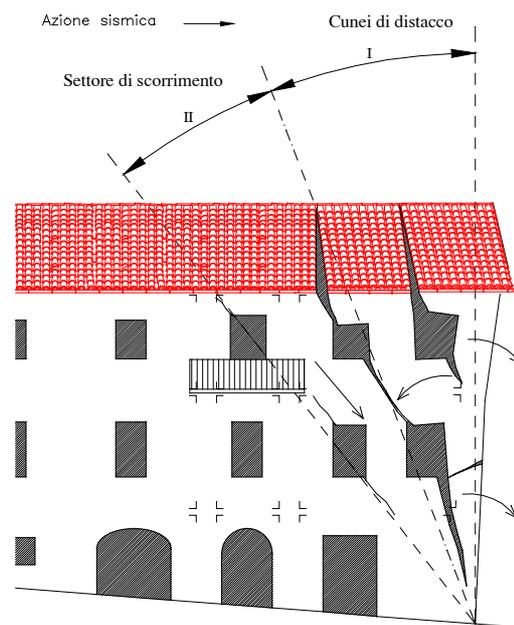
Secondo le norme vigenti, ciascun setto deve avere una lunghezza superiore di almeno 1/3 all'altezza, per far prevalere la resistenza a taglio rispetto al ribaltamento flessionale già visto per i meccanismi di primo modo. L'osservazione di situazioni reali costituisce un utile riferimento che suggerisce un percorso privilegiato per l'analisi strutturale. Nelle facciate degli edifici a schiera, ad esempio, si manifesta un quadro fessurativo tipico che mostra lesioni con profilo inclinato, concentrate principalmente in corrispondenza delle testate e indirizzate verso la base estrema.

La ragione di tale comportamento è intuitiva, ma trova anche una giustificazione scientifica che si evidenzia attraverso una semplice analisi statica vettoriale.

La combinazione della forza peso con la componente sismica orizzontale genera una risultante di progetto inclinata di un angolo pari all'arcotangente del coefficiente sismico, per cui è possibile individuare una porzione del muro di testata per la quale la risultante delle forze agenti va a cadere oltre la base d'appoggio e pertanto soggetta a ribaltamento.

La costruzione grafica permette di individuare il settore angolare di ampiezza variabile che, in relazione al tipo di muratura, tende a distaccarsi ruotando attorno alla base.

In realtà non è dato conoscere a priori con certezza l'ampiezza angolare di detto cuneo, a meno di un'analisi approfondita del tipo di muratura. Per logica, si è portati di far coincidere la linea di strappo con l'inclinazione della risultante stessa; in questo modo si avrebbe una corrispondenza interessante fra ampiezza del cuneo e coefficiente di intensità sismica.



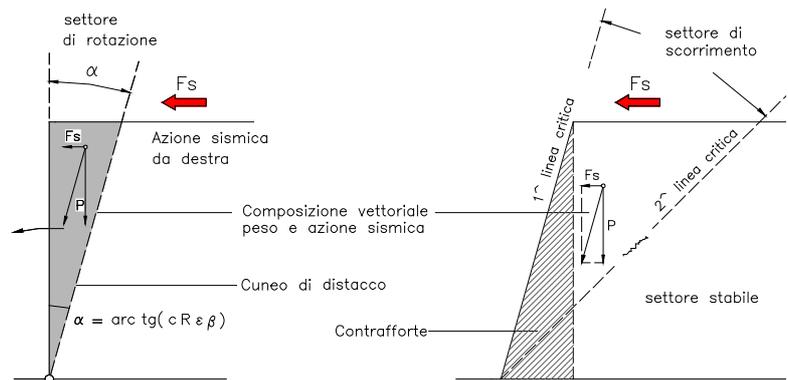
1.16 Meccanismo di danno di testata di un aggregato edilizio.

Tuttavia, in questo modo viene meno qualsiasi relazione diretta con il tipo e qualità della muratura, mentre in realtà è da escludere un rapporto puramente geometrico tra forma del cuneo e direzione delle forze agenti, per cui il profilo dello strappo è da associare alle caratteristiche della muratura e non all'intensità del sisma. La lesione di distacco tende a formarsi lungo linee preferenziali definite dall'allineamento dei giunti e prive di ingranamenti, mentre l'intensità sismica influisce solo sulla probabilità di attivazione del cinematismo.

E' necessario pertanto comprendere meglio gli aspetti fisici che regolano i fenomeni di rottura nel piano, per evidenziare i fattori che influiscono sull'innescò e sull'evoluzione delle modalità di danno.

L'analisi dei cinematismi di collasso comporta però dei problemi che riguardano la definizione delle catene cinematiche.

Al riguardo, si distinguono due situazioni limite: la prima è quella in cui il quadro fessurativo permette di riconoscere con chiarezza i cinematismi strutturali in atto; l'altra, più complessa, è caratterizzata dall'assenza di qualsiasi segno indicativo dei potenziali meccanismi di danno. In questo caso è più che mai necessario disporre di criteri oggettivi per una razionale costruzione dei meccanismi da esaminare.



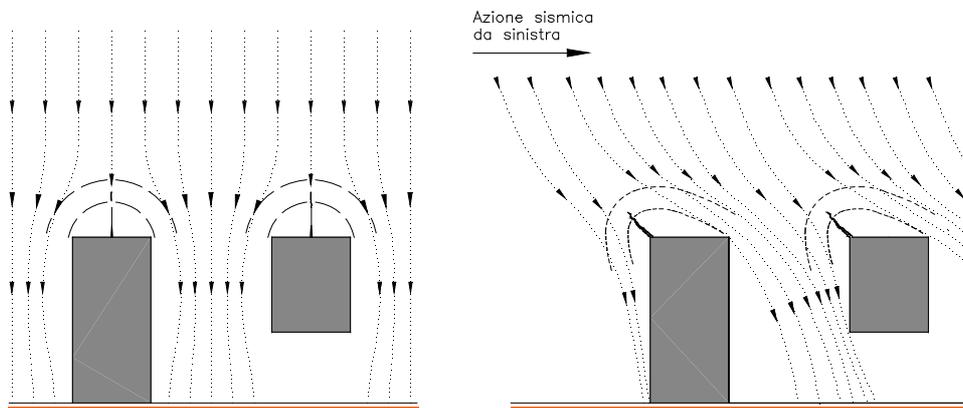
1.17 Schema del meccanismo di testata.

1.4 Modello ad archi virtuali e criteri di analisi strutturale mediante i 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.

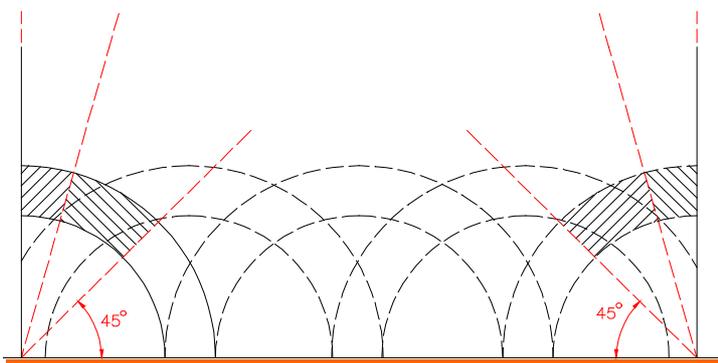
Si osserva, in particolare, che i meccanismi resistenti si instaurano in condizioni statiche e sismiche attraverso la formazione spontanea di archi di scarico, la cui conformazione è condizionata dalla presenza e dalla disposizione di eventuali aperture.

L'innescò delle fessure riflette il sistema di diffusione degli sforzi, per cui in condizioni statiche si formano lesioni in asse alle aperture, mentre l'azione sismica sposta la lesione verso gli appoggi, dove idealmente traslano le chiavi degli archi resistenti.



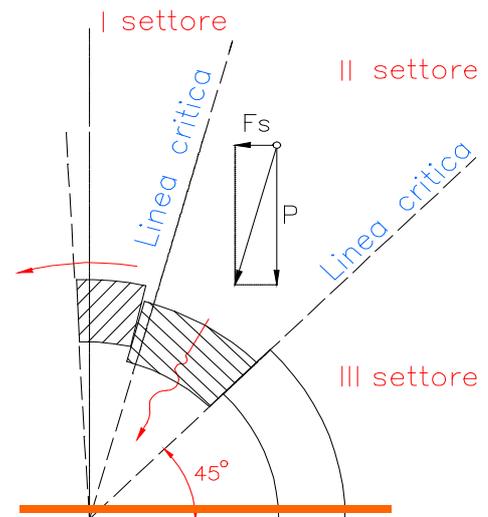
1.18 Diffusione dei flussi di compressione nei pannelli forati in condizioni statiche e sismiche

Il metodo proposto, finalizzato ad una successiva verifica numerica, peraltro 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, 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, pertanto lontana dalla geometria ipotizzata. Nonostante l'apparente incongruenza, il modello si rivela particolarmente efficace nel simulare la risposta alle azioni sismiche complanari; questo perché la formazione di macroelementi ed i cinatismi indotti dalle spinte orizzontali sono caratterizzati da un'evoluzione riconducibile alla meccanica degli archi.



1.19 Configurazione della parete secondo il modello ad archi virtuali

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



Il modello virtuale, pertanto, non ha alcuna relazione diretta con la disposizione degli inerti e con la tessitura del paramento murario, ma favorisce l'analisi del comportamento meccanico e indirizza verso la definizione di appropriati interventi di consolidamento.

La successione delle arcate virtuali termina alle estremità della parete con due semiarchi che evidenziano una precaria stabilità. 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'innescio 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 cinatismo di crisi della testata.

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, tuttavia è opportuno evidenziare alcune varianti significative.

Un "muro di sabbia" incoerente si comporta in apparenza allo stesso modo; in realtà il primo settore, che corrisponde al cuneo di massima spinta, tende a scivolare sul secondo e non a ruotare rispetto alla base come accade nel muro di pietrame; inoltre, nel caso del terreno, il fenomeno si manifesta per effetto del solo peso proprio. Nella muratura, invece, c'è bisogno di un'azione orizzontale capace di rompere l'equilibrio limite determinato dalla resistenza a taglio dovuta alla coesione; la forza orizzontale che produce lo strappo del cuneo è la stessa che poi attiva il moto di rotazione.

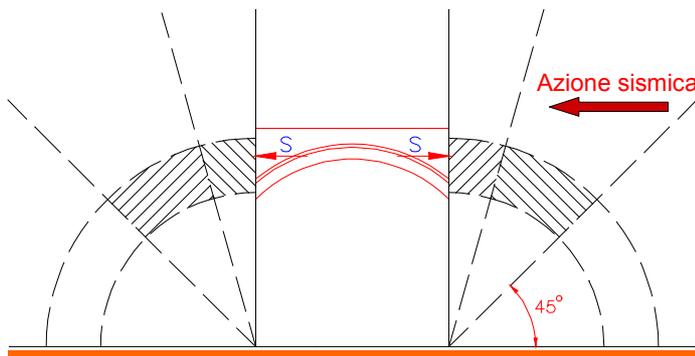
Nel primo settore prevale quindi la rotazione attorno alla base, mentre il secondo settore scivola lungo un piano inclinato delimitato dalla seconda linea critica, che nel confronto con la spinta delle terre è assimilata al piano di natural declivio, al di sotto del quale il terreno resta escluso da qualsiasi altro fenomeno di dissesto.

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 e che, al riguardo, offre una valida chiave interpretativa dei meccanismi resistenti attivati.

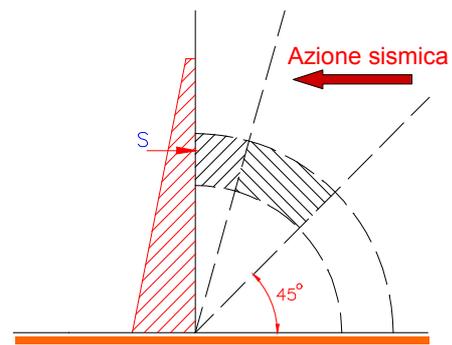
L'impiego degli speroni, ad esempio, largamente utilizzati nell'edilizia storica, è giustificato dalla spinta equilibrante che sono capaci di trasmettere ai semiarchi di estremità; allo stesso modo gli archi di sbadacchio assolvono la funzione di vere e proprie chiavi per la chiusura di semiarchi contrapposti.

Uno degli interventi più efficaci consiste comunque nella disposizione di tiranti complanari alla parete, vincolati alle testate mediante robuste chiavi di ancoraggio.

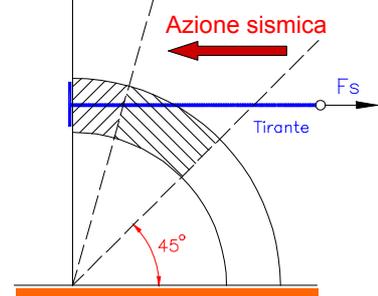
L'efficacia dell'azione stabilizzante si intuisce a livello qualitativo, mentre è difficile impostare calcoli di verifica attraverso un modello matematico altrettanto intuitivo.



1.22 Rinforzo con archi di sbadacchio



1.21 Rinforzo con speroni



1.23 Rinforzo con tiranti

Un'analisi critica delle tecniche antisismiche premoderne richiederebbe altri spazi di approfondimento, tuttavia la chiave di lettura proposta è sufficiente per comprendere i meccanismi resistenti che si instaurano nelle murature e le cause che inducono l'insorgenza dei principali fenomeni di dissesto.

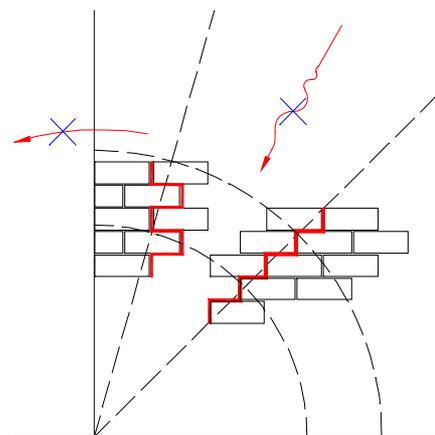
Le considerazioni suggerite dallo schema ad archi virtuali potrebbero indurre a ritenere che tutte le murature esposte ai meccanismi di danno evidenziati richiedano dei provvedimenti in grado di impedirne l'attivazione. In realtà anche in questo caso entrano in gioco le caratteristiche della muratura ed ogni situazione richiede valutazioni specifiche.

In alcune pareti, infatti, i cinematismi che determinano la rotazione del primo settore e lo scorrimento del secondo, così come sopra illustrati, sono scongiurati dalla stessa qualità della tessitura muraria.

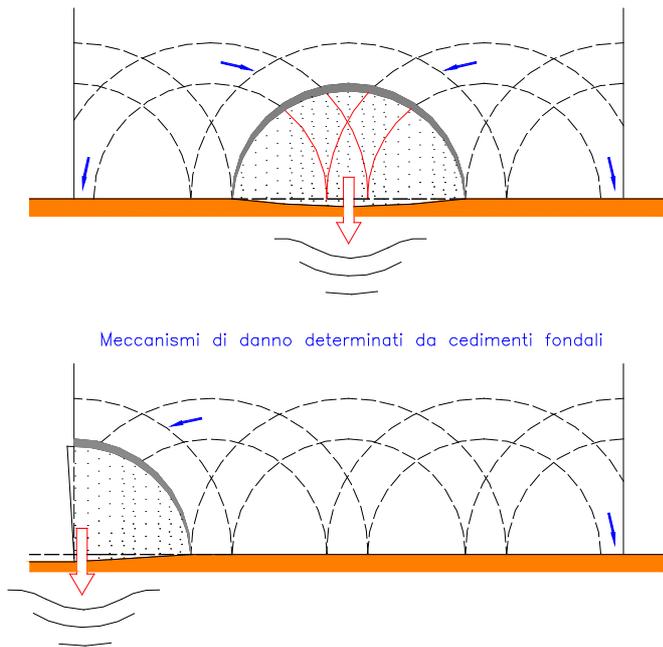
L'effetto catena assicurato dall'ingranamento dei blocchi e dalla regolarità dei piani di posa, non consente un facile innesco dei meccanismi illustrati, per cui la parete tende a conservare la propria integrità strutturale anche in presenza di azioni sismiche.

Gli interventi di scuci-cuci che si eseguono nelle murature storiche hanno sostanzialmente questa funzione. Le condizioni cambiano per le murature più scadenti, quelle realizzate con ciottoli di pietra di piccola pezzatura e prive di *ortostati*, ovvero di elementi disposti in senso longitudinale che creano connessioni a cavallo delle linee critiche.

Il modello ad archi virtuali permette di interpretare anche altri fenomeni di dissesto che interessano le strutture murarie, in presenza di cedimenti fondali.



