

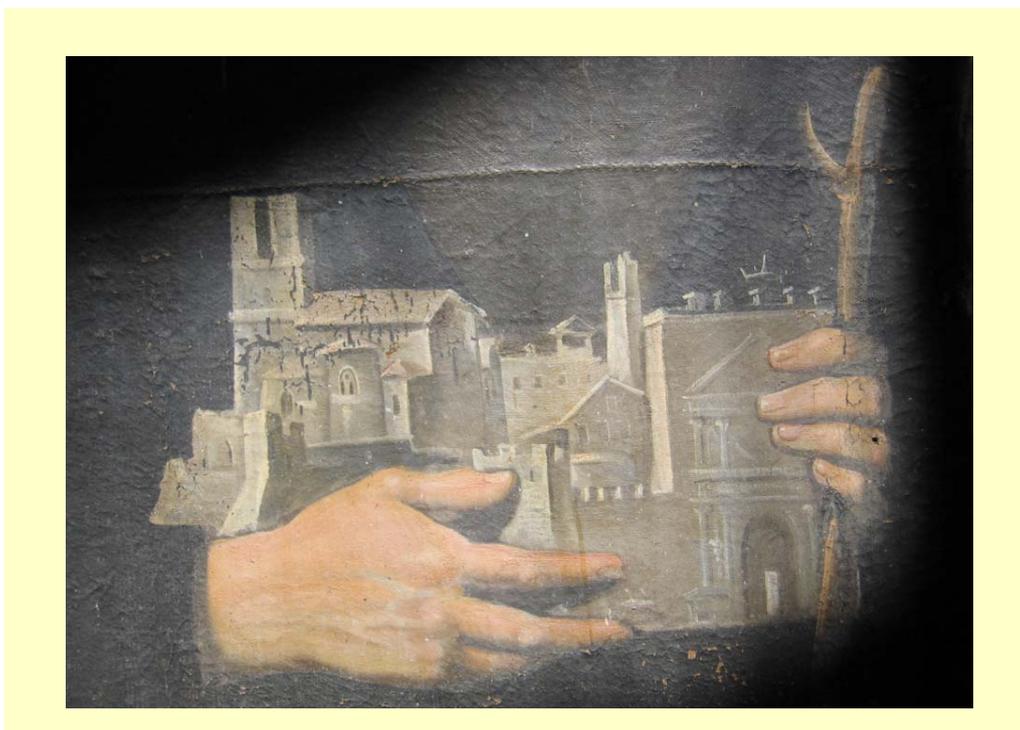
**Comune dell'Aquila**  
**MiBAC -Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici dell'Abruzzo**  
**Camera di Commercio - L'Aquila**  
in collaborazione con **ARCo** - Associazione per il Recupero del Costruito

giornata di studio

**LE MURATURE E IL RISCHIO SISMICO: SPERIMENTAZIONI A CONFRONTO**  
**Proposte per L'Aquila**

L'Aquila, 15 dicembre 2011 – Sala Convegni ANCE

\*



\*

**Lettura del comportamento meccanico delle murature storiche**  
**autostringenti e ingranate**  
**nelle prove di taglio e di compressione diagonale**

Giovanni Cangì

Libero professionista (ARCo - Associazione per il Recupero del Costruito storico)

Via Della Quercia,3/F – 06012 Città di Castello (PG) Tel. +39 349 2320720 e-mail: [ingcangi@tiscali.it](mailto:ingcangi@tiscali.it)

(\*) *Sant'Equizio di Amiterno, patrono dell'Aquila, in atto di proteggere la città dalle calamità - Particolare*

### Premessa

Il tema del convegno organizzato dalla Direzione Regionale per i BB.CC e Paesaggistici dell'Abruzzo e dalla Camera di Commercio di L'Aquila, in collaborazione con l'ARCo (*Associazione per il Recupero del Costruito*), pone all'attenzione dei professionisti il problema della valutazione delle caratteristiche meccaniche delle murature, come presupposto necessario per l'analisi critica della risposta sismica delle strutture murarie tradizionali, oltre che per la definizione di appropriati criteri di intervento finalizzati alla loro riparazione e al miglioramento.

Operazione da condurre ai sensi della Circ. n. 617/2009 - **Punto C8A.1.A.3**, nell'ambito di un quadro normativo che si è delineato con maggiore chiarezza solo in seguito al terremoto del 6 aprile 2009, con l'entrata in vigore del D.M. 14.01.2008.

Le conoscenze acquisite negli ultimi decenni sulla meccanica delle murature, attraverso le tante esperienze e gli studi condotti in diversi ambiti territoriali, hanno permesso di arricchire la casistica. Oggi, pertanto, l'abaco delle murature storiche si è molto ampliato rispetto alle poche tipologie considerate in passato nella fase di ricostruzione postsismica del Friuli, dell'Irpinia e di altri territori interessati dal fenomeno.

Tuttavia le NTC, affinate in seguito alle recenti tragiche esperienze dei terremoti che hanno colpito l'Umbria nel 1997 e poi il Molise, nel 2002, permettono di fare riferimento ai valori medi statistici dei parametri di resistenza e di rigidezza, solo attraverso una loro cautelativa riduzione, ottenuta attraverso l'applicazione di opportuni coefficienti di sicurezza.

A tal fine la normativa ha introdotto il concetto di **Livello di Conoscenza**, cui si associa un **Fattore di Confidenza** che premia chi, attraverso indagini approfondite e sperimentazioni adeguate, va a ricercare le reali caratteristiche di resistenza e le peculiarità della muratura in esame, piuttosto che affidarsi ad una analisi sommaria di carattere tipologico limitata alla sola osservazione dei paramenti.

Questo tipo di approccio segue una logica precisa, che indirizza verso un percorso di analisi e sperimentazione da seguire con estrema attenzione, per evitare che le prove stesse conducano ad errate valutazioni sul reale livello di sicurezza.

In ogni caso risultano sempre determinanti le scelte del tecnico firmatario che, sostenuto dalla propria esperienza, è chiamato ad esprimersi anche sull'attendibilità dei risultati, soprattutto quando questi orientano verso l'assunzione di valori di resistenza superiori a quelli indicati dalle tabelle allegate alla normativa.

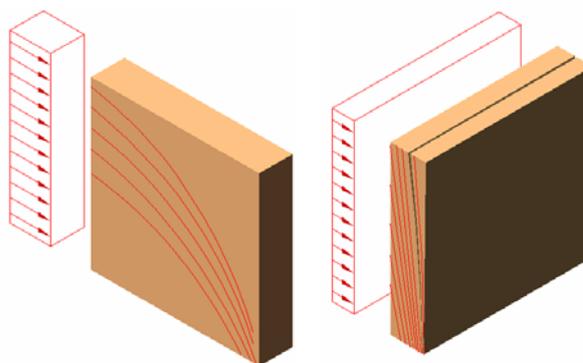
E' il caso di ricordare che le indagini sulla qualità muraria rappresentano solo un passaggio del complesso percorso di analisi definito puntualmente dalla normativa e che investe vari aspetti del comportamento strutturale. Fra questi assume rilevanza l'accertamento delle condizioni di vincolo delle pareti, determinanti nell'influenzare il comportamento sismico locale e globale di qualsiasi struttura muraria.