1.24 Effetto catena assicurato dall'ingranamento delle pietre nelle murature a blocchi regolari.



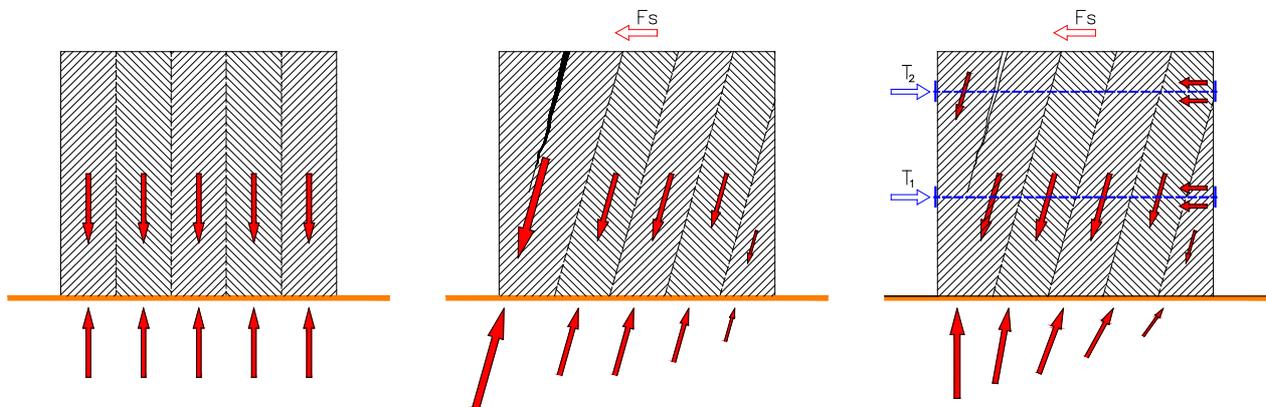
1.24b Meccanismi di danno dovuti a cedimenti fondali che si possono verificare in condizioni statiche o con maggiore probabilità sotto l'effetto di azioni esterne come quelle sismiche.

La successione di archi che definiscono la struttura ideale della parete permette di individuare il meccanismo resistente che si instaura in seguito ad un eventuale cedimento del terreno in posizione centrale o d'estremità. Le lesioni che si vengono a formare in linea di principio seguono il profilo di un arco che delimita la porzione di parete interessata dal fenomeno di distacco.

Quando il cedimento si verifica in corrispondenza del cantonale il meccanismo, ugualmente leggibile, risulta molto più pericoloso, per la possibile attivazione di effetti secondari facilmente intuibili.

Il sistema di archi privato dell'appoggio terminale, infatti, assume una configurazione alquanto precaria, con una porzione di muratura a sbalzo che produce un forte incremento degli stati di compressione sul terreno.

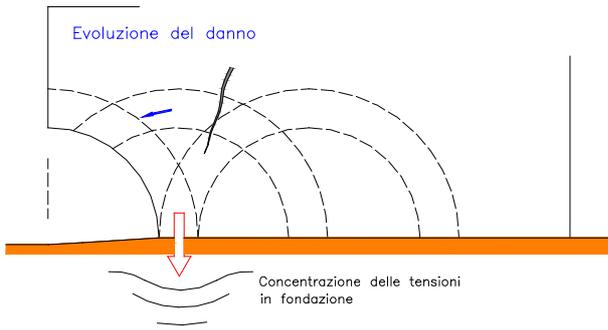
Sotto l'effetto del sisma gli sforzi trasmessi al terreno tendono a concentrarsi ulteriormente alle estremità della parete e nelle strutture già interessate da cedimenti fondali le condizioni di esercizio si aggravano sensibilmente.



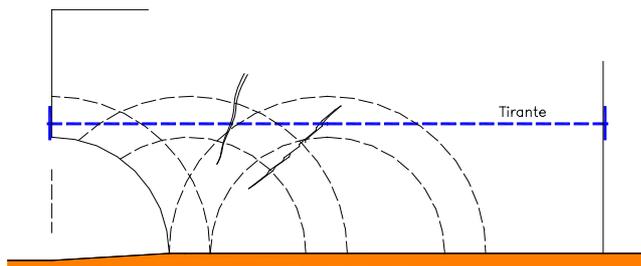
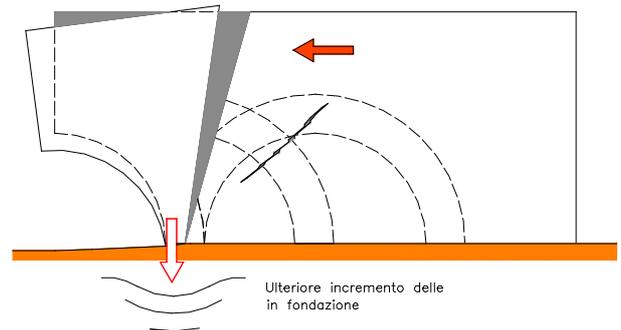
1.24c Distribuzione qualitativa dei carichi sulla fondazione in condizioni statiche e sismiche. I tiranti complanari riportano a monte le forze sismiche mentre fanno arretrare la forza risultante sull'estremità di valle.

Possono formarsi in questo modo delle lesioni che coinvolgono ampie porzioni di parete nell'attivazione di nuovi meccanismi di danno.

L'inserimento di tiranti complanari permette non solo di contrastare l'attivazione e l'evoluzione dei cinematismi, ma soprattutto impedisce la pericolosa concentrazione di carichi sui tratti di fondazione che sostengono le estremità della parete. Questo produce un miglioramento indiretto, ma significativo, anche nella configurazione dei carichi trasferiti alla fondazione, attraverso una sostanziale redistribuzione degli sforzi.



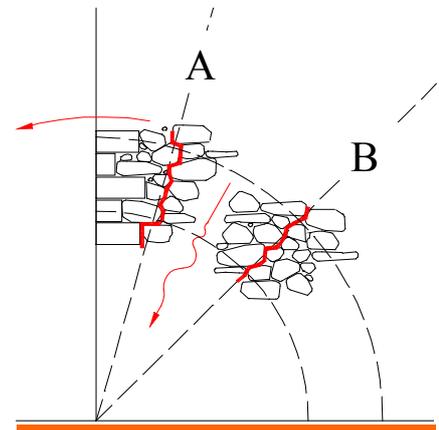
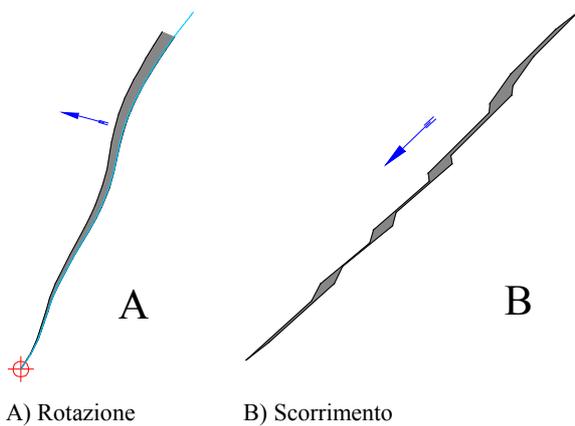
1.x3 Evoluzione del danno e azione di contrasto de tiranti.



1.x4 Azione di contrasto garantita dal tirante di parete con riduzione delle tensioni trasmesse al terreno. Nel punto estremo dell'appoggio vengono comunque trasmessi sforzi elevati, ma vengono scongiurati gli incrementi dovuti alla rotazione del solido.

1.5 *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 un'evoluzione realistica 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 .



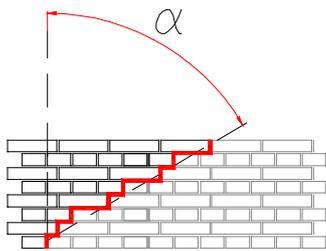
1.25 Posizione delle lesioni e schema del cinematismo nelle murature prive di ingranamenti.

Quadri fessurativi con simili caratteristiche sono molto frequenti e confermano una tendenza al dissesto tipica delle murature storiche.

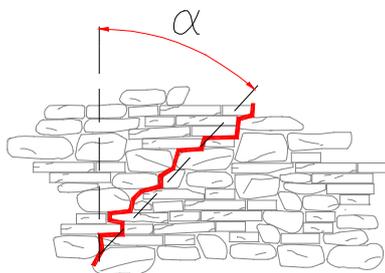
Il cinematismo elementare sopra descritto è perfettamente sovrapponibile a situazioni di dissesto realmente riscontrate negli edifici storici realizzati in muratura di pietrame incoerente, come nell'esempio a lato.

Logicamente 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 caso contrario potrebbe prevalere nuovamente il moto rotazionale sulla componente di scorrimento.

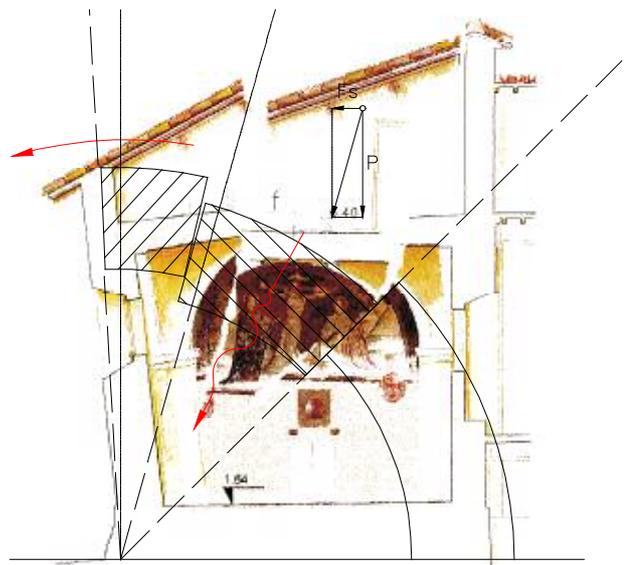
In base a quanto premesso, emerge un parametro caratteristico di ciascun tipo di muratura rappresentato dall'angolo critico α che individua la prima linea critica, la cui conoscenza, come si vedrà in seguito, è fondamentale per la trattazione analitica del problema.



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



1.28 Muratura mista di pietrame e laterizio.



1.26 Esempio reale di dissesto riconducibile al meccanismo illustrato².

L'angolo critico α del primo settore costituisce una caratteristica propria di ogni muratura così come l'angolo d'attrito per un terreno.

A seconda del tipo e qualità dei materiali impiegati e della tecnica adottata per la posa in opera, è possibile individuare l'angolo critico attraverso un procedimento grafico, che permette di individuare 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 modificare la disposizione dei mattoni per migliorare o peggiorare la risposta alle azioni complanari.

Da un confronto fra alcuni tipi di murature, si osserva che il muro di soli ortostati sembra il più adatto a contrastare l'azione sismica complanare, ma evidenzia un pessimo comportamento nei confronti delle sollecitazioni ortogonali.

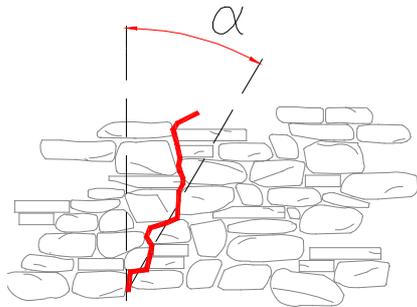
Il muro di soli diatoni si comporta precisamente all'inverso, per cui appare ovvio disporre i mattoni in alternanza testa/costa, per assicurare un buon collegamento sia in senso trasversale che longitudinale. Nonostante questo i muri di mattoni murati tutti per testa sono molto diffusi, probabilmente perché consentono una posa in opera molto più rapida e pertanto più economica.

² Parete absidale della chiesa di San Michele Arcangelo di Userna – A cura dell'ITCG "I. Salviani" – Città di Castello (PG), Petrucci Editore, 1998.

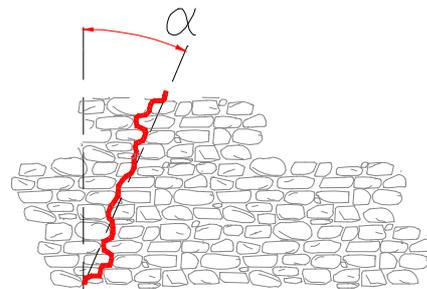
Nei paramenti in muratura di pietrame o mista l'angolo critico costituisce uno degli indicatori più significativi della qualità muraria, nonostante il carattere di fattore puramente geometrico.

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.



1.29 Muratura di pietrame (prevalente) mista a laterizio.

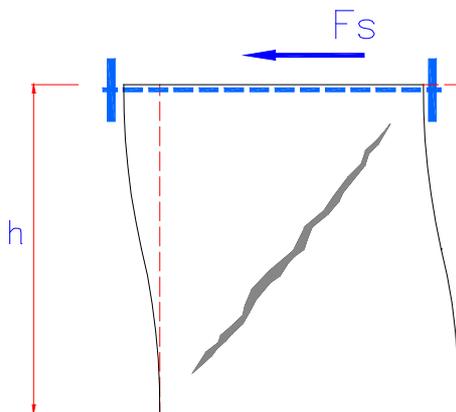


1.30 Muratura di pietrame sbozzato.

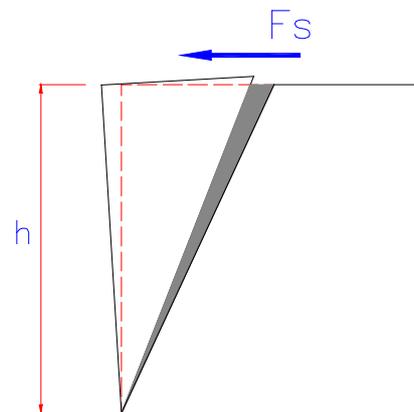
I muri di pietrame realizzati con blocchi di piccola pezzatura sono quelli caratterizzati da maggiore carenza di connessioni nel piano e risultano pertanto più vulnerabili alle azioni complanari. L'angolo critico molto piccolo tende a produrre lo strappo lungo una linea pressoché verticale.

Non si ritiene necessario analizzare altri casi in quanto il metodo grafico illustrato può essere generalizzato.

Quanto anticipato è fondamentale per comprendere i meccanismi di danno dovuti alle azioni complanari ed indirizza verso una trattazione rigorosa del problema; operazione che, come si vedrà in seguito, richiede alcune considerazioni più approfondite sugli aspetti fisici che regolano questo fenomeno di dissesto.



1.31 Parete vincolata (Rottura a taglio)



1.32 Parete libera (Rottura a flessione)

Chi ha esperienza nella verifica sismica degli edifici in muratura con i metodi a macroelementi tipo POR o con algoritmi simili, comunque basati sull'ipotesi di comportamento elastico della muratura considerata come materiale omogeneo ed isotropo, noterà certamente un forte contrasto di quei metodi con il modello statico qui proposto come riferimento.

Nella verifica POR, il setto murario è assimilato ad un "pilastro", dove il rapporto geometrico fra altezza e lunghezza della parete fa prevalere il comportamento a taglio rispetto a quello flessionale.

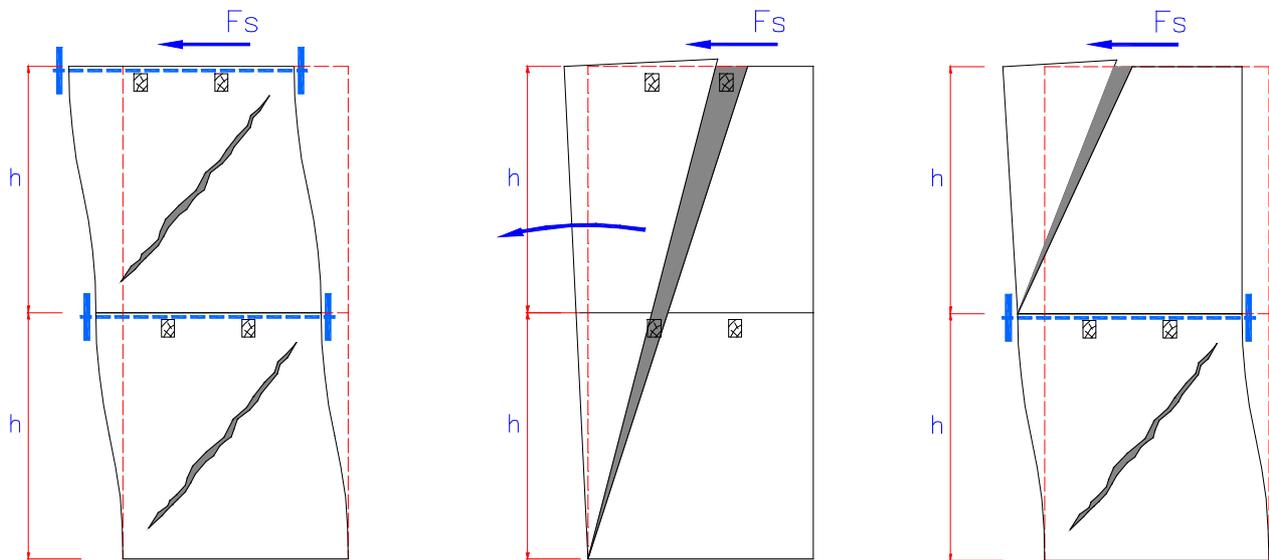
Il quadro fessurativo che ne deriva è caratterizzato dalla formazione di lesioni diagonali incrociate. Le condizioni di congruenza, infatti, impongono che sia la linea base, sia quella di coronamento del muro, non subiscano deformazioni significative essendo vincolate ai cordoli di piano oppure a tiranti.

Il comportamento dei singoli muri così vincolati è certamente assimilabile a quello delle moderne costruzioni in muratura portante, tuttavia queste ultime definiscono un modello strutturale che nel complesso è molto diverso dalla fabbrica tradizionale, costituita da un assemblaggio di elementi staticamente determinati, caratterizzata da vincoli monolateri e ben lontana dal comportamento di struttura elasto-plastica, monolitica, pluriconnessa ed iperstatica che risponde al modello scatolare.

Il comportamento globale in effetti è molto diverso nei due casi. Per averne conferma è sufficiente confrontare i danni prodotti dal terremoto sull'edilizia storica che non ha subito modifiche, rispetto ai danni che si rilevano su edifici nuovi o consolidati.

Nelle murature storiche prive di cordoli o tiranti, prevale infatti la rottura a flessione con formazione di lesioni lungo le linee critiche, che non hanno alcuna relazione con il quadro fessurativo indotto dai meccanismi di rottura a taglio, responsabili delle caratteristiche lesioni diagonali incrociate.

L'inserimento di tiranti ai piani impone quindi condizioni di congruenza che impediscono il passaggio delle lesioni fra setti sovrapposti; la fessurazione avviene pertanto lungo le diagonali, che costituiscono l'unico profilo congruente con il vincolo imposto dalle catene.



1.33 Risposta sismica di pareti sollecitate nel piano: meccanismi di rottura a taglio e flessione in presenza di orizzontamenti rigidi o di solai deformabili.

Gli schemi grafici evidenziano una chiara differenza del comportamento dei muri in funzione della configurazione dei vincoli; la carenza di connessioni ai piani (figura centrale) facilita l'innesco dei meccanismi di ribaltamento, mentre gli incatenamenti disposti a vari livelli, in quanto efficaci, chiamano in causa la resistenza a taglio delle singole pareti. Gli stessi tiranti, se posti solo su alcuni livelli intermedi della struttura, non garantiscono uniformità di comportamento delle pareti.

Passare da una configurazione di vincolo all'altra appare un'operazione piuttosto semplice, almeno a livello teorico, mentre in pratica è molto difficile da ottenere e richiede complessi sistemi di tirantature ai piani.

La procedura per l'analisi dei setti murari sollecitati a taglio secondo gli schemi di verifica adottati nel POR è nota e non necessita di alcun approfondimento, soprattutto per lo scarso significato che può avere in questo ambito.

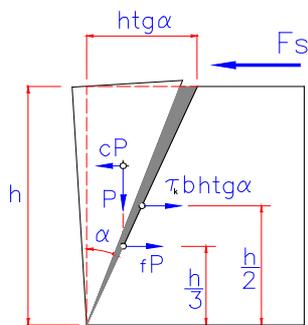
La trattazione analitica del tema relativo al meccanismo di ribaltamento o scorrimento nel piano in assenza di vincoli sommitali merita invece maggiore attenzione e richiede la definizione di un appropriato modello di calcolo, semplice quanto aderente al reale comportamento della struttura.

1.6 Criteri per la trattazione analitica del problema.

I meccanismi di rottura a flessione caratterizzati dalle modalità di collasso descritte non sono mai stati oggetto di analisi esaurienti, se non a livello puramente qualitativo. I principali modelli di analisi strutturale non prendono in considerazione tale modalità di collasso, come accade pure per i meccanismi di danno di primo modo. In realtà sono questi i cinematismi di danno che caratterizzano maggiormente il comportamento delle murature storiche e che richiedono pertanto una trattazione più approfondita del tema.

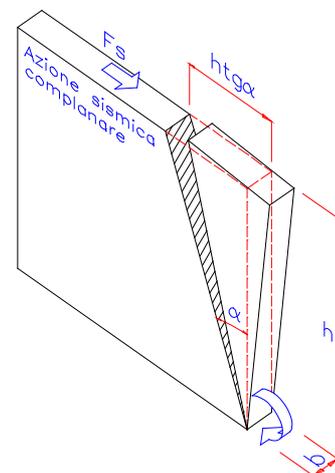
A tale fine è necessario formulare alcune ipotesi preliminari che vengono così riassunte:

- si suppone che la lesione di distacco del cuneo sia perfettamente rettilinea, in modo che lo stesso assuma una forma triangolare;
- il punto di rotazione attorno alla base viene fatto coincidere con l'estremità della parete, anche se tale configurazione è puramente teorica per lo schiacciamento della muratura che si andrebbe a determinare;
- si ipotizza il cuneo in grado di conservare la propria configurazione geometrica e di supportare il cinematismo fino al collasso della struttura per perdita della configurazione di equilibrio.



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

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



1.35 Vista assometrica del cinematismo di collasso

Per un approccio analitico al problema si farà riferimento al modello grafico illustrato in figura, dove sono stati evidenziati i parametri di resistenza che intervengono per contrastare l'innesco e l'evoluzione del cinematismo di collasso.

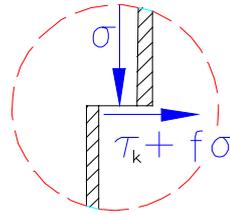
Il modello strutturale si basa su un'analisi statica equivalente, con le forze agenti in direzione orizzontale da destra verso sinistra, in grado di produrre la formazione di una lesione netta lungo la linea critica individuata dal settore angolare α ed il conseguente distacco di una porzione di muratura cuneiforme, fino al raggiungimento della configurazione di collasso per ribaltamento.

In un'ottica di massima semplificazione del modello, si prevede un primo livello di analisi rivolto all'esame di una parete isolata, che permette di 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, comunque irregolare, 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.

La forza sismica che tende a strappare il cuneo trova un primo efficace contrasto nella coesione (espressa dalla resistenza caratteristica a taglio della muratura - τ_k), quindi interviene l'attrito (f) esercitato lungo la superficie di distacco, che può essere stimato attraverso la formula di Coulomb.



1.36 Formula di Coulomb



1.37 Esempio reale.

Le risultanti delle due forze equilibranti hanno però posizioni e bracci diversi, come si rileva nello schema grafico di riferimento (Fig. 1.34).

Alla comparsa della prima fessura viene meno il contributo della coesione, pertanto si verifica la condizione corrispondente a $\tau_k = 0$, e resta solo l'attrito a contrastare l'evoluzione del cinematismo; ciò è dovuto al fatto che il solido murario, seppur distaccato, tende a sedersi sulla parte stabile.

L'attrito (f) continua a svolgere un ruolo importante fino a quando l'amplificazione della lesione determina il completo distacco dei due solidi; in questa fase subentra il fattore di forma come ultima risorsa di resistenza atta a contrastare il cinematismo di collasso.

Si comprende così l'importanza che assumono i tradizionali interventi a *scuci-cuci* per il ripristino della continuità muraria nelle pareti lesionate, che permettono di recuperare sia la resistenza per attrito, sia la coesione, fattori spesso risolutivi per la stabilità globale.

La naturale evoluzione del cinematismo, di per sé già piuttosto intuitiva, trova giustificazione anche attraverso un approccio analitico del problema di equilibrio del sistema statico, mediante la costruzione dei diagrammi delle sollecitazioni esterne e della resistenza opposta dalla struttura nelle diverse fasi del dissesto. Le variabili del problema sono costituite dai parametri meccanici della muratura, dalle caratteristiche geometriche e dall'ampiezza angolare del cuneo di distacco.

La verifica sismica consiste nel calcolo del moltiplicatore "c" dei carichi orizzontali che porta ad una perdita di equilibrio del sistema, ovvero del coefficiente minimo fra quelli d'innescò, di fessurazione e di collasso, da confrontare con il valore limite indicato dalle norme per ciascuna zona sismica.

L'equazione di equilibrio si ottiene imponendo la seguente condizione:

<i>Momento spingente:</i>	=	<i>Momento resistente di:</i>
M_s		Coesione - M_{rc} Attrito - M_{ra} Forma - M_{rf}

dove:

$$M_s = (c \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^2 \cdot tg\alpha) \cdot (\frac{2}{3} \cdot h) \quad M_r = \frac{1}{2} \cdot \tau_k \cdot b \cdot h^2 \cdot tg\alpha + \frac{1}{6} \gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot f \cdot tg\alpha + \frac{1}{6} \gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot tg^2\alpha$$

Per cui si ottiene l'espressione del moltiplicatore di collasso per rotazione del primo settore:

$$c_{0R} = \frac{1}{2} \cdot \left(tg\alpha_{crit} + f + \frac{3 \cdot \tau_k}{\gamma \cdot h} \right)$$

L'equilibrio del sistema è assicurato fintanto che il momento resistente, cui contribuiscono le varie componenti, assume valori superiori a quello del momento ribaltante.

In realtà, la condizione di crisi può essere raggiunta sia per ribaltamento del solido murario, sia per superamento della resistenza a compressione della muratura, per effetto di una eccessiva concentrazione degli sforzi in prossimità delle cerniere.

Per questo nei calcoli di verifica si prendono in considerazione due condizioni di carico estreme, corrispondenti rispettivamente al massimo momento ribaltante ed al massimo sforzo normale alla base.

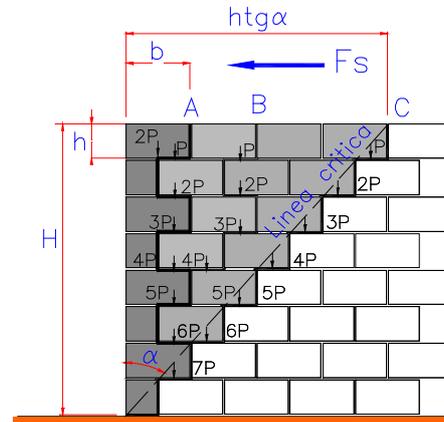
L'esperienza dimostra che quando la muratura è realizzata nel rispetto dei criteri minimi prescritti dalla regola dell'arte, il collasso della struttura muraria avviene per perdita d'equilibrio del sistema, piuttosto che per superamento degli stati tensionali limite.

Un altro importante fattore di resistenza, da considerare in aggiunta ai precedenti è noto come "effetto catena" ed è dovuto all'ingranamento degli inerti (pietre o mattoni) nel piano della parete; questo però non ha effetto lungo la linea critica, ma solo nel settore angolare delimitato dalla stessa.

La trattazione analitica del problema, mette in evidenza la particolarità della linea critica rispetto a tutti gli altri profili teorici di rottura, lungo i quali interviene l'effetto catena, che equivale ad una resistenza a trazione garantito dall'ingranamento dei blocchi.

In questi casi, lo strappo della muratura richiede la rottura o lo sfilamento di alcuni elementi; situazione teoricamente possibile, ma piuttosto improbabile per angoli critici modesti.

Attraverso lo schema grafico di figura 1.38, inoltre, si osserva che le resistenze d'attrito e di coesione sviluppate lungo i profili A, B e C sono le stesse, per cui lo sforzo necessario per lo strappo rimane costante in tutto il settore angolare α .

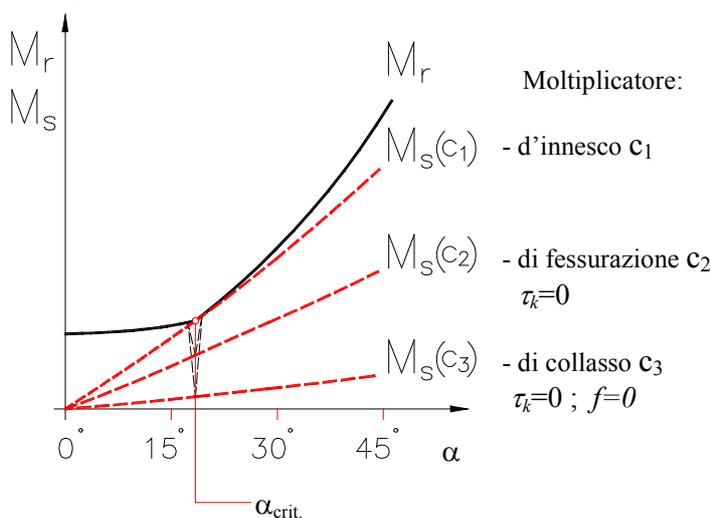


1.38 Contributo dell'attrito e della coesione nel settore a monte della linea critica

Prima di passare ad esaminare situazioni più complesse che richiedono l'introduzione di altre variabili, è opportuno valutare con attenzione gli aspetti che regolano l'evoluzione di questo meccanismo elementare. Una prima considerazione riguarda la natura dinamica del sisma e dell'influenza che può avere la successione di picchi di accelerazione di intensità variabile, capaci di indebolire progressivamente la massa muraria.

Se un primo impulso è in grado di innescare la fessurazione della muratura, un secondo picco di accelerazione di uguale intensità sarà certamente capace di amplificarla, producendo un distacco netto e quello successivo potrebbe portare addirittura al collasso della struttura già indebolita; la forza sismica equivalente applicata staticamente non sembra fornire la stessa sensazione di pericolosità.

Un semplice diagramma cartesiano dove vengono riportate le curve della sollecitazione esterna (Momento spingente - M_s) e della resistenza fornita dal pannello murario (Momento resistente - M_r) in funzione dell'ampiezza angolare, consente di apprezzare le cause e le modalità d'innescò del meccanismo di danno.



1.39- Andamento qualitativo del diagramma dei momenti in funzione del settore angolare.

La struttura muraria anche se si presenta perfettamente integra, evidenzia una debolezza intrinseca nel punto spigoloso della funzione M_r , di ascissa corrispondente all'angolo critico α_{crit} .

La curva del momento spingente M_{s1} , funzione del moltiplicatore "c", va a intercettare quella del momento resistente proprio in corrispondenza dell'ascissa $\alpha = \alpha_{crit}$, per cui determina l'innescò della lesione sullo stesso profilo al valore di $c = c_1$

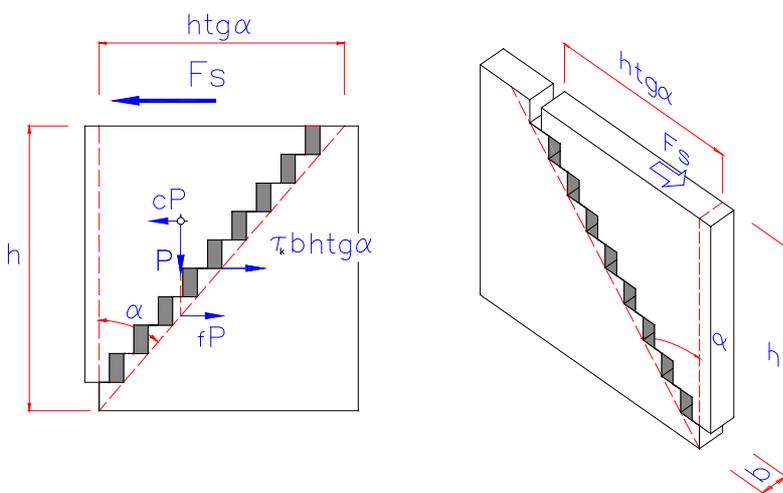
Imponendo $\tau_k=0$ (parete lesionata) il momento resistente si riduce, pertanto il cinematico si attiva per un valore del momento spingente $M_{s2} < M_{s1}$, ovvero per un moltiplicatore $c_2 < c_1$.

Se si pone pure il coefficiente d'attrito $f=0$ (perdita di contatto lungo la lesione), il momento Mr si riduce ulteriormente, per cui si accentua la discontinuità del diagramma all'ascissa $\alpha=\alpha_{crit}$. Il cinematismo, in questo caso, si attiva per un valore del momento spingente $Ms_3 < Ms_2$, ed il moltiplicatore minimo c_3 corrisponde al solo parametro di resistenza determinato dal fattore di forma.

Per una trattazione rigorosa del problema è necessario effettuare anche la verifica a scorrimento del solido distaccato, questo perché intuitivamente l'ampiezza angolare del cuneo murario può favorire lo scorrimento della porzione di parete distaccata piuttosto che la rotazione sopra descritta.

Quando l'ingranamento fra gli inerti garantisce un effetto catena sufficiente ad impedire lo strappo del primo settore, la lesione si forma per effetto dello scorrimento lungo una linea critica più inclinata.

Il moltiplicatore di collasso a scorrimento si ottiene dall'equazione di equilibrio fra il taglio sismico e la resistenza opposta dalla muratura, dovuta in questo caso solo alla coesione e all'attrito, mentre nei confronti dello scorrimento il fattore di forma non produce alcun effetto.