Per rimanere nell'ambito dell'argomento specifico del convegno ci si limiterà pertanto a trattare il tema generale della qualità muraria e delle prove sperimentali, rimandando a future occasioni l'analisi di altri aspetti non secondari.

Si ritiene comunque opportuno un breve richiamo su alcuni elementi fondamentali della meccanica delle murature, necessario per comprendere meglio i fenomeni che influiscono sull'esito delle stesse prove sperimentali.



01) Leonardo da Vinci, *Studi sull'acqua che scorre superando ostacoli*<sup>1</sup>



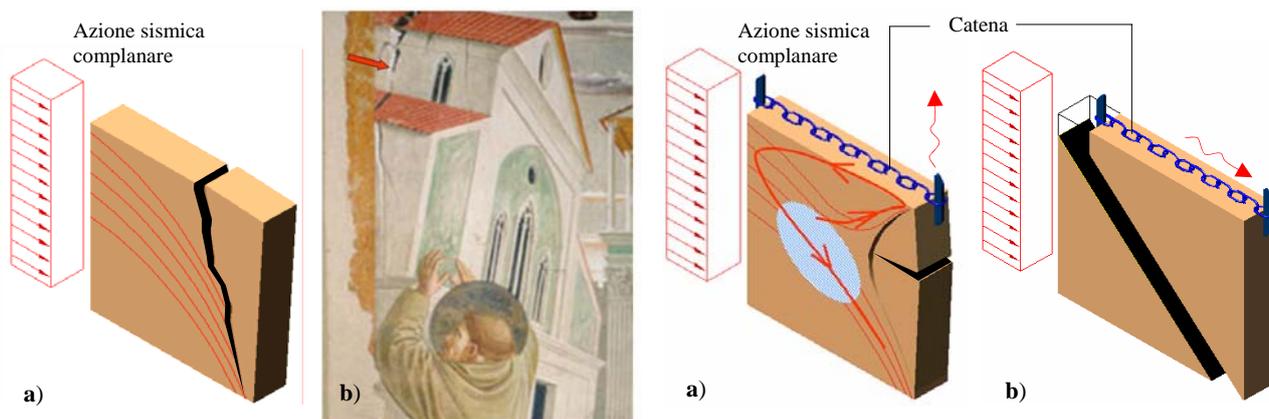
02) Andamento dei flussi di compressione che si generano all'interno di pareti murarie sollecitate da azioni sismiche orizzontali, complanari e ortogonali.

<sup>1</sup> Particolare della carta RL12660r, Royal Library Windsor, tratta da F.Zöllner, *Leonardo da Vinci* – TASCHEN, pag.523

*Richiami su alcuni aspetti elementari ed intuitivi della meccanica delle murature<sup>2</sup>*

Nella compressione dei complessi fenomeni che interessano la meccanica delle murature, condizionati da innumerevoli fattori, associati alle caratteristiche dei materiali componenti, alle tecniche di posa in opera, alla configurazione geometrica e a tanti altri che si potrebbero elencare, vi sono degli aspetti fondamentali sui quali è opportuno soffermarsi.

In particolare l'edilizia storica, ordinaria o specialistica che sia, manifesta delle tendenze al dissesto per effetto delle azioni sismiche che si possono ricondurre a determinate tipologie. Si intende soprattutto l'edilizia non alterata, quella, cioè, che conserva i caratteri costruttivi originali, mentre questo non vale per tanti edifici modificati attraverso interventi, spesso recenti, che impediscono una chiara e intuitiva comprensione del loro attuale comportamento strutturale.



03.a) Cuneo di distacco in testata di parete sollecitata da azioni sismiche complanari.

03.b) Lo stesso tipo di lesione rappresentata in un dipinto di Benozzo Gozzoli (XV sec.) - Chiesa di San Francesco, Montefalco (PG).

04) Cinematismi determinati da azioni sismiche complanari congruenti con il vincolo introdotto dalla catena sommitale:

a) rottura a flessione in testata;  
 b) formazione di lesione diagonale per rottura a taglio.

In una parete sollecitata nel piano (fig. 03), ad esempio, tende a generarsi spontaneamente un cuneo di distacco in corrispondenza dell'estremità sottovento, con un profilo che segue l'andamento dei flussi di compressione che si diffondono al suo interno, formando un arco di scarico che indirizza le forze verso la fondazione.

Questo tipico cinematismo si manifesta con evidenza nel momento in cui si forma la lesione di strappo che segna il distacco della porzione di muro di testata, evidenziando un fenomeno tipico che però non viene in alcun modo considerato dai modelli di analisi globale, tipo POR o derivati, largamente utilizzati ancora oggi, che privilegiano l'ipotesi di rottura a taglio dei pannelli.

Senza dubbio l'inserimento di catene di trattenuta (fig. 04)<sup>3</sup> costituisce un tipo di intervento risolutivo e alquanto appropriato per contrastare questo tipo di cinematismo.

In presenza della catena i flussi tensionali vengono deviati e catturati dalla chiave di contrasto, per essere ricondotti a monte attraverso l'elemento resistente a trazione. In questo modo la parete riesce a conservare la sua integrità, a scapito di un sensibile incremento dello sforzo di taglio che si genera al centro del pannello (fig. 04.a).

Un incremento che può rivelarsi fatale nel determinare una rottura a taglio del pannello murario con la formazione di una classica lesione diagonale, congruente con la presenza del vincolo di trattenuta sommitale (fig. 04.b).

Può sembrare piuttosto semplice riprodurre questa tipica condizione di carico, che nella codifica delle prove sperimentali previste dalla normativa ricade sicuramente nella tipologia della compressione diagonale. Ma se risulta agevole applicare dei carichi equivalenti, non è altrettanto semplice creare condizioni di vincolo del pannello di prova simili a quelle reali e tali da rendere pienamente attendibili le prove.

Questo contrasta con il principio generale secondo cui le prove sperimentali condotte su pannelli murari sono tanto più significative quanto più le sollecitazioni e la configurazione di vincolo del pannello si avvicinano alle reali condizioni di esercizio.