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.

Il meccanismo di rottura a scorrimento si innesca preferibilmente nelle murature con angolo critico caratteristico piuttosto ampio e realizzati con inerti di forma regolare, come quelle in pietra squadrata o di mattoni pieni.

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

<i>Taglio sismico:</i>	=	<i>Resistenza a taglio della parete :</i>
T_s		Coesione (Rc) + Attrito (Ra)

dove:

$$T_s = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^2 \cdot tg\alpha \qquad R = \tau_k \cdot b \cdot h \cdot tg\alpha + \frac{1}{2} \gamma \cdot b \cdot h^2 \cdot f \cdot tg\alpha$$

Per cui si ottiene l'espressione del moltiplicatore di collasso
Per scorrimento del primo settore:

$$c_{0S} = f + \frac{2 \cdot \tau_k}{\gamma \cdot h}$$

Si osserva quindi che la rottura per scorrimento si può verificare lungo un profilo qualsiasi a prescindere dall'angolo critico, infatti l'equazione non contiene alcun riferimento all'ampiezza angolare.

E' possibile comunque individuare un angolo limite di collasso per ciascuna parete, ovvero l'ampiezza angolare del cuneo di distacco al di sotto della quale prevale il cinematismo di rotazione, mentre per angoli superiori la crisi avviene per traslazione.

L'angolo limite si ricava uguagliando le espressioni dei due moltiplicatori, quindi si ha:

<i>Moltiplicatore di collasso per rotazione:</i>	=	<i>Moltiplicatore di collasso per scorrimento:</i>
c_{0R}		c_{0S}

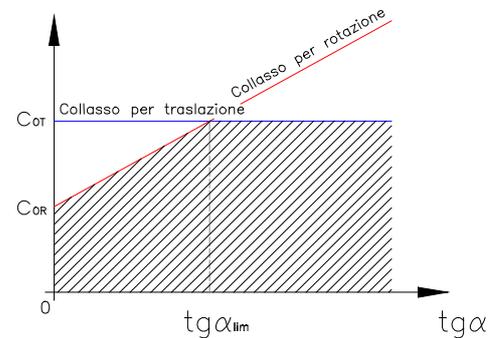
$$\frac{1}{2} \cdot \left(tg\alpha_{lim} + f + \frac{3 \cdot \tau_k}{\gamma \cdot h} \right) = f + \frac{2 \cdot \tau_k}{\gamma \cdot h}$$

per cui:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{lim}} = f + \frac{\tau_k}{\gamma \cdot h}$$

L'angolo limite risulta comunque piuttosto ampio anche per un muro a secco ($\tau_k=0$): infatti, assumendo un coefficiente d'attrito $f=0.4$, un peso specifico $\gamma=2000\text{daN/mc}$ ed un'altezza $h=3.00\text{m}$ si ottiene $\alpha_{\text{lim}}=22^\circ$; è sufficiente considerare una resistenza a taglio anche modesta ($\tau_k=4000\text{daN/mq}$) per spostare il valore di α_{lim} sui 47° .

1.41 Diagramma dei moltiplicatori di collasso espressi in funzione dell'ampiezza angolare.



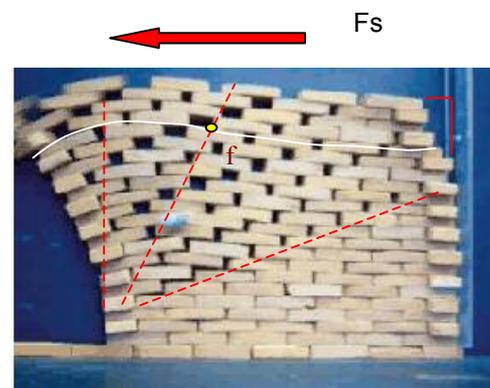
Per una migliore comprensione del fenomeno si è fatto ricorso allo studio di modelli in scala che permettono di apprezzare aspetti del comportamento sismico che sfuggono ad un approccio puramente teorico.

La foto in Fig. 1.42³ mostra la risposta del modello in scala di una parete realizzata con mattoncini murati a secco, sottoposto ad un'accelerazione sismica orizzontale $a_s=0,44\text{g}$; in essa si può apprezzare il diverso comportamento degli inerti in relazione all'ampiezza angolare⁴.

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.

A ciascun settore corrisponde pertanto una diversa modalità di collasso.



1.42 Comportamento dinamico di un modello in scala di muratura a secco.

Un limite oggettivo del modello esaminato è dovuto all'assenza di coesione, trattandosi di muro a secco, pertanto non viene individuato un solido di distacco indeformabile (macroelemento) come ipotizzato nel modello statico; un modello che permette di osservare altri aspetti interessanti è quello realizzato con sabbia bagnata.

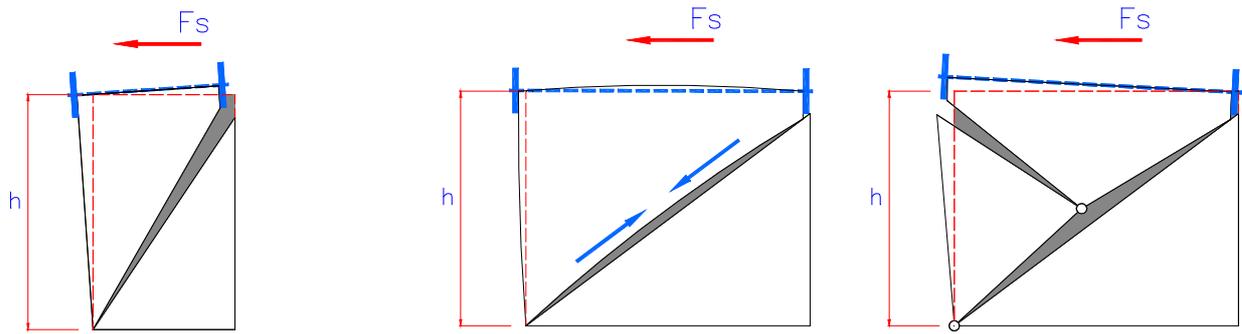
In presenza di una modesta coesione, infatti, si verifica una fessurazione netta del solido che avvicina il comportamento del modello a quello del caso reale.

Anche in questo caso però, sono necessarie alcune precisazioni; la diversità di comportamento rispetto al modello reale deriva dal fatto che il muro di sabbia umida non ha un angolo critico caratteristico, pertanto la fessura si può formare con ampiezze angolari variabili in funzione della sollecitazione, mentre nelle murature la linea di fessurazione è sempre la stessa, individuata dall'allineamento dei giunti a prescindere dall'intensità della sollecitazione sismica.

³ Prove sperimentali su modelli in scala di muratura laterizia a secco eseguite presso il Laboratorio di Costruzioni dell'Istituto Tecnico per Geometri "I.Salviani" – Città di Castello (PG) nell'ambito dell'attività didattica ordinaria.

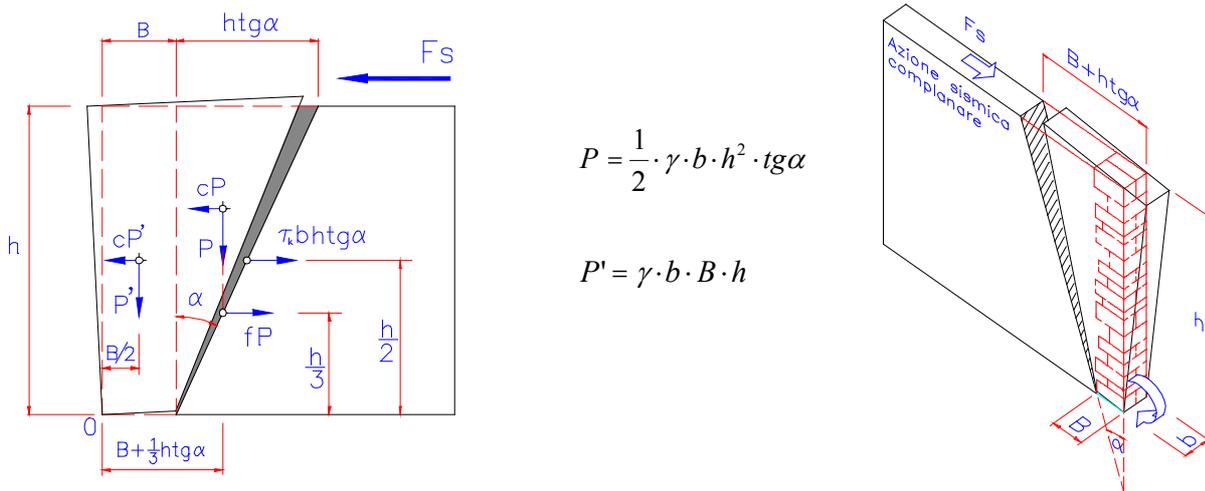
Il ciclo di produzione dei mattoncini realizzati dagli allievi del Corso Geometri, è lo stesso adottato per la produzione industriale dei laterizi impiegati in edilizia. La prova è stata eseguita utilizzando un tavolo oscillante tarato, per la prova specifica, su un'accelerazione massima al suolo $a_s=0.44\text{g}$.

⁴ Indagini sperimentali su modelli di opera muraria sottoposti ad azioni statiche sono state eseguite da Vittorio Ceradini in "Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia", di Antonino Giuffrè – Edizioni Laterza 1993.



1.42b Le modalità di collasso delle pareti consolidate con tiranti sommitali variano in funzione del rapporto lunghezza/altezza e sono spiegabili attraverso il modello di Fig. 1.40. Al crescere del rapporto l/h la parete trova sempre maggiore difficoltà a ruotare attorno all'estremità di base, per cui prevale la formazione di lesioni diagonali di scorrimento che possono evolvere nel cinematiso composto illustrato in figura.

Per adattare il modello teorico esaminato ad una configurazione strutturale più realistica sebbene più articolata, si può tenere conto dell'ingranamento della muratura in testata, per cui la configurazione del cuneo di distacco risulta modificata come in Fig.1.43.



1.43 Modello statico modificato per tenere conto dell'ingranamento in testata e della reale configurazione del cuneo di distacco.

La presenza di blocchi squadrati sulla testata della parete, impone l'innesco della lesione in posizione arretrata rispetto al filo esterno e rende più difficoltosa l'evoluzione del cinematiso, per cui l'equazione di equilibrio e l'espressione del moltiplicatore di collasso per rotazione risultano così modificate:

$$M_s = c \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot b \cdot h^2 + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot \text{tg}\alpha \right)$$

$$M_r = \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot \text{tg}^2 \alpha + \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot B \cdot h^2 + \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot b \cdot f \cdot h^3 + \frac{1}{2} \cdot \tau_k \cdot b \cdot h^2 \right) \cdot \text{tg}\alpha + \frac{1}{2} \gamma \cdot b \cdot h \cdot B^2$$

$$c_{0R} = \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{crit} + (3 \cdot \gamma \cdot B \cdot h + \gamma \cdot f \cdot h^2 + 3\tau_k \cdot h) \cdot \text{tg}\alpha_{crit} + 3 \cdot \gamma \cdot B^2}{\gamma \cdot h \cdot (3 \cdot B + 2 \cdot h \cdot \text{tg}\alpha_{crit})}$$

Un altro aspetto da non trascurare nella stima del moltiplicatore di collasso, riguarda la forma delle pietre e le modalità di posa in opera.

Questo aspetto, come già si è potuto riscontrare nella diffusione dei carichi verticali, assume un'importanza non trascurabile per l'equilibrio interno della muratura.

Il "vicendevole conflitto" fra le pietre cui faceva riferimento Nicola Cavalieri San-Bertolo, è certamente indispensabile per l'equilibrio, ma può essere pure dannoso per l'innesco di alcuni meccanismi.

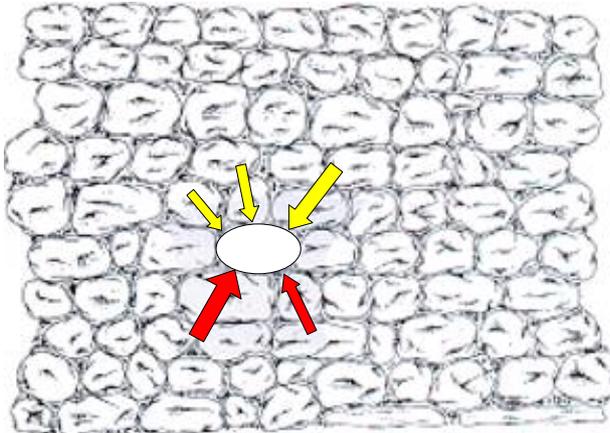
Il parametro che caratterizza la forma e la posa degli inerti può essere definito dal valore di un angolo caratteristico φ che tiene conto dell'inclinazione media delle forze equilibranti trasmesse fra gli elementi.

L'impiego di blocchi squadrati o di elementi arrotondati, disposti però con cura su piani orizzontali, non richiede spinte per l'equilibrio del sistema.

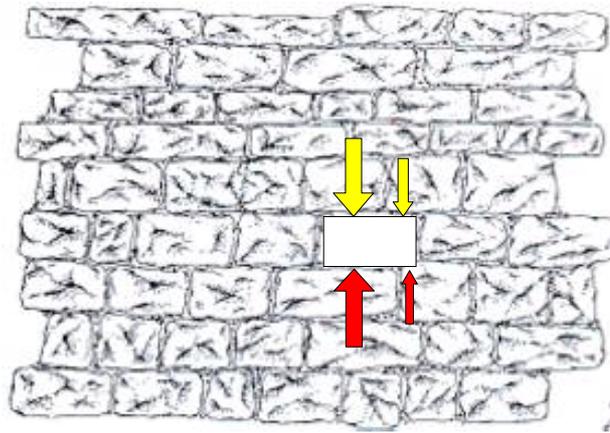
Al contrario, se le pietre arrotondate tendono a creare un ingranamento fra i filari sovrapposti, è inevitabile l'innesco di componenti orizzontali necessarie per l'equilibrio. In questo modo la muratura assume una configurazione "internamente spingente" in direzione complanare alla parete.

In linea di principio questo non costituisce un problema, anzi, per certi aspetti questa naturale precompressione contribuisce a contrastare la formazione di fessure verticali.

In realtà i problemi sorgono alle estremità delle pareti, dove la componente "spingente" delle forze equilibranti favorisce il distacco del cuneo secondo il cinematismo sopra illustrato.



1.45 Muratura in ciottoli di fiume.

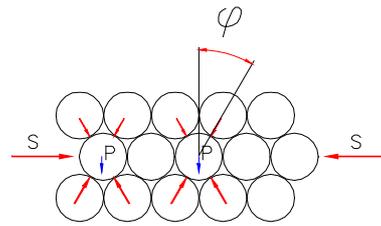


1.46 Pietra calcarea squadrata disposta su piani orizzontali.

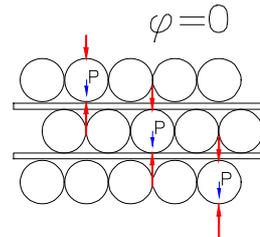
Vi sono tipi di murature dove questo effetto viene addirittura ricercato come elemento stabilizzante.

E' il caso, ad esempio, dell'*opus spicatum*, ovvero della muratura di pietrame in lastre sottili oppure di laterizi disposti a spina pesce, che trovano stabilità proprio attraverso la compressione.

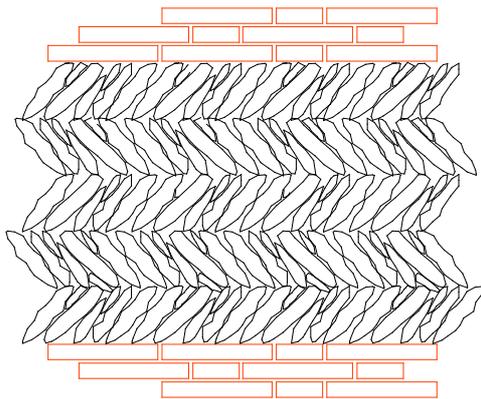
Ogni elemento è sottoposto ad azioni di contatto molto elevate, per cui si amplificano le forze d'attrito che impediscono qualsiasi movimento. In questo modo un materiale caratterizzato da un apparecchio apparentemente poco adatto ad un'opera muraria può consentire la realizzazione di strutture alquanto stabili.



1.44 a Posa di filari sovrapposti ingranati.



1.44b Posa dei filari su piani orizzontali.



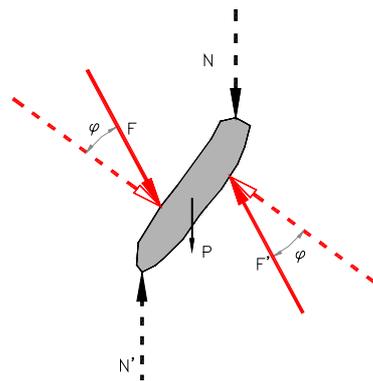
1.47 *Opus spicatum* tipico delle aree con disponibilità di pietrame in lastre sottili.