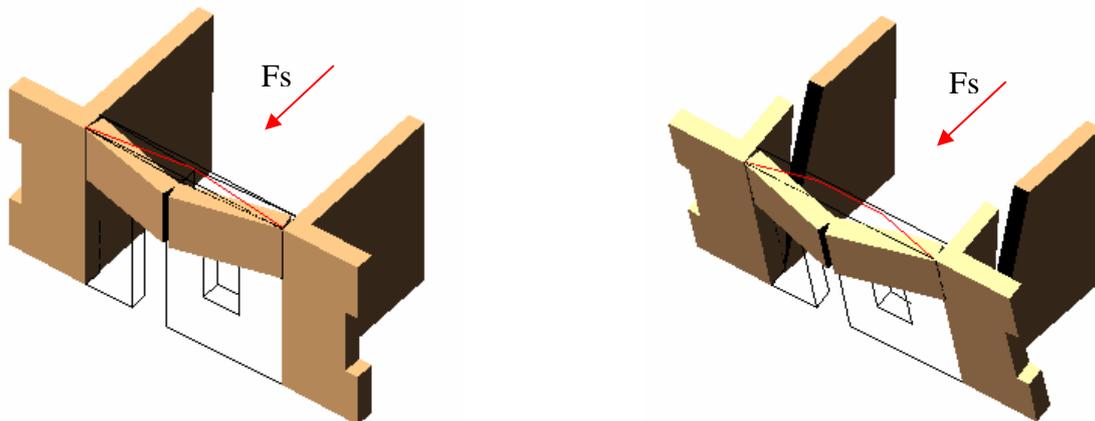
<sup>2</sup> Per approfondimenti sull'argomento si rimanda a: G.Cangi, *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico* – DEI, Roma 2005.

<sup>3</sup> Si noti che la catena è indicata in modo simbolico, quando nella realtà può essere costituita da barre metalliche applicate a fianco della parete, oppure da radiciamenti lignei inseriti all'interno o da qualsiasi altro elemento in grado di assorbire sforzi di trazione.

In pratica le prove sperimentali da condurre sulle murature esistenti secondo le procedure codificate dalle norme offrono indicazioni precise solo per alcune determinate condizioni di esercizio.

Si consideri, ad esempio, che per le strutture in legno si dispone di valori di resistenza a trazione, a compressione, a taglio e a flessione, oltre a quelli delle rigidità, ricavati attraverso specifiche prove di laboratorio condotte in modo da poterle distinguere anche in funzione del tipo di sollecitazioni.

Nelle murature si pongono gli stessi interrogativi, per esempio, quando si generano sforzi di compressione causati da sollecitazioni di flessione orizzontale (Fig. 05), eppure le norme non suggeriscono alcuna prova sperimentale relativa a questi pericolosi cinematismi.



05) Meccanismo fuori del piano responsabile dell'innescò di sforzi di compressione orizzontali complanari alla parete.

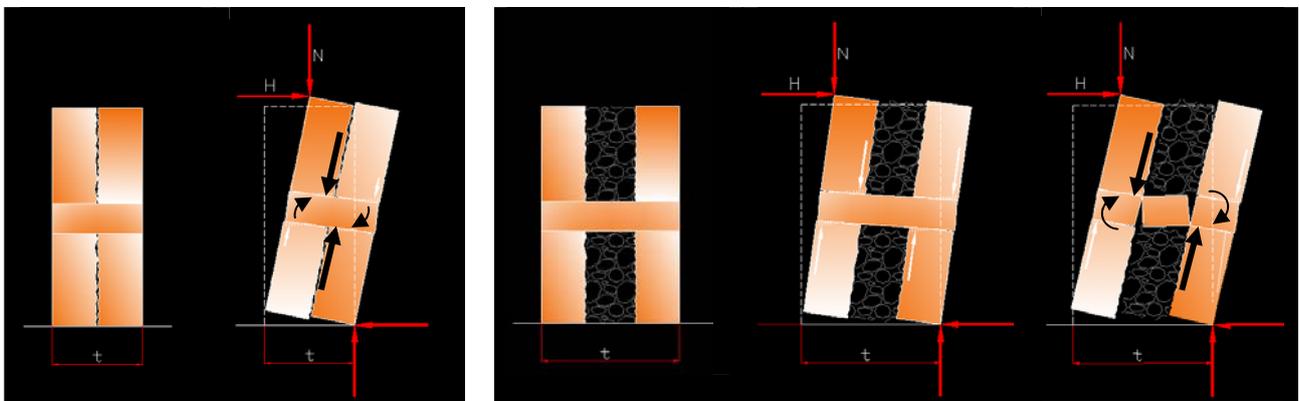
Nel caso delle murature, pertanto, le prove sperimentali hanno lo scopo di fornire solo alcuni parametri essenziali, costituiti dalle resistenze a compressione e a taglio e dai moduli elastici normale e tangenziale, ritenuti rappresentativi di un intero pannello.

L'estrema semplificazione di un simile approccio tende ad assimilare la muratura ad un materiale omogeneo ed isotropo, rispondente a quel modello ideale, ma poco realistico, suggerito dalla scienza delle costruzioni.

In effetti le murature storiche sono delle "scatole chiuse" che non tradiscono facilmente il loro contenuto, neanche quando mostrano i paramenti a vista e più sono spesse e più sollevano dubbi sulla consistenza del loro nucleo interno.

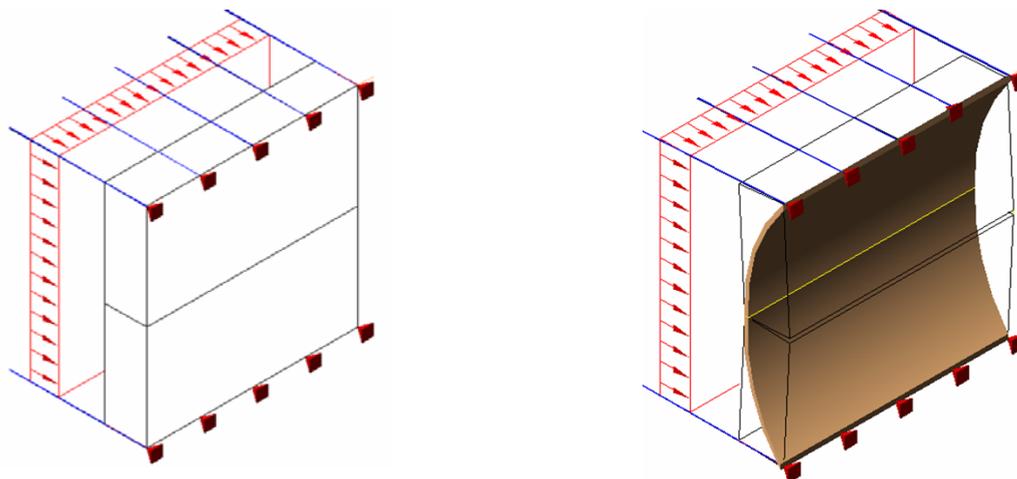
L'unica certezza, per le murature, sta nel fatto che lo spessore non costituisce un indicatore di qualità, semmai il contrario, per il fatto che oltre certe dimensioni i diaconi scompaiono e comunque non risulterebbero più efficaci a causa dell'effetto leva responsabile della disgregazione dei paramenti. Di conseguenza i pannelli murari di spessore elevato non possono garantire un comportamento monolitico.

Nei cinematismi strutturali questo comportamento favorisce una più rapida evoluzione al collasso.

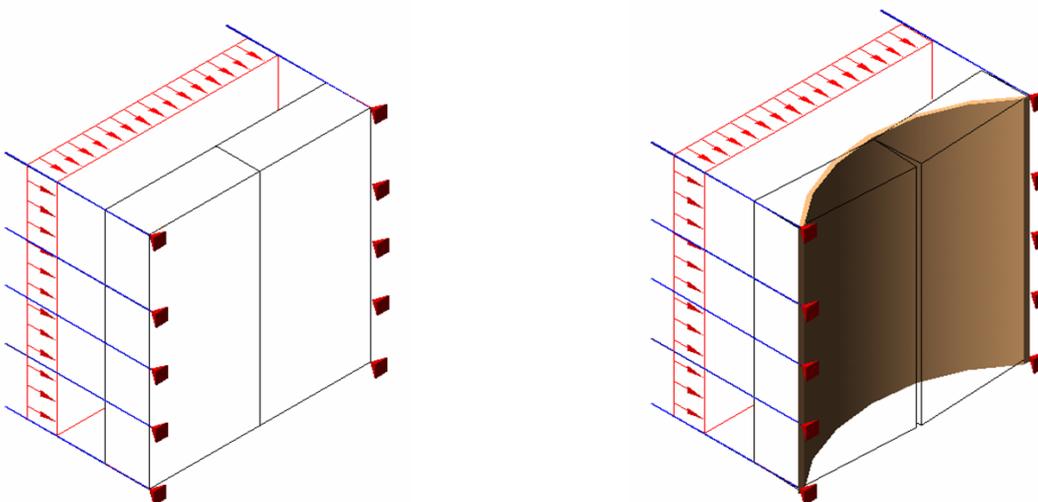


06) Ingranamento dei diaconi nelle pareti a doppio paramento ed effetto leva generato in presenza di nucleo interno

A tradire la vera consistenza delle murature storiche sono proprio i cinematismi di danno, che nel mettere a dura prova le pareti ne evidenziano meglio le caratteristiche e soprattutto i difetti. In particolare i cinematismi fuori del piano, causati da azioni ortogonali, sono quelli che più degli altri tendono a disgregare i paramenti.



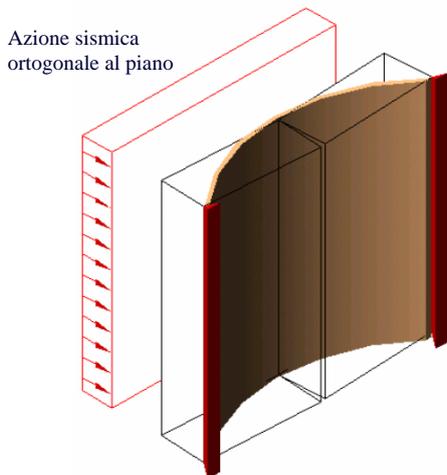
07.a) Meccanismi resistenti con formazione di volte di scarico in una parete sollecitata da azioni ortogonali in funzione dei vincoli di trattenuta: formazione di volta a botte orizzontale in un muro trattenuto alla base e in sommità.



07.b) Meccanismi resistenti con formazione di volte di scarico in una parete sollecitata da azioni ortogonali in funzione dei vincoli di trattenuta: formazione di volta a botte verticale per parete trattenuta ai lati.

Tuttavia questi fenomeni si manifestano con modalità molto diverse in funzione dei vincoli di trattenuta delle pareti e dei potenziali meccanismi resistenti che ogni singolo muro è in grado di esplicitare.

L'esperienza aiuta a decifrare il comportamento di queste pareti, che tendono a privilegiare la formazione di archi o di più ampie superfici di scarico per resistere alle diverse sollecitazioni e rende consapevoli del fatto che non si può esprimere un giudizio di qualità attendibile basandosi solamente su quattro parametri meccanici.

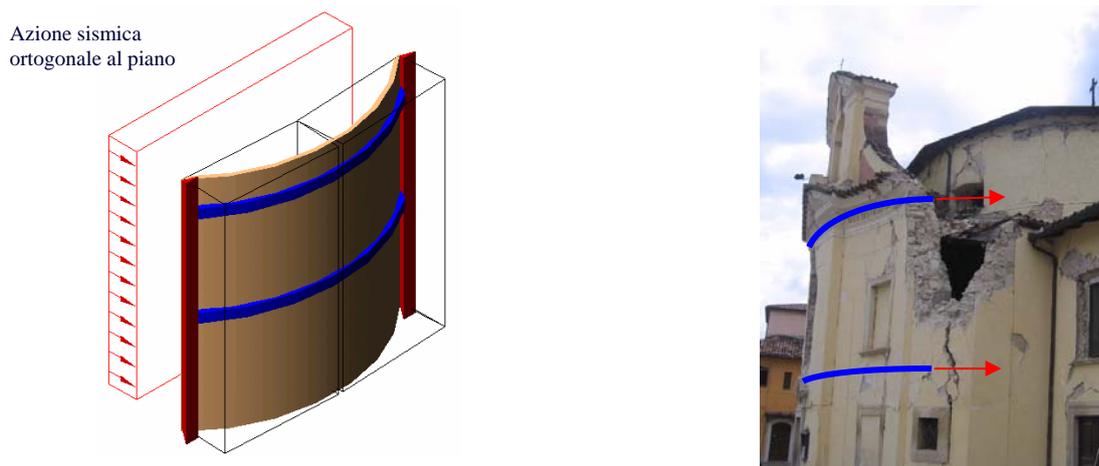


08) Volta ad asse verticale su parete vincolata ai lati, concretizzata nella facciata della chiesa aquilana delle Anime Sante.

Il meccanismo di figura 07.b si concretizza nella geometria della nota facciata della chiesa aquilana delle Anime Sante, dove l'architetto ha letteralmente "scavato" il fronte piatto per creare una specie di diga che, attraverso la sola resistenza a compressione, permette di contrastare le azioni ribaltanti che per i fronti delle chiese costituiscono un evidente fattore di vulnerabilità.

Una configurazione ribaltata e caratterizzata da una maggiore vulnerabilità è quella della chiesa dell'Immacolata a Paganica (Fig. 09), nella quale le azioni ortogonali generano degli sforzi di trazione nel muro convesso della facciata. Sforzi che la muratura non è assolutamente in grado di sopportare, per cui ne consegue lo strappo dei cantonali.

Una situazione ancora diversa si osserva nelle pareti trattenute da vincoli puntiformi d'angolo (Fig. 10), che innescano una configurazione resistente riconducibile al meccanismo delle volte a crociera impostate su quattro peducci in corrispondenza degli angoli.