Tornando al caso generale, si osserva che in termini quantitativi la spinta interna contribuisce ad incrementare il momento ribaltante secondo l'espressione seguente:

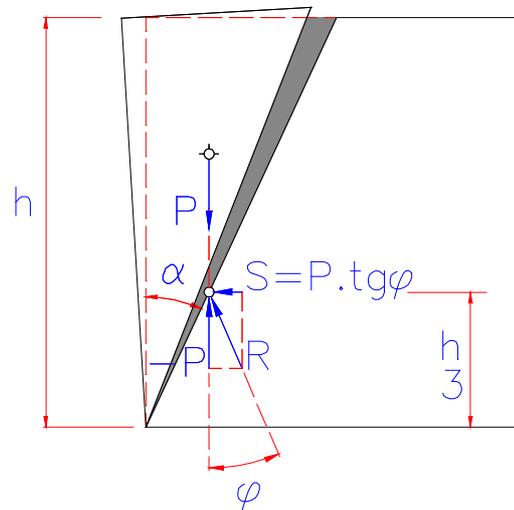
$$M_{sf} = P \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{h}{3}$$

con M_{sf} = momento spingente di forma.

Si può affermare, pertanto, che nella muratura "internamente spingente" il moltiplicatore di collasso a ribaltamento per azioni complanari risulta influenzato negativamente.



1.48 Sistema di forze agenti sulla singola piastra.



1.49 Amplificazione del momento ribaltante dovuto all'azione spingente interna alla muratura.

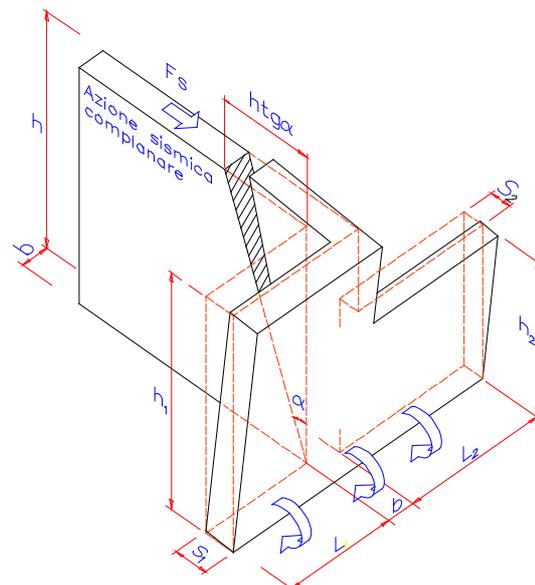
E' opportuno far notare che la spinta interna esiste a prescindere dalla sollecitazione sismica e pertanto può indurre fenomeni di fessurazione anche in condizioni statiche ordinarie.

L'analisi della parete isolata è fondamentale per la comprensione dei principi basilari che governano il fenomeno, però appare poco significativa ai fini applicativi, quindi è necessario esaminare strutture più articolate, prevedendo l'introduzione di altri elementi caratteristici della struttura muraria.

L'evoluzione naturale dello schema base consiste nell'inserimento di una parete trasversale al muro esaminato, in modo da creare un martello murario.

Il caso è quello tipico delle pareti di facciata collegate ai muri di spina, anche se, procedendo per gradi, è opportuno trascurare la presenza dei solai.

Il criterio di analisi è analogo a quello illustrato in precedenza, con la variante di un maggior numero di elementi che contribuiscono all'evoluzione del meccanismo.



1.50 Ribaltamento della parete di facciata con distacco del martello murario.

Lo schema grafico si riferisce ad una situazione generica, con pareti di dimensioni diverse ai lati del muro di spina. Le espressioni del momento spingente e del momento resistente risultano pertanto così modificate:

$$M_s = c \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot h + c \cdot (\gamma \cdot B \cdot b \cdot h) \cdot \frac{1}{2} \cdot h + c \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot L_1 \cdot S_1 \cdot h_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot L_2 \cdot S_2 \cdot h_2^2 \right)$$

$$M_r = \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha + \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot B \cdot h^2 + \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot b \cdot f \cdot h^3 + \frac{1}{2} \cdot \tau_k \cdot b \cdot h^2 \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\gamma \cdot b \cdot h \cdot B^2 + \gamma_1 \cdot L_1 \cdot S_1^2 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot L_2 \cdot S_2^2 \cdot h_2)$$

La complessità del problema è da associare essenzialmente all'elevato numero di parametri che caratterizzano la geometria degli elementi strutturali, ma concettualmente nulla varia rispetto allo schema elementare già analizzato.

$$c_{OR} = \frac{\gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{crit} + \left(3 \cdot \gamma \cdot b \cdot B \cdot h^2 + \gamma \cdot b \cdot f \cdot h^3 + 3 \cdot \tau_k \cdot b \cdot h^2 \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{crit} + 3 \cdot (\gamma \cdot b \cdot h \cdot B^2 + \gamma_1 \cdot L_1 \cdot S_1^2 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot L_2 \cdot S_2^2 \cdot h_2)}{3 \cdot \gamma \cdot B \cdot b \cdot h^2 + 2 \cdot \gamma \cdot b \cdot h^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 3 \cdot \gamma_1 \cdot L_1 \cdot S_1 \cdot h_1^2 + 3 \cdot \gamma_2 \cdot L_2 \cdot S_2 \cdot h_2^2}$$

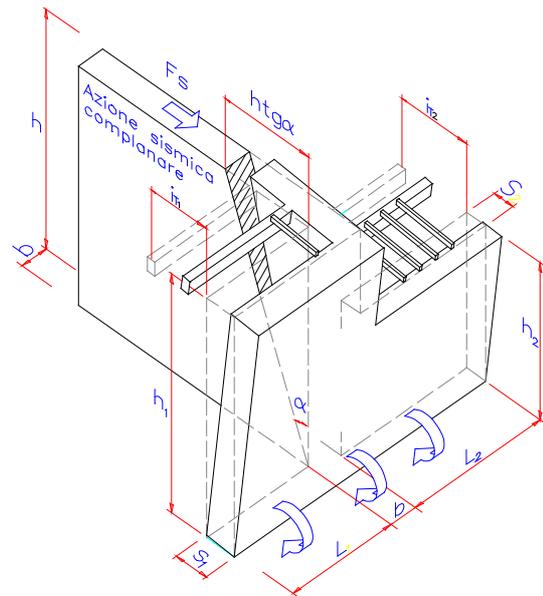
Si potrebbe continuare con lo stesso criterio aggiungendo i solai di piano, orditi in senso parallelo oppure ortogonale al muro di spina.

La stima dei moltiplicatori di collasso rispondenti a queste configurazioni potrebbe essere utile per stabilire quale delle due è effettivamente la più gravosa.

In ogni caso, si intuisce che la presenza di carichi concentrati sul muro di spina, trasmessi dalle testate delle travi sopra appoggiate, favorisce la formazione di lesioni lungo profili non necessariamente coincidenti con la linea critica e che intercettano le travi stesse (vedi Fig. 1.4).

La conseguenza negativa è rappresentata dal fatto che la trave, in questo modo, trasferisce l'azione orizzontale al cuneo, mentre si appoggia sul muro stabile, per cui ne risulta incrementato il momento spingente e non si contribuisce in modo proporzionale al momento resistente.

L'evoluzione del dissesto porta la trave a scivolare lungo la lesione, impedendo in questo modo la reversibilità spontanea del cinematiso, altrimenti ipotizzabile per effetto dell'azione dinamica.



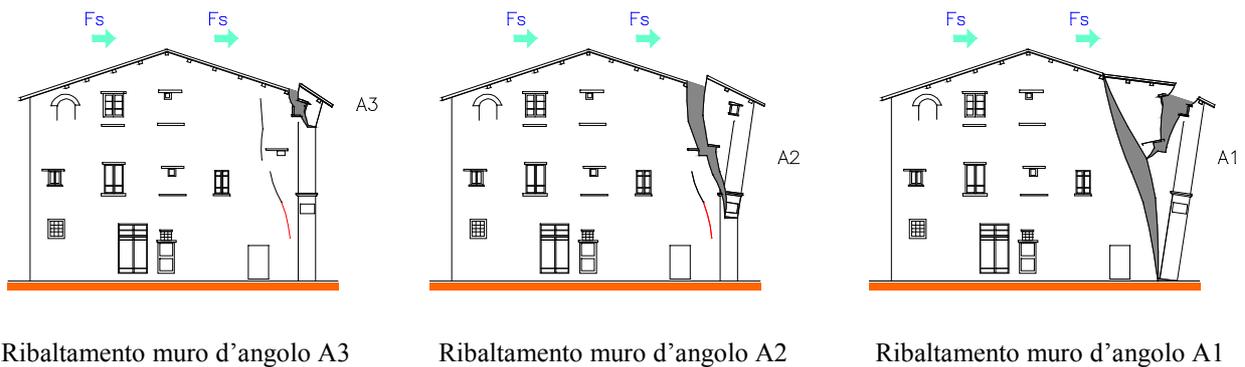
1.51 Meccanismo composto - Modello generale

L'ultimo degli schemi illustrati costituisce un modello piuttosto complesso e per questo applicabile all'analisi di strutture reali, limitatamente al meccanismo illustrato.

Negli edifici con più piani fuori terra, il modello di analisi proposto resta valido, ma risultano moltiplicate le possibili configurazioni di collasso, a partire dalle più semplici, che vedono formarsi le cerniere di rotazione a livello di ogni solaio, come illustrato in figura.

Fra i potenziali meccanismi di danno, è necessario ricercare quelli che rispetto ad altri risultano più probabili e pericolosi, operazione che a priori appare piuttosto difficoltosa.

Solo nelle strutture già danneggiate, che presentano un chiaro quadro fessurativo, è possibile riconoscere le componenti dei cinematisi attivati che tendono a riporsi sotto l'effetto delle stesse azioni.



1.52 Meccanismo di danno fuori del piano con trascinamento del muro d'angolo.

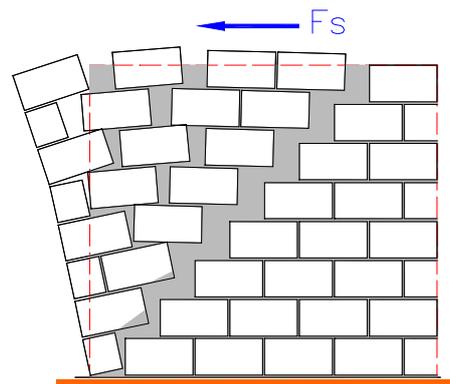
Nell'esempio illustrato, il cinematismo A3 si innesca a livello del secondo piano e coinvolge le murature del 3° ordine oltre al solaio di copertura; il meccanismo A2 comporta il ribaltamento del muro d'angolo e della porzione di facciata corrispondente al 2° e 3° ordine. Il meccanismo A1 è sostanzialmente identico agli altri; tutti e tre sono congruenti con il quadro fessurativo manifestato dalla parete, ma i calcoli dimostrano che il ribaltamento attorno alla base si innesca con maggiore probabilità.

Questo non è vero in assoluto e dipende dalle specifiche condizioni di vincolo della parete ai vari piani; è infatti sufficiente disporre dei tiranti ad un livello generico per modificare il comportamento statico ed indirizzare il dissesto verso meccanismi diversi da quelli ipotizzati.

La particolarità evidenziata in questo caso dal meccanismo A1 riguarda una possibile disgregazione del cuneo che, quando si verifica, compromette la qualità della risposta sismica.

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'eccessiva ampiezza angolare del cuneo a favorire il fenomeno.

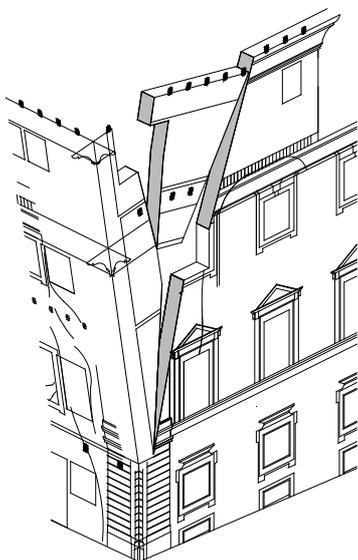


1.53 Sconnessione del cuneo di distacco.

Le conseguenze sono spesso negative per la stabilità della parete, dato che si riduce sensibilmente l'azione del momento resistente di forma - M_{rf} , mentre rimane pressoché inalterato il momento spingente.

In determinate situazioni si possono avere effetti ancora più gravi, quando l'improvvisa disgregazione del cuneo fa cadere una porzione del muro sulla parte stabile, con un pericoloso effetto di rimbalzo che va ad amplificare la spinta.

La presenza di eventuali aperture di porte o finestre è determinante per la formazione della catena cinematica e, soprattutto, può favorire l'instabilità del solido come si evidenzia a lato.

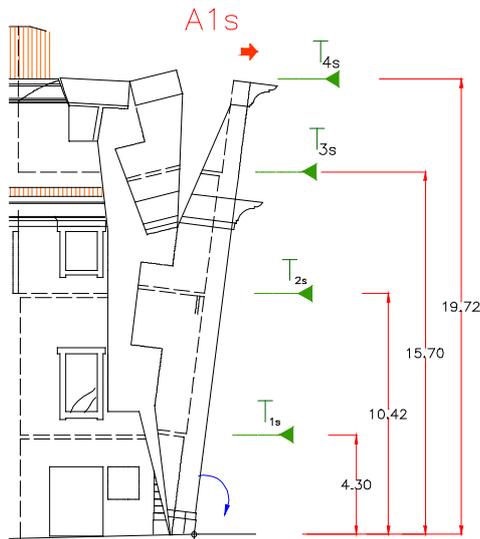


1.54 Palazzo Buonaccorsi (Macerata): meccanismo di danno del muro d'angolo al secondo ordine A2.

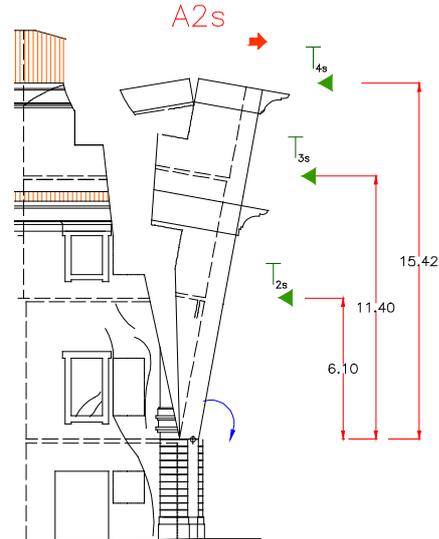
L'analisi del cinematismo, sulla base di un attento rilievo geometrico-strutturale e della restituzione grafica del quadro fessurativo, consente non solo di prevederne la probabile evoluzione, ma soprattutto suggerisce il modo più efficace per contrastare il ribaltamento attraverso la disposizione di tiranti posti a tutti i piani.

Per il dimensionamento dei tiranti è necessario procedere dall'alto verso il basso.

Per ogni configurazione si calcola il moltiplicatore di collasso; quando il valore risulta inferiore a quello minimo prescritto dalle norme si determina il tiro delle catene necessario per compensare il momento resistente ed assicurare adeguate condizioni di stabilità e sicurezza.



1.55 I Ordine – Lato sinistro



1.56 II Ordine – Lato sinistro

1.7 Qualità della muratura.

Quanto premesso è sufficiente per fissare alcuni punti fondamentali utili al processo di analisi delle strutture in muratura ordinaria di tipi tradizionali.

In particolare, per impostare una corretta analisi statica e sismica delle murature secondo i criteri sopra esposti è necessario conoscere alcuni parametri aggiuntivi oltre a quelli canonici rappresentati dal *peso specifico*, dalle *caratteristiche meccaniche* dei blocchi naturali e/o artificiali e dal *tipo di malta* impiegata, che da soli permettono di stimare la resistenza a rottura della muratura, la tensione ammissibile a compressione e la resistenza a taglio.

Gli altri parametri necessari per la verifica sono costituiti dal *coefficiente di ingranamento trasversale* e dall'*angolo critico caratteristico*, che esprime il livello di ingranamento longitudinale. Questi due parametri costituiscono indicatori significativi sulla reale capacità della muratura di conservare un assetto monolitico e quindi di sostenere la formazione di catene cinematiche.

L'ingranamento trasversale, inoltre, influisce direttamente sul calcolo della snellezza, che in assenza connessioni fra i paramenti assume valori doppi rispetto a quelli stimati in base allo spessore globale del muro, con tutte le conseguenze che ciò comporta sul procedimento di calcolo. L'*angolo critico caratteristico*, invece, influisce soprattutto sui meccanismi complanari, come sopra illustrati.