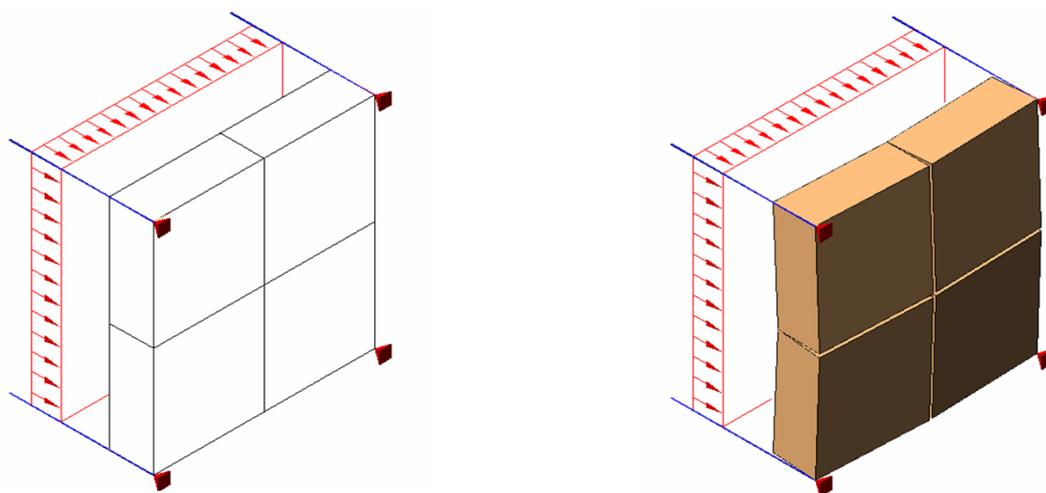
09) Chiesa dell'Immacolata a Paganica: schema a "corda blanda" del meccanismo resistente di facciata in presenza di un'azione di trattenuta che il cantonale non è stato in grado di esplicare.

L'espulsione di muratura al centro della parete tende a formare una nicchia che, pur nella forma irregolare, simula la cavità di facciata della chiesa delle Anime Sante.

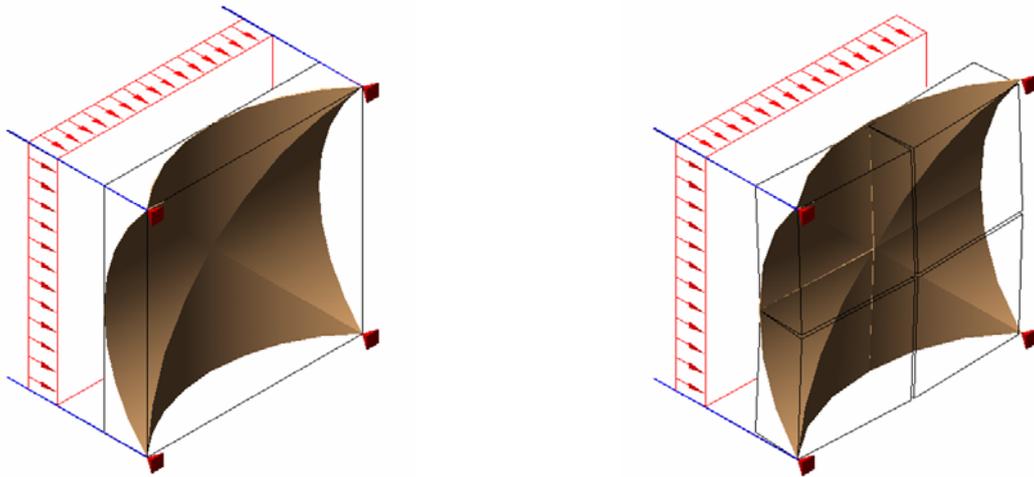
Si consideri che l'effetto dei vincoli di trattenuta puntiformi in realtà si combina con quello assicurato dalle connessioni con le pareti laterali, in quanto efficaci, e con gli orizzontamenti di piano.

Allo stesso modo il meccanismo si modifica anche a causa dei carichi verticali, che spostano in alto la cerniera intermedia, anche se la tendenza è quella illustrata negli schemi grafici.

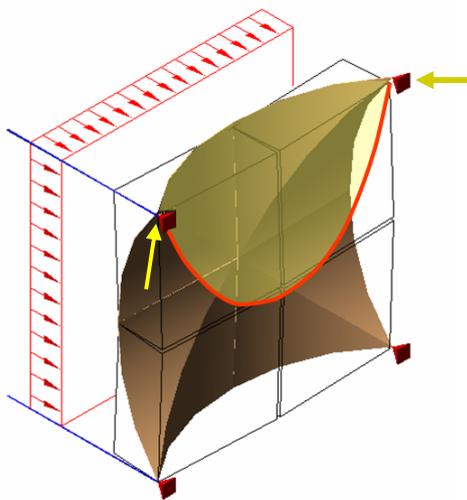
Questo meccanismo permette di individuare un tipico elemento di debolezza nella "lunetta" centrale sommitale (Fig. 11), dove le spinte equilibranti laterali non possono essere bilanciate con particolare efficacia, per cui le pareti di grandi dimensioni, come le facciate delle chiese, manifestano spesso questa pericolosa tendenza al ribaltamento.



10.a) Meccanismi resistenti in pareti sollecitate da azioni ortogonali e in presenza di elementi di trattenuta d'angolo



10.b) Meccanismo interno con volta a crociera nelle pareti sollecitate da azioni ortogonali con elementi di trattenuta d'angolo



11) Collasso dell'unglia superiore della "volta a crociera" che si genera all'interno della struttura.

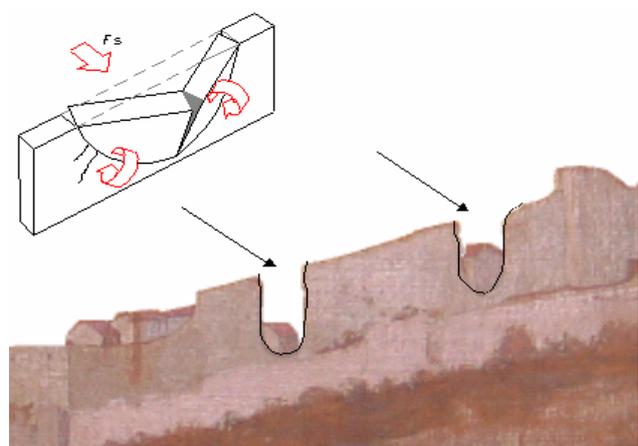


12) Collasso del timpano sommitale di facciata della Chiesa di Bazzano (AQ), con profilo di distacco parabolico.

Il fenomeno mette in evidenza anche le cause e le modalità con cui si verificano certi collassi parziali di terrapieni o di cinte murarie storiche come quelle dell'Aquila (Fig. 13), rappresentate con lo stesso profilo in un dipinto d'epoca relativo alle mura di Montone (PG), crollate sotto l'effetto di un sisma verificatosi attorno alla metà del 1400<sup>4</sup> (Fig. 14).



13) L'Aquila - Cinta muraria medievale con crolli causati dalla scossa sismica del 6 aprile 2009 e successive. (Foto A.Borri - 2009).



14) Particolare della cinta muraria di Montone (PG) danneggiata da un sisma nel 1458, con indicazione dei crolli avvenuti in alcuni tratti e modello di collasso.