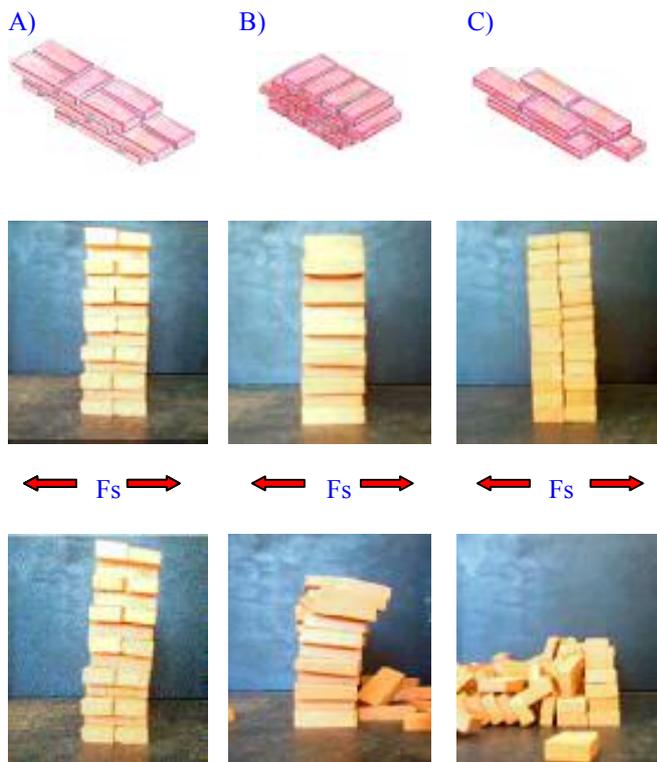
Altri parametri utili per le verifiche sono costituiti dal *coefficiente d'attrito* (f) della muratura e dall'*angolo caratteristico di forma* (φ); quest'ultimo ha significato solo per gli elementi di forma irregolare, caratterizzati da profili arrotondati, responsabili dell'insorgenza di sforzi orizzontali che determinano una configurazione della muratura internamente spingente.

Prospetto riepilogativo:

<i>Parametro caratteristico:</i>	<i>Simbolo</i>	<i>u. m.</i>
- Peso specifico:	γ	DaN/mc
- Resistenza di rottura a compressione dei blocchi:	f_{bk}	DaN/cm ²
- Tipo e qualità della malta:	<i>M1-M2-M3-M4</i>	
- Resistenza a rottura della muratura:	f_k	DaN/cm ²
- Tensione ammissibile a compressione della muratura:	σ_m	DaN/cm ²
- Resistenza caratteristica a taglio:	τ_k	DaN/cm ²
- Coefficiente d'ingranamento trasversale:	μ	(0-1)
- Angolo critico:	α_{crit}	°
- Coefficiente d'attrito:	f	-
- Angolo caratteristico di forma:	φ	°

Per esprimere un giudizio ancora più rigoroso sulla qualità della muratura sarebbe necessario valutare molti altri parametri che tuttavia, farebbero correre il rischio di sconfinare su aspetti puramente accademici e poco realistici; ciò che invece va tenuto strettamente in considerazione è il livello di monoliticità della parete, che costituisce un fattore prioritario, prevalente rispetto alle stesse caratteristiche meccaniche.

La risposta sismica delle pareti libere sottoposte ad azioni sismiche ortogonali al piano evidenzia una diversità di comportamento che, a parità di dimensioni ed in assenza di malta, è dovuta essenzialmente al tipo di tessitura ed al livello di ingranamento degli elementi.



1.57 Diverso comportamento sismico di pareti sollecitate da azioni ortogonali in relazione al livello di ingranamento fra i paramenti (Modelli in scala murati a secco)⁵.

Nel caso delle murature laterizie a due teste, ad esempio, il comportamento migliore è manifestato dalla parete realizzata con il sistema a tessitura *alla gotica*, caratterizzata da una giusta proporzione fra diatoni e ortostati, ovvero, fra elementi trasversali e longitudinali. Come si è già accennato, le pareti di soli diatoni e, peggio ancora, quelle di soli ortostati, presentano una configurazione alquanto precaria. Il caso A è quello che si avvicina maggiormente alla configurazione ideale di parete monolitica, come dimostrano i modelli in scala sollecitati fuori del piano (Fig. 1.57). La presenza di diatoni costituisce in genere l'indizio più significativo sull'esistenza di un adeguato sistema di connessioni che favorisce il comportamento monolitico, ma la prova sperimentale richiama l'attenzione sulla "giusta proporzione" che deve esistere fra diatoni ed ortostati.

⁵ Prove sperimentali su modelli in scala di muratura laterizia a secco realizzati presso il Laboratorio di Costruzioni dell'Istituto Tecnico per Geometri "I. Salviani" – Città di Castello (PG) nell'ambito dell'attività didattica ordinaria. Prova eseguita su tavolo oscillante tarato su un'accelerazione al suolo $a_s = 0.07 \cdot g$, uguale per i tre casi.

Le prove eseguite sui modelli in scala di muratura laterizia dimostrano che se si aumenta la percentuale di elementi trasversali (diatoni) oltre un certo limite, non si ottengono miglioramenti proporzionati nella risposta alle azioni ortogonali, mentre viene sicuramente compromessa la risposta nel piano per la conseguente riduzione dell'angolo critico.

Allo stesso modo, se si incrementano gli ortostati a scapito dei diatoni, si riscontrano effetti inversi. Tutto questo risponde alla logica per cui diatoni ed ortostati da soli non permettono di ottenere una configurazione monolitica, quindi occorre tenere conto che la presenza di molti diatoni non è sempre sinonimo di buona qualità.

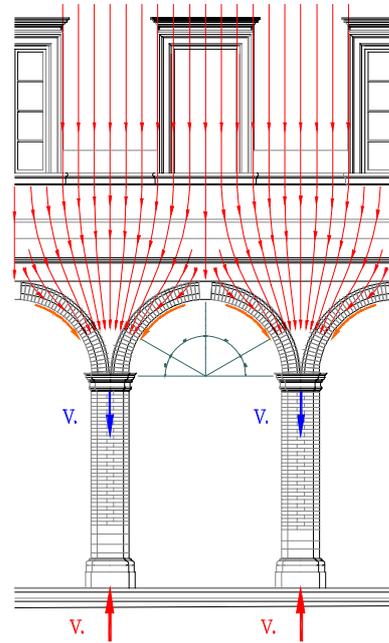
1.8 Azioni complanari alle pareti in presenza di aperture.

La risposta dei pannelli murari alle azioni sismiche agenti nel piano, così come illustrata per i casi generali, subisce variazioni significative in presenza di aperture che determinano una naturale deviazione delle isostatiche di compressione dirette verso le fondazioni.

Variazioni di comportamento significative si riscontrano già in condizioni statiche, ma è sotto l'effetto del sisma che la presenza di aperture evidenzia una maggiore vulnerabilità complessiva della parete, dovuta alla scarsa capacità di adattamento alle sollecitazioni dinamiche.

In genere, nella tecnica costruttiva delle murature prevale l'attenzione verso la diffusione dei carichi verticali, che sono diretti responsabili dell'equilibrio in condizioni statiche e solo una cultura costruttiva antisismica permette di prevenire quei difetti che compromettono la risposta alle azioni orizzontali.

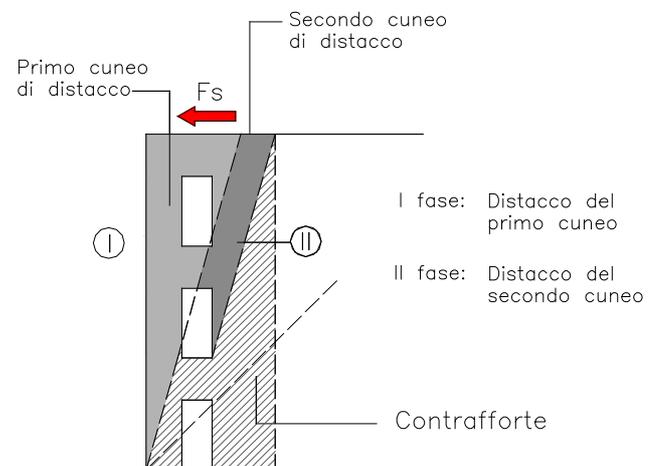
Gli archi di scarico che, in presenza di aperture, si formano spontaneamente all'interno delle murature per assecondare la deviazione degli sforzi di compressione, trovano maggiori ostacoli quando gli stessi flussi devono seguire percorsi diagonali imposti dalle componenti sismiche orizzontali.



1.58 Andamento qualitativo dei flussi di compressione in una parete sostenuta da archi e pilastri in muratura.

Lo schema elementare della parete riportato in Fig. 1.16, modificato con l'inserimento di vani di porte o finestre in prossimità delle testate, sposta la lesione di distacco in posizione arretrata rispetto a quella già osservata per il muro pieno e quindi impegna porzioni di parete molto più ampie.

In questo modo il processo di dissesto genera un effetto a catena con un'evoluzione non facilmente prevedibile.



1.59 Meccanismo di danno modificato in presenza di aperture

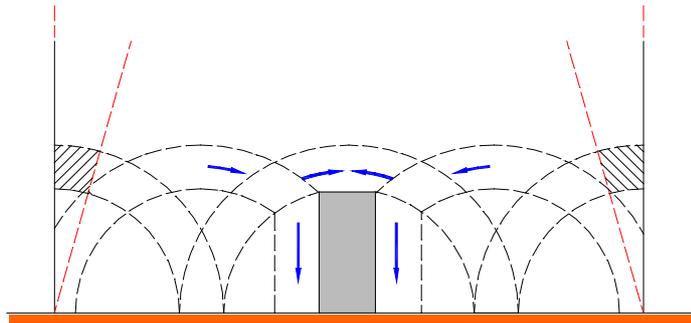
Appare evidente che la configurazione del cinematismo è da mettere in stretta relazione con l'andamento della linea critica e con il profilo delle aperture, per cui la perdita di equilibrio del cuneo principale innesca fenomeni secondari che causano l'instabilità delle porzioni di parete poste immediatamente a ridosso.

Il modello ad archi virtuali già utilizzato in precedenza per spiegare la meccanica del cinematismo di ribaltamento della testata, viene in soccorso anche in questo caso nell'interpretazione critica del complesso comportamento manifestato dai setti forati.

Questo metodo porta a conclusioni analoghe a quelle sopra illustrate, ma permette di effettuare delle considerazioni più approfondite. I problemi che sorgono per la presenza di aperture si individuano chiaramente attraverso lo schema ad archi che assicura la stabilità del muro pieno.

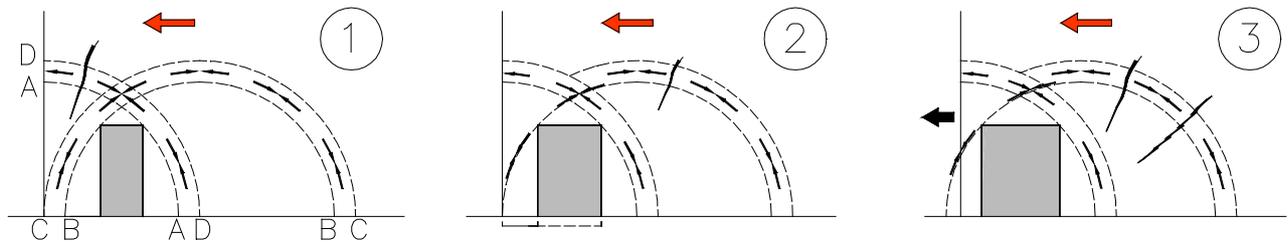
In ogni parete si tratta di ricercare la successione di archi che individua un potenziale meccanismo resistente, compatibile con la geometria del muro e con la posizione del vano.

Se l'apertura è collocata in posizione centrale, la struttura degli archi virtuali viene modificata, ma in ogni caso non subisce variazioni significative. Ben diversa è la situazione che si verifica con il vano posizionato a ridosso della testata.



1.60 Geometria del sistema di archi virtuali compatibile con la dimensione e con la posizione dell'apertura.

A tal fine è utile seguire un semplice procedimento grafico come illustrato nella figura seguente. Per costruire il sistema di archi resistenti si inizia a tracciare il semiarco di estremità (A); per questo si deve fare centro alla base del filo esterno e imporre il passaggio per lo spigolo superiore alla destra dell'apertura, in modo che la stessa risulti completamente iscritta nel quarto di cerchio.



1.61 Costruzione grafica dell'arco e semiarco di estremità in presenza di aperture situate in prossimità del cantonale.

Si disegna poi l'arco (B) speculare al primo rispetto all'asse dell'apertura; se questo secondo arco trova continuità fino alla base del muro significa che l'apertura è disposta in posizione corretta e non produce evidenti alterazioni del meccanismo resistente rispetto a quello del muro pieno.

Lo spessore di questo arco virtuale si può stimare tracciando il profilo d'estradosso passante per l'estremità di base della parete (Arco C); l'ampiezza dell'arco costituisce un utile indicatore del livello di sicurezza.

In ultimo si disegna l'arco (D) speculare al profilo (C).

Si osserva che allargando l'apertura verso l'estremità della parete si viene a modificare la geometria degli archi con una progressiva riduzione dello spessore ideale e quindi della capacità di resistere alla spinta.

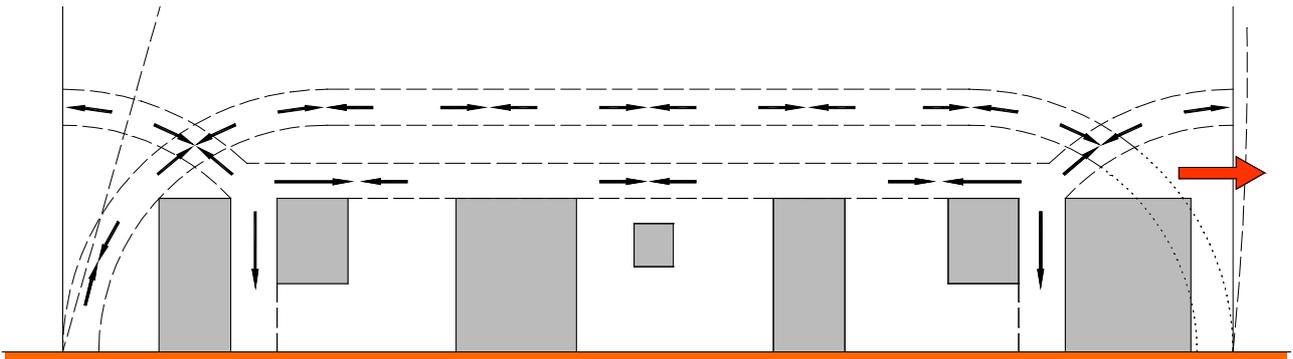
La configurazione limite è rappresentata dal completo annullamento dello spessore teorico, quando i profili d'intradosso (B) e (C) vanno a coincidere (Schema 2).

Un ulteriore spostamento o allargamento dell'apertura verso l'estremità della parete comporta la traslazione dell'arco oltre la base d'appoggio, con una configurazione chiaramente instabile.

L'arco interrotto può trovare l'equilibrio solo appoggiandosi sul semiarco di estremità, già di per se caratterizzato da un equilibrio precario, pertanto non ci si può aspettare un buon comportamento della struttura.

E' interessante notare che per aperture di normali proporzioni la configurazione limite richiede una porzione di muratura piena pari a circa metà dell'ampiezza del vano, che, come noto, corrisponde ad una regola costruttiva elementare, adottata pure dalla normativa antisismica.

Si intuisce, peraltro, che non solo la larghezza, ma anche l'altezza dell'apertura influisce sulla risposta strutturale, per cui vani larghi o molto alti vanno spostati a distanza opportuna dal muro d'angolo, secondo il criterio geometrico sopra illustrato. Questa semplice regola, invece, non trova sempre una corretta applicazione nell'edilizia storica.