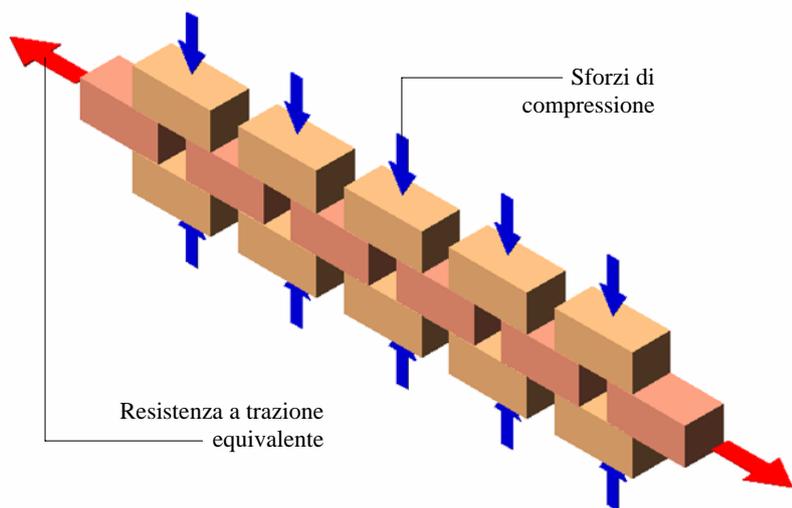
<sup>4</sup> B.Caporali: *Madonna della Misericordia* (1482) - Museo di San Francesco, Montone (PG)

I meccanismi illustrati sono i più elementari che si possono innescare spontaneamente nelle murature, sfruttando le resistenze a compressione e a taglio che derivano dalle caratteristiche proprie degli inerti e delle malte, soprattutto quando la forma e le dimensioni delle pietre non offrono da sole sufficienti garanzie. E' noto, infatti, che la qualità della malta è tanto più importante quanto più piccoli e informi sono gli inerti, secondo una regola confermata dal fatto che blocchi di pietra squadrati possono essere murati anche a secco o con poca malta, mentre per pietre piccole e arrotondate (ghiaie), solo un forte legante può garantire una sufficiente resistenza.

#### Funzionamento meccanico delle diverse tipologie murarie

La modellazione dei cinematismi elementari sopra illustrati è frutto di un approccio intuitivo che prescinde dalla effettiva composizione delle murature, quando in realtà lo stesso meccanismo può evolvere in modo diverso a seconda del tipo e qualità della muratura, sempre determinante.

Per comprendere le cause di questo è necessario analizzare i meccanismi interni che si instaurano attraverso i contatti fra le pietre, svincolandosi dalla teoria elasticista, che assimila il comportamento della muratura a quello di un materiale omogeneo ed isotropo. Soprattutto è necessario individuare i fattori che conferiscono alla muratura quelle resistenze a compressione e a taglio che le permettono di reagire in modo più o meno efficace alle diverse sollecitazioni.



15) Effetto catena in una muratura di elementi squadrati ingranati, assicurata dall'attrito e dalla coesione della malta

E' necessario, inoltre, superare un ostacolo concettuale, rappresentato dalla generale convinzione che la muratura ideale sia solo quella realizzata con elementi regolari e squadrati, apparecchiati su piani orizzontali con giunti verticali sfalsati. Un modello che si avvicina più di ogni altro alla configurazione di un monolite.

Questo tipo di tessitura, cui oggi tutti fanno riferimento (Fig. 15), costituisce la versione moderna della classica muratura isodoma o di mattoni pieni.

La maggior parte delle murature tradizionali però non è così; ad esempio, la muratura ottenuta con l'impiego di pietrame grossolanamente squadrato, legato con malta di calce ordinaria e generalmente privo di collegamenti trasversali fra i paramenti, è molto lontana da questo modello.



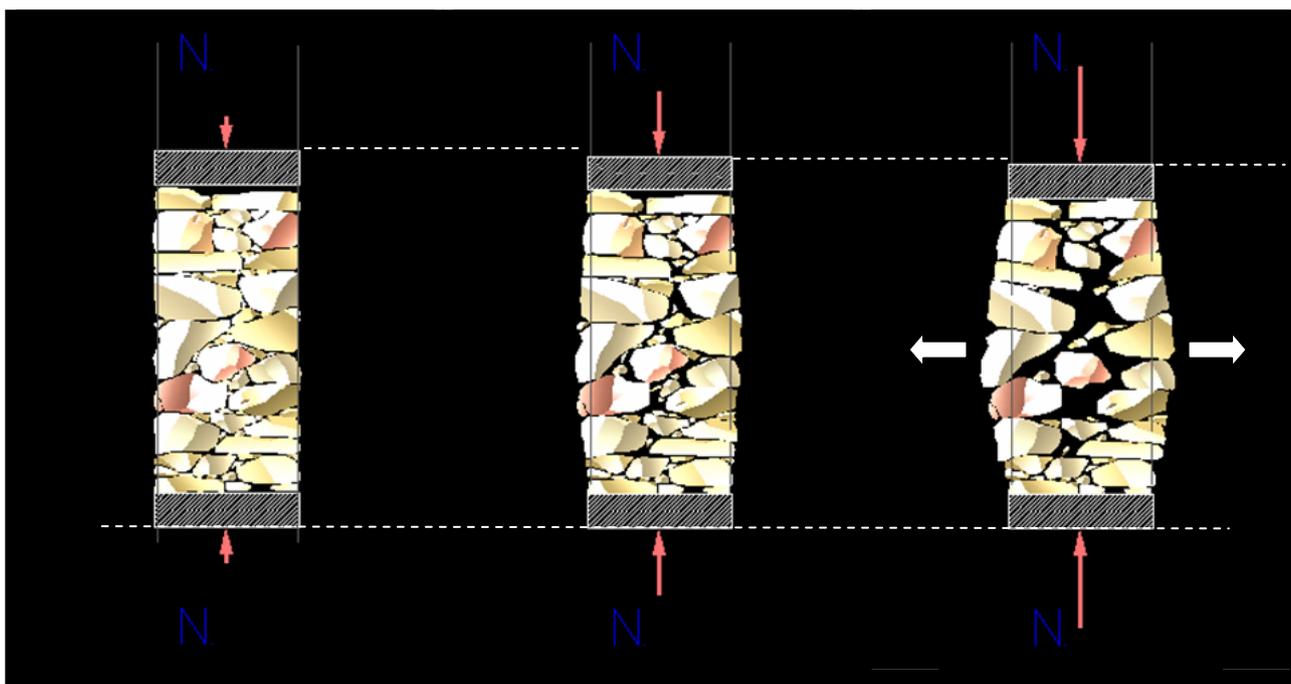
16) Definizione di muratura secondo Nicola Cavalieri San Bertolo

Questa condizione, da sola, è sufficiente per relegare gran parte delle murature storiche (anche quelle aquilane) in una categoria secondaria, gravata da severi giudizi di qualità e pregiudizi che indirizzano sistematicamente verso la demolizione piuttosto che verso un possibile recupero.

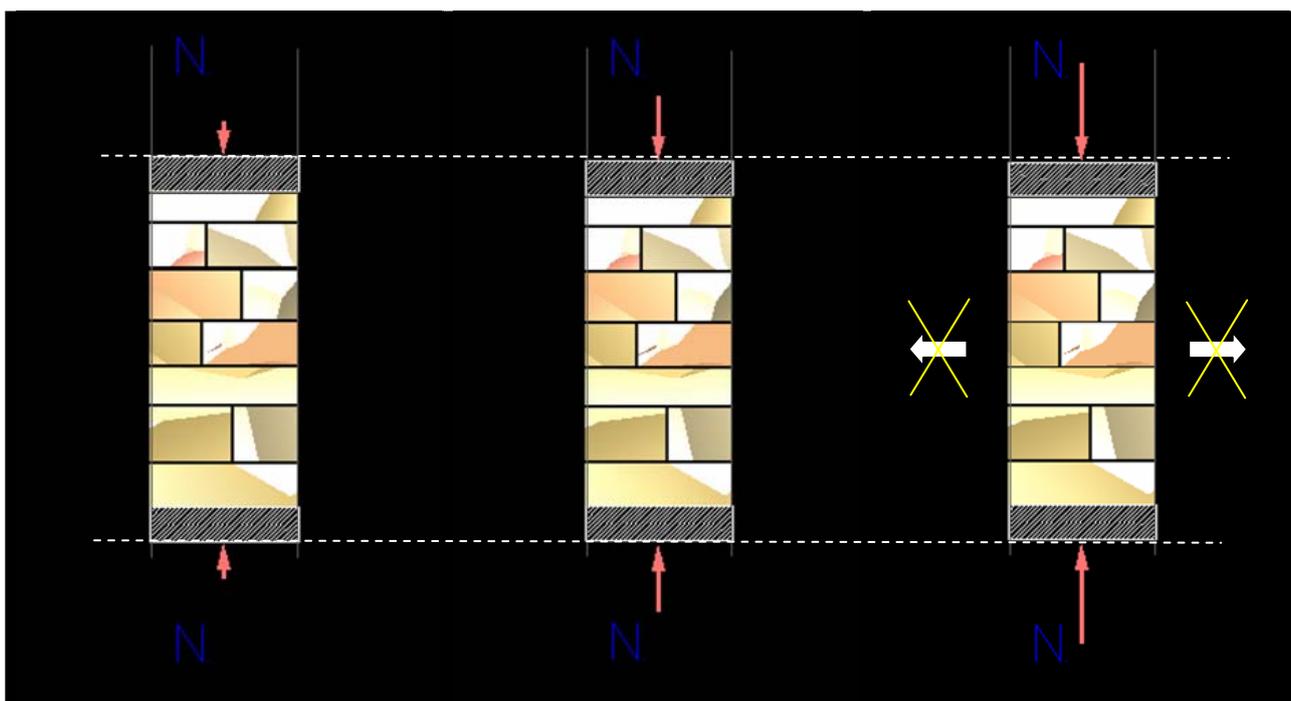
Eppure le murature aquilane, pur avendo subito danni rilevanti in seguito al sisma, hanno manifestato delle risorse di resistenza importanti, che spingono a rivalutarle sotto vari aspetti.

Per questo ci viene in aiuto un grande studioso del XIX sec., Nicola Cavalieri San Bertolo, che in un suo trattato di architettura statica dell'epoca, offre una chiave di lettura molto diversa dal nostro modo di concepire e leggere la muratura, ma alquanto efficace nel significato che si coglie soprattutto in una sua frase, che la descrive come:

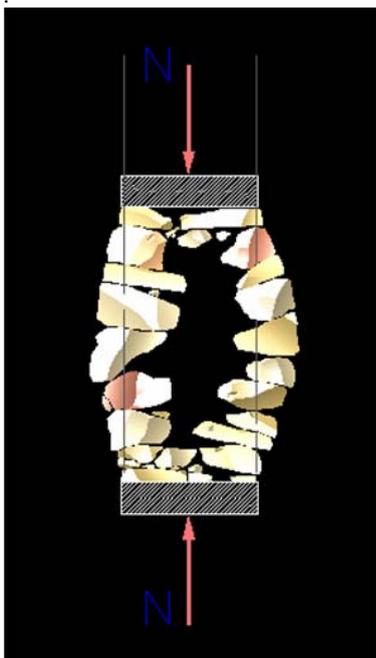
*“...un ammasso artefatto di pietre ... disposte in guisa tale ... che quelle forze, per cui tenderebbe ciascuna di esse a spostarsi, s’impediscono e si elidano nel vicendevole conflitto”.*



17.a) Stati deformativi e fenomeni di instabilità indotti da uno stato di compressione semplice su pannelli murari in pietrame sbizzato



17.b) Stati deformativi indotti da uno stato di compressione semplice su pannelli murari in pietrame squadrato.



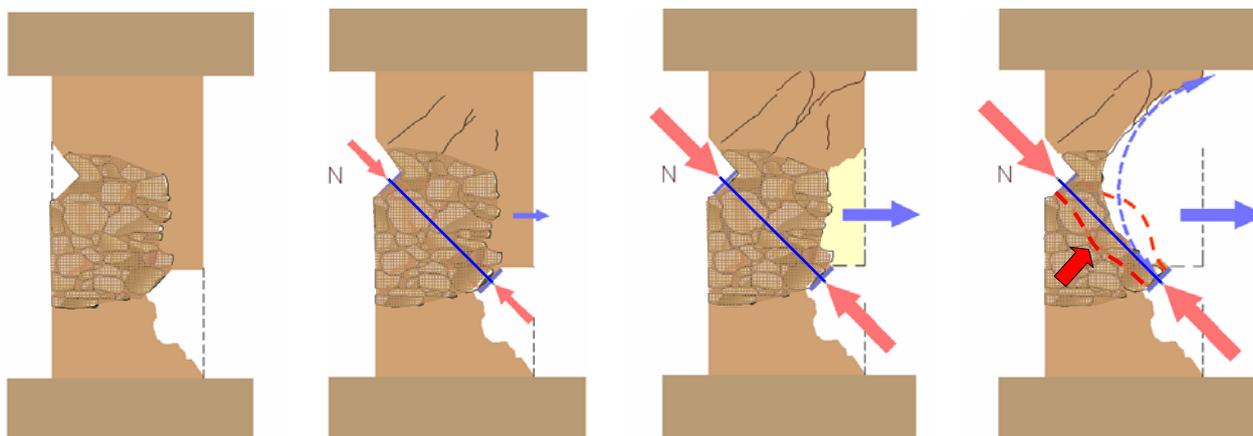
18) Tipico fenomeno di espulsione dei paramenti associato a fenomeni di instabilità

Questo estratto sottolinea il concetto di “vicendevole conflitto”, da interpretare come l’azione di contrasto che si instaura spontaneamente fra pietre informi, che tendono ad essere espulse lateralmente in conseguenza dello stato di compressione verticale. Un effetto negativo, in linea di principio, ma che ha pure dei risvolti utili, come si vedrà in seguito.