1.62 Meccanismo resistente nelle pareti murarie in presenza di aperture disposte in successione

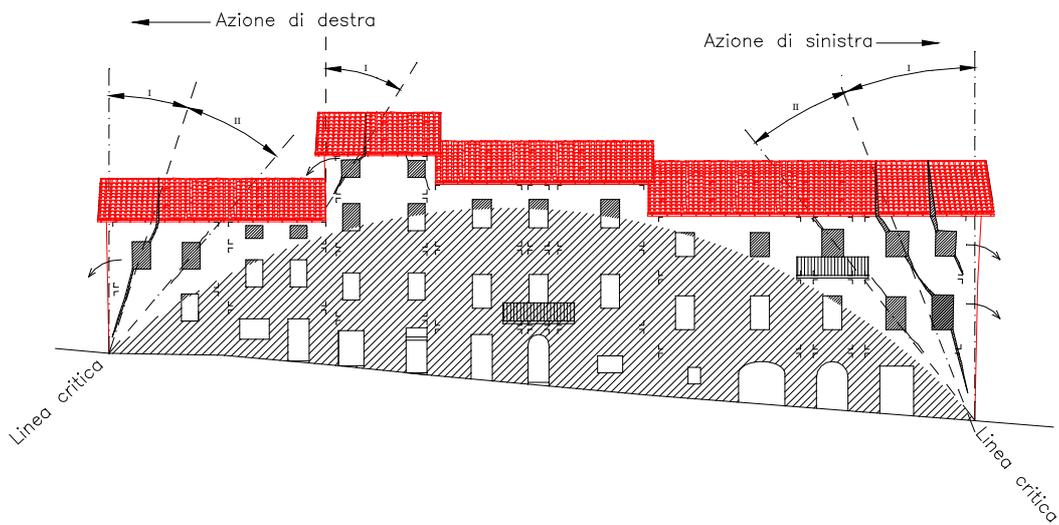
Una naturale estensione di questo ragionamento riguarda l'analisi di pareti complesse, caratterizzate da una successione di aperture tipica delle facciate di edifici a schiera.

In linea di principio questi sono casi in cui la schematizzazione ad archi virtuali si presenta più difficoltosa, per il fatto che non è possibile individuare profili di archi resistenti compatibili con l'assetto distributivo delle aperture, per il fatto che non esistono nel tratto centrale, a meno di configurazioni particolari.

In realtà, le azioni sismiche complanari possono scaricarsi solo contro le testate se la configurazione di estremità corrisponde a quella illustrata sul lato sinistro della figura, mentre non trova soluzione sul lato destro.

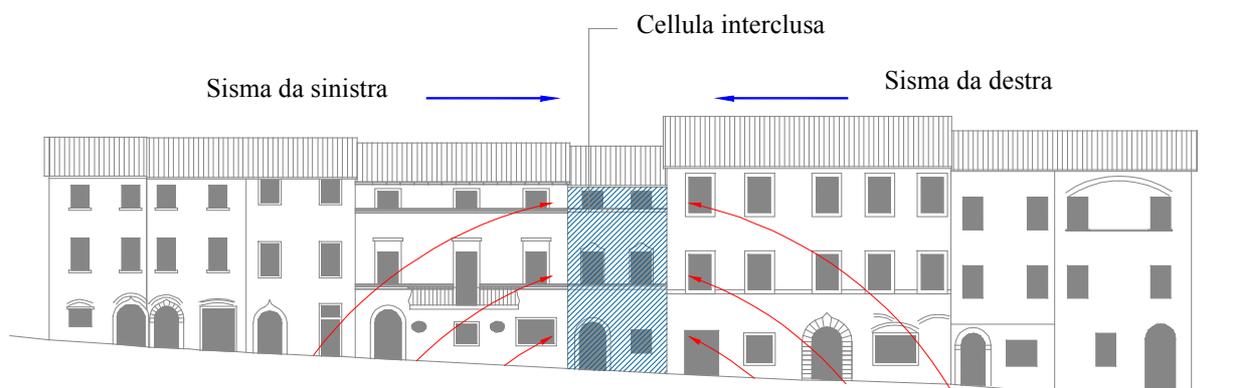
Lo schema qualitativo offre degli spunti per alcune interessanti considerazioni sul modo di danneggiarsi della maggior parte degli edifici a schiera situati in zona sismica.

Nelle facciate degli aggregati edilizi il quadro di dissesto determinato dalle azioni complanari è caratterizzato da un tratto centrale della parete privo di lesioni, mentre nelle zone terminali si manifestano i fenomeni sopra osservati.



1.63 Scenario di danno per edifici a schiera sottoposti ad azioni sismiche parallele alla facciata:
per la porzione di parete sottesa dall'arco non esistono rischi di ribaltamento per effetto delle azioni complanari.

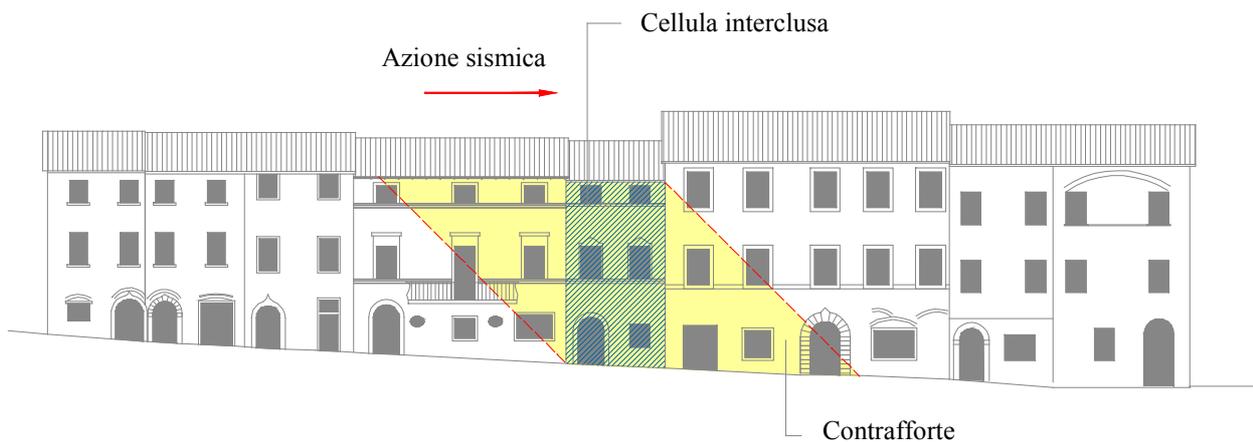
Il fenomeno non riguarda la sola facciata ma l'intero organismo strutturale, per cui nelle costruzioni a schiera ciascuna cellula sollecitata da azioni sismiche trasversali può contare sul sostegno dei corpi adiacenti, che interagiscono con essa dando origine ad un reciproco effetto stabilizzante.



1.64 Cellula centrale di un isolato a schiera: azione di contrasto assicurata dagli edifici contigui.

Per le cellule intercluse, questo è generalmente vero, mentre gli edifici di testata e quelli situati immediatamente a ridosso, non possono godere dello stesso effetto.

Tale comportamento è spiegato dal fatto che negli edifici interclusi le forze sismiche vengono deviate agevolmente verso la fondazione del tratto a valle, mentre alle estremità dell'isolato l'ampiezza del muro non è sufficiente per garantire lo stesso effetto, per cui le componenti orizzontali non trovano il contrasto necessario.



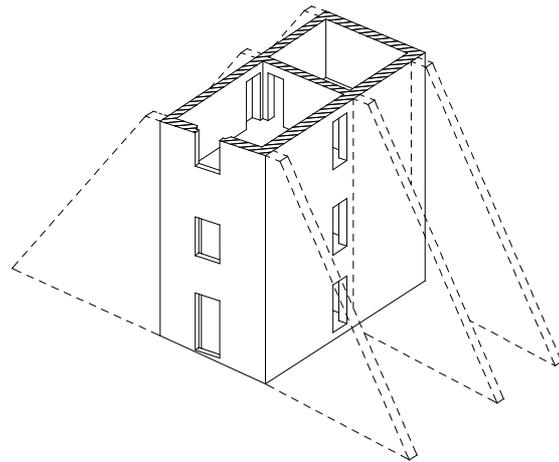
1.65 Cellule centrali di un isolato a schiera: schema di diffusione delle azioni sismiche.

La costruzione grafica della Fig. 1.65 aiuta a comprendere i semplici meccanismi di diffusione degli sforzi all'interno della parete di facciata, per cui ciascuna cellula tende ad assorbire le azioni trasmesse dalla struttura che la precede ed a scaricare gli sforzi su quella che segue, la quale pertanto svolge la funzione propria di un contrafforte.

Ogni cellula può essere assimilata ad un'ideale struttura piramidale, secondo un modello che offre un'idea piuttosto chiara delle condizioni di vincolo imposte dalle strutture al contorno.

Sotto questo aspetto gli orizzontamenti spingenti si dimostrano utili ed efficaci, se disposti in modo tale da trasmettere le spinte contro le cellule adiacenti.

Una regolare successione di elementi spingenti, in grado di annullare le spinte reciproche, costituisce un fattore stabilizzante, a condizione che l'accorgimento sia caratterizzato da una sostanziale continuità e che le spinte esercitate contro le pareti di testata siano contrastate efficacemente.



1.66 Modello piramidale di una cellula interclusa.

1.9 *Analisi del comportamento sismico di cellule elementari.*

Dopo aver puntualizzato alcuni dei criteri generali da seguire per le verifiche dei meccanismi locali, è necessario fornire una visione più specifica del problema attraverso l'analisi del comportamento di semplici organismi edilizi, che tuttavia presuppongono delle interazioni fra i vari elementi strutturali non rilevabili nelle configurazioni elementari analizzate in precedenza.

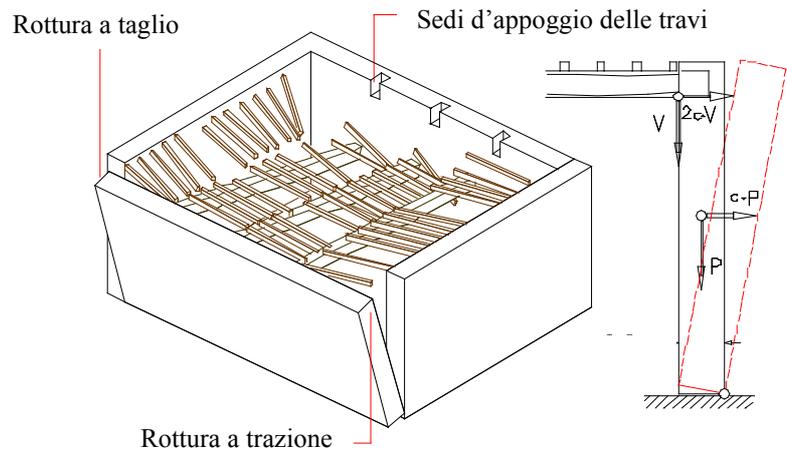
A tale scopo si prenderà in esame una cellula isolata di forma rettangolare organizzata su un solo piano, come già illustrata in premessa, considerando le pareti prive di aperture per opportuna semplificazione, ovvero una scatola chiusa da muri perimetrali e da un soffitto ligneo⁶.

Si ipotizzerà l'azione sismica agente in direzione parallela all'orditura delle travi maestre, per apprezzare il contributo che queste ultime possono dare alla stabilità del sistema statico.

⁶ L'argomento è stato sviluppato dall'autore nell'ambito delle ricerche dirette dal Prof. Paolo Marconi, svolte fra il 1994 ed il 1997 dal Dipartimento ITACA della Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", sulle Tecniche di prevenzione sismica premoderne - linea di ricerca n. 4.1.1, per conto del Ministero dei Beni Culturali e Ambientali - Comitato "Rischio sismico".

Il meccanismo di primo modo che si osserva nelle pareti libere risulta modificato dalla presenza di eventuali connessioni con i muri di controvento e pure dalla spinta trasmessa dal solaio alla parete sottovento, soprattutto quando lo sfilamento delle travi favorisce il collasso della struttura.

L'eventuale 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.



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

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.

Il comportamento non differisce molto da quello osservato nelle pareti libere, salvo per l'azione di contrasto offerta dai muri ortogonali, che può indirizzare il danno verso meccanismi diversi.

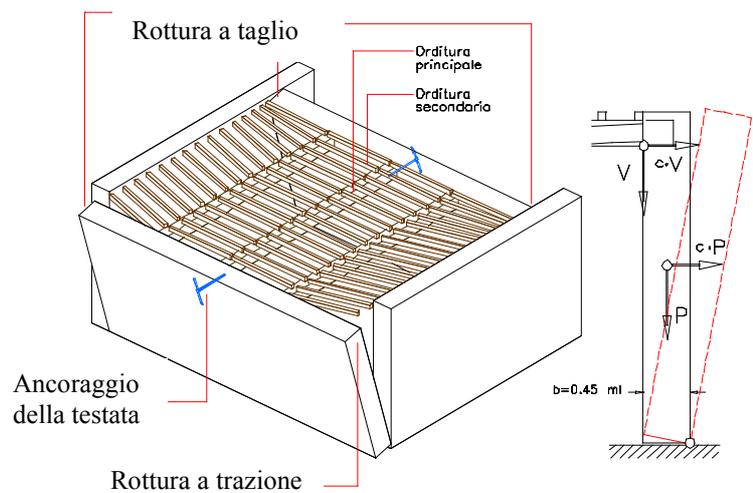
Il collasso si verifica per superamento della resistenza minima opposta dal meccanismo di rottura a taglio e di quello a trazione.

La probabilità d'innesco di ciascun meccanismo dipende pertanto 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.

La presenza del 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.

In pratica è sufficiente ancorare le testate delle travi ai muri portanti per prevenire questo tipo di collasso.

Non è necessario collegare tutte le orditure, ma è sufficiente 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 dovranno, almeno ogni tre, poggiare su tutta la grossezza dei muri ed essere collegate con il telaio di consolidamento ove esiste".



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

In queste condizioni i muri portanti 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.

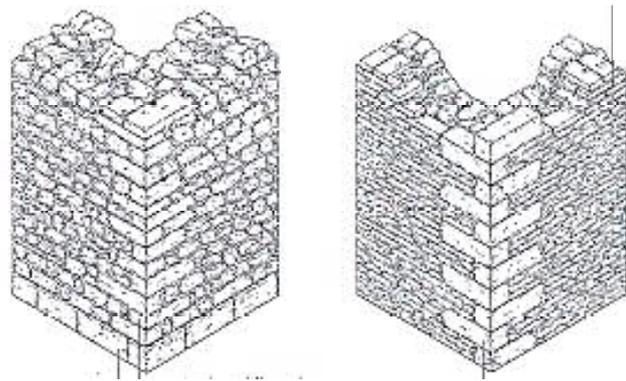
Si osserva, inoltre, che la rotazione della parete sopravento è compatibile solo con il tipo di rottura a taglio oppure a flessione, come si vedrà in seguito e ciò rende ancora meno probabile l'attivazione del cinematismo di danno.

L'orditura secondaria di travicelli nei solai lignei tradizionali non può svolgere alcuna significativa azione di contrasto

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.



1.69 Esempi di cantonali su muratura di pietrame e muratura mista con paramento laterizio.

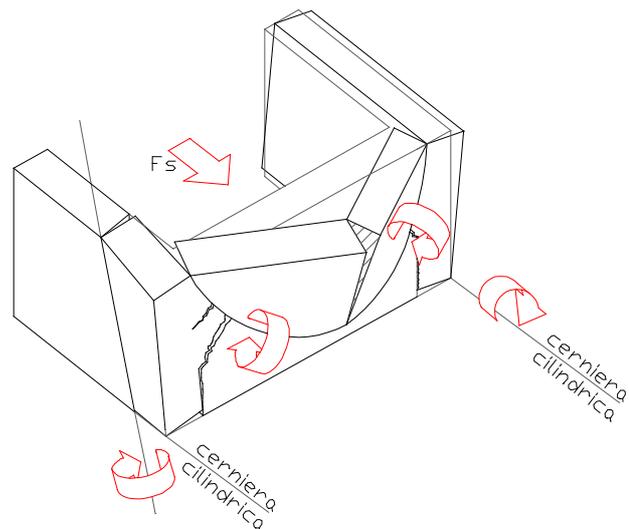
La rottura a flessione si presenta più articolata; la parete viene spinta all'esterno nella parte centrale più distante dai vincoli perimetrali, mentre si forma una lesione verticale lungo la linea di simmetria; il meccanismo in questo caso si affida alla formazione di archi orizzontali che si sviluppano 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.

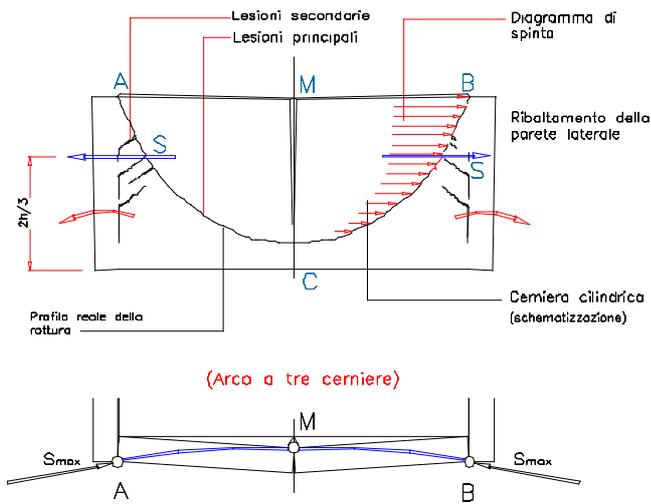
Da ciò deriva l'entità delle spinte trasferite ai cantonali.

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.



1.70 Meccanismo di rottura a flessione



1.71 Meccanismo resistente con arco orizzontale a tre cerniere.

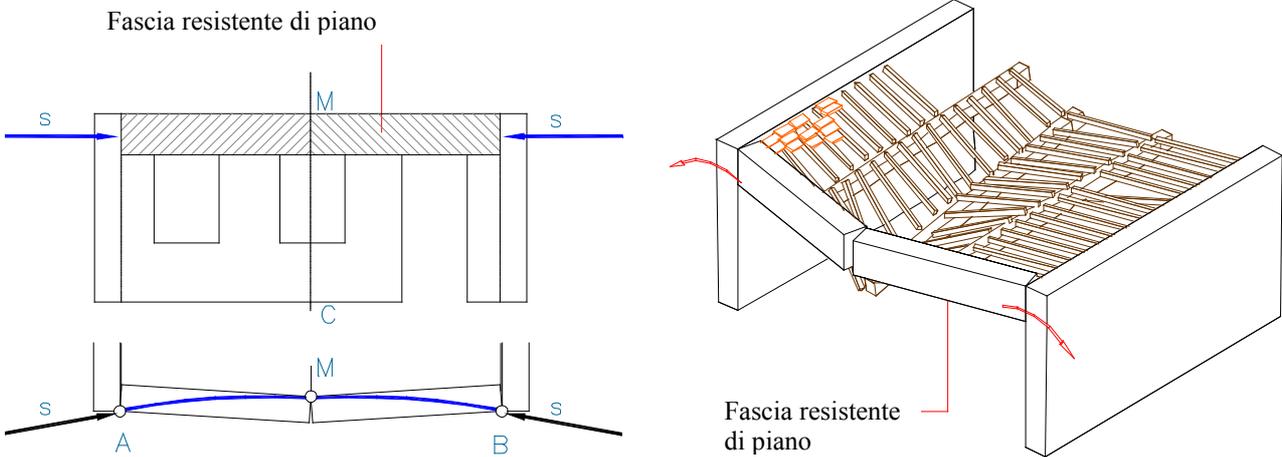


1.72 Rottura a flessione per azioni fuori del piano. Edificio rurale ad un piano in muratura di pietrame. (Città di Castello (PG), Fraz. Scalocchio)

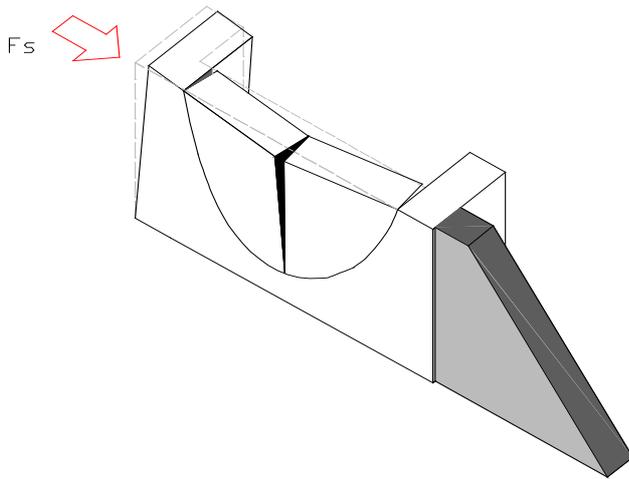
Vi sono esempi molto interessanti di questo tipo di danneggiamento alquanto intuitivo, illustrato nello schema in Fig. 1.71 e confermato dal meccanismo documentato in Fig. 1.72 relativo ad un edificio colpito dal sisma del 1997 in Umbria e Marche.

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.



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



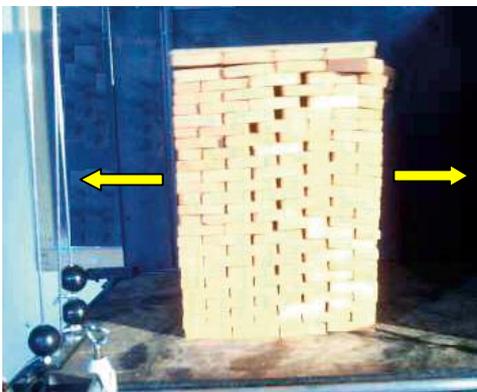
1.74 Fenomeno di instabilità per azioni sismiche complanari alla parete posta a contrasto di strutture rigide.

Fra le cause che possono produrre questo cinematismo non bisogna dimenticare i fenomeni di instabilità indotti dalle azioni sismiche complanari alla parete, che producono effetti simili, ma amplificati e molto più pericolosi, tali da determinare il collasso per espulsione del muro.

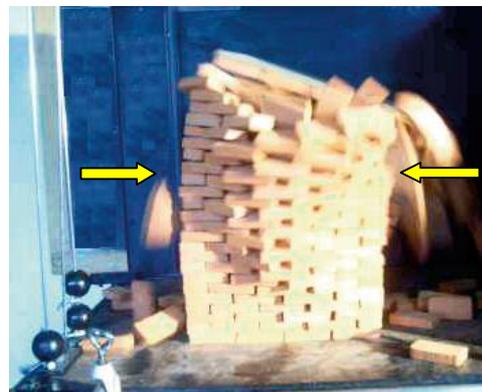
Questo accade soprattutto quando la parete trova il contrasto di strutture rigide, oppure quando urta contro il muro ortogonale che oscilla in controfase, per cui si alternano stati di distensione ad elevati stati di compressione. La configurazione di carico più gravosa per queste strutture si verifica con il sisma agente in direzione diagonale, quando si combina l'azione ortogonale alla parete con quella complanare.

La compressione orizzontale esercitata nel piano della parete è molto pericolosa, perché agisce sugli ortostati con un carico di punta che rende il sistema instabile, a differenza dei carichi verticali che, sebbene più elevati, agiscono su filari di spessore contenuto.

La qualità della muratura, ovvero la qualità delle connessioni interne, è determinante anche in questo caso, perché ha effetti diretti sulla snellezza del muro intero e dei singoli paramenti.



a) Oscillazione in controfase delle pareti laterali: fase di distensione con strappo della parete di facciata lungo la linea mediana.



b) Oscillazione in controfase delle pareti laterali: fase di compressione con rigonfiamento della parete di facciata.

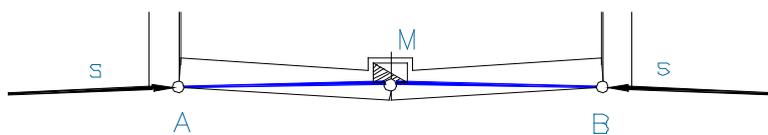
1.75 Meccanismo di espulsione della parete di facciata per effetto delle azioni sismiche complanari⁷.

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 dall'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.

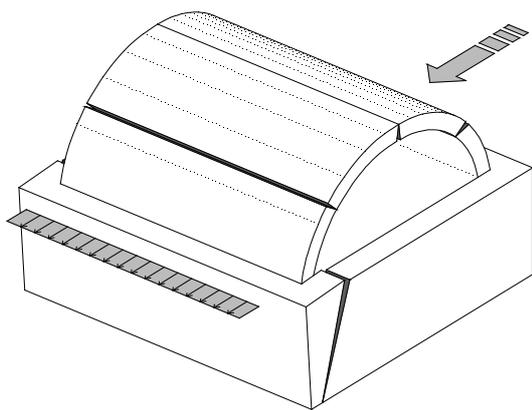
⁷ Prove sperimentali eseguite su modelli di strutture laterizie in scala, realizzati presso il Laboratorio di Costruzioni dell'Istituto Tecnico per Geometri "I. Salviani" - Città di Castello (PG) nell'ambito dell'attività didattica ordinaria. La prova è stata eseguita con accelerazione al suolo $a = 0.22 \cdot g$.

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.



1.76 Configurazione dell'arco ribassato in presenza di canne fumarie⁸

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.



1.77 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 verso l'interno il muro trova il contrasto della volta che si comporta quindi come un vincolo monolatero.

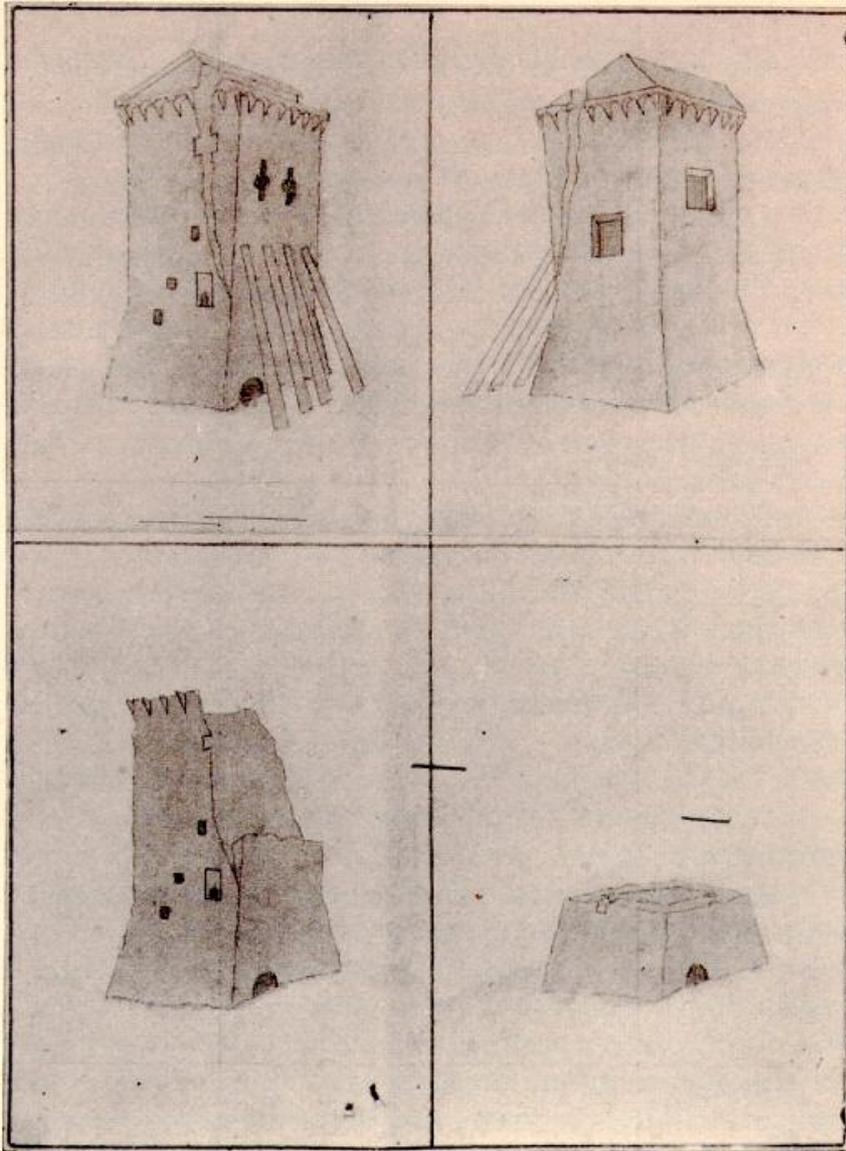
La spinta uniforme esercitata dalla volta a botte contro la parete d'imposta innesca un fenomeno di ribaltamento che può avvenire con le modalità illustrate in Fig. 1.77, se la qualità dei cantonali e della muratura ne consentono l'evoluzione⁹.

⁸ Dalle "Disposizioni del Genio Civile e norme tecniche da osservarsi per le riparazioni da eseguire nelle località di Citerna e Monterchi danneggiate dal terremoto del 26 Aprile 1917": le condotte e le canne di scarico di qualsiasi specie dovranno essere disposte in modo da non intaccare le murature, ma da permettere anzi l'integrazione ove l'indebolimento sia avvenuto.

⁹Una interessante testimonianza su questo tipo di dissesto è ricavata dalla relazione sulla demolizione dell'antica Torre di Colmatrano presso Cantiano (PU), che minacciava rovina. Il documento redatto dal tecnico comunale Geometra Bufalini nel 1857, è pubblicato ne "Il Castello di Cantiano", di Giovanni Scatena (Stabilimento Tipolitografico Bramante), Urbani - Maggio 1984, messo a disposizione dal Prof. Ermanno Bianconi:

"Recatomi con la massima sollecitudine nella torre rinvenni che il volto che sosteneva il tetto grosso cm. 40 erasi diroccato e caduto sopra l'altro volto che divideva la torre in due piani e non potendo questo secondo reggere al forte ed improvviso peso del primo che gli andette sopra a gravitare fu costretto anchesso a rovinarsi: nel cadere di due volti dovevansi necessariamente sviluppare le loro curve e siccome gli sviluppi non potevano andare senza trovare spazio uguale alla lunghezza delle curve poste in piano perciò dovevansi allontanare i muri dell'imposte onde dar luogo al detto sviluppo.

Trovandosi il muro a levante meno robusto di quello a ponente fu costretto a distaccarsi con forte apertura verso tramontana di cm. 70 e di cm. 50 verso mezzogiorno all'altezza di m. 22 in ciascuna parete. Esaminata l'inclinazione dello slacciamento onde riconoscere la forza dell'equilibrio della facciata distaccata per determinare il tempo che avrebbe potuto rimanere in piedi riconobbi che essendo lo slacciamento obliquo e non perpendicolare eravi un peso nella sommità troppo forte in proporzione della base e per conseguenza imminente la sua totale caduta la quale avrebbe arrecato danni gravissimi a molte case perché sopra di esse sarebbonsi precipitate tutte le macerie e forse anche qualche persona avrebbe perduto la vita tanto più che non poca quantità di sassi sarebbero caduti in un lungo tratto della via corriera. [...]" (Rif. Fig. 1.78).

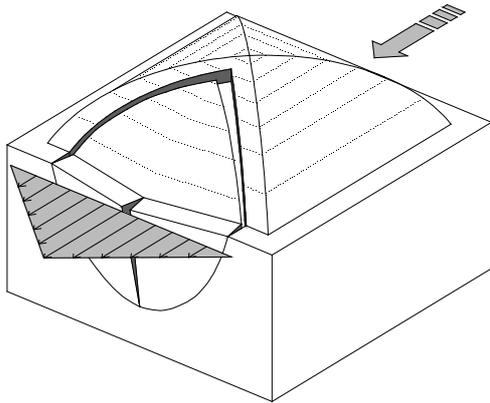


1.78 Disegno della fasi di demolizione della Torre di Colmatrano eseguito dal geometra Bufalini che nel 1857 ne diresse i lavori.

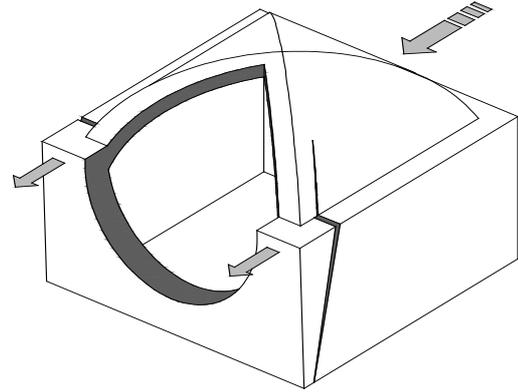
La demolizione venne decisa a seguito di una larga fenditura dei muri e per il timore che la Torre crollasse sulle sottostanti abitazioni del Borgo e della via S. Croce (Foto Capodacqua).

(La figura è tratta da “*Il Castello di Cantiano*”, di Giovanni Scatena, Urbania (PU), 1984).

La situazione cambia di poco se al posto della volta a botte si trova una struttura 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.

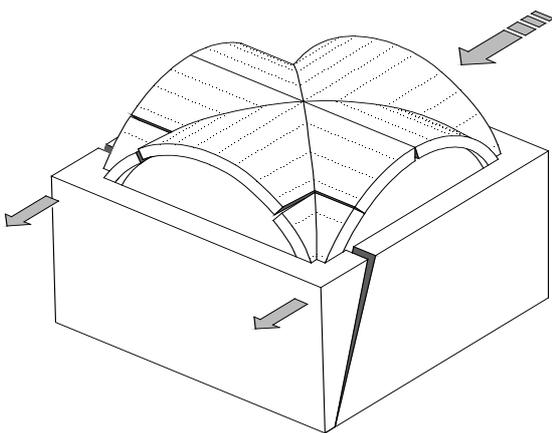


1.79 Meccanismo di rottura a flessione fuori del piano amplificato dalla spinta centrale del padiglione.



1.80 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.



1.81 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.

I meccanismi illustrati dimostrano che le modalità di dissesto delle strutture murarie dipendono strettamente dal tipo e dalla natura degli orizzontamenti e sono fortemente influenzati dalla qualità delle connessioni, soprattutto in presenza di spinte non contrastate. Si comprende pertanto la necessità di approfondire le indagini sul comportamento statico degli archi, delle volte e più in generale degli elementi spingenti.