La spinta trasversale favorisce la disgregazione degli inerti, con un effetto che alla scala maggiore si traduce nel distacco dei paramenti murari (Fig. 17), con l’innesco di fenomeni di instabilità che prescindono dalle buone caratteristiche di resistenza dei materiali componenti (Fig. 18).

Lo stesso effetto di espulsione, ma in direzione complanare alla parete, si osserva nei pannelli murari sottoposti a prove di compressione diagonali (Fig. 19), falsando l’esito delle prove stesse.

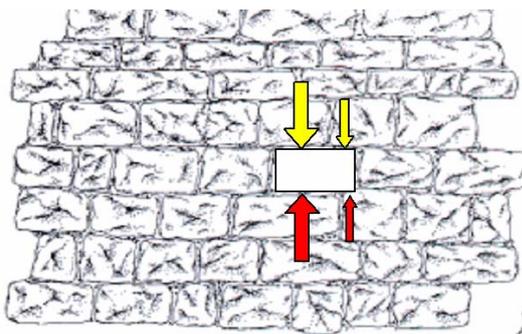
Questo è un altro aspetto sul quale è necessario riflettere, per comprendere meglio un fenomeno che ha riflessi importanti sulle prove meccaniche di cui si sta trattando.



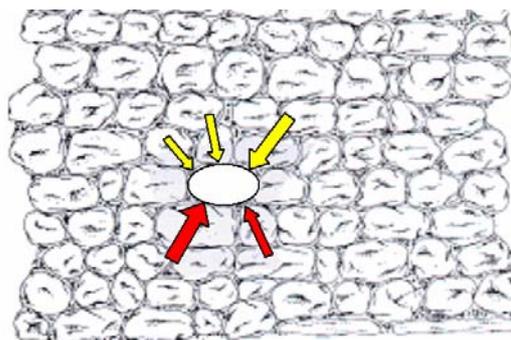
19) Progressione di una prova di compressione diagonale con espulsione di materiale associato a fenomeni di instabilità.

Il tentativo di dare una spiegazione semplice e logica di questi fenomeni si affida all’osservazione e al confronto fra diversi paramenti murari, costituiti da elementi squadrati o da pietrame sbizzato e irregolare (Fig. 20).

Nel primo caso l’equilibrio dei singoli elementi è assicurato dalla trasmissione di forze verticali, mentre nelle pietre informi i contatti avvengono su piani inclinati e generano delle componenti di sforzo orizzontali. E’ questa la muratura in cui si instaura quel “vicendevole conflitto” sottolineato dal Cavaliere-San Bertolo, contrastato dall’attrito e dalla resistenza della malta, che lo stesso Cavaliere definisce “*materia glutinosa atta ad avviluppare le pietre per tenerle saldamente aderenti l’una all’altra*”.



a) muratura di blocchi squadrati disposti su filari orizzontali: forze equilibranti verticali



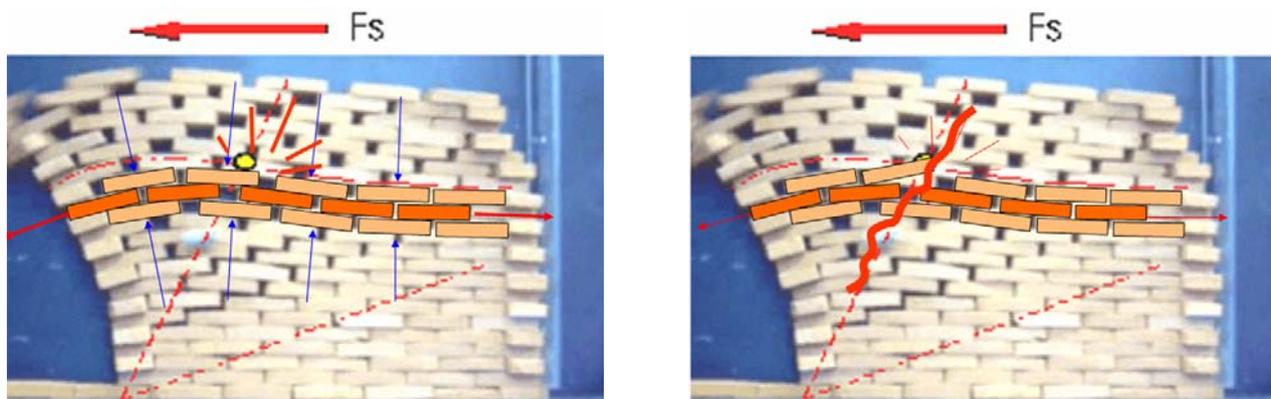
b) muratura di ciottoli di fiume irregolari sovrapposti e ingranati: forze equilibranti inclinate

20) Trasmissione degli sforzi interni nelle murature in relazione alla conformazione degli inerti squadrati o arrotondati

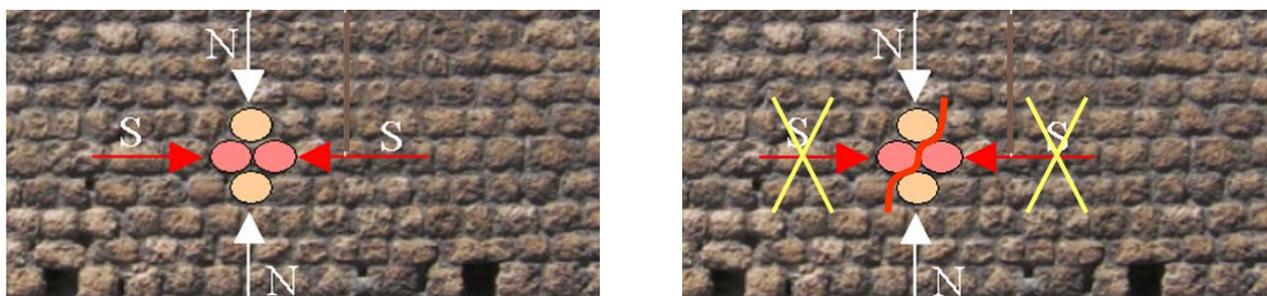
In relazione a questa caratteristica le murature si possono suddividere in due categorie fondamentali:

- 1) quelle che ricercano le connessioni orizzontali nel piano attraverso l'ingranamento degli elementi, sagomati in forme squadrate e allungate, in grado di assicurare quell'“effetto catena” che deriva dalla loro giusta sovrapposizione (Fig. 21), favorito anche dalla coesione della malta e dall'attrito che si traduce in una resistenza a trazione equivalente della muratura;
- 2) quelle che, non potendo contare su incatenamenti efficaci, si affidano al reciproco contrasto che si instaura fra gli inerti (sbozzati o arrotondati) per generare uno stato di precompressione orizzontale nel piano, così da compensare il difetto di “resistenza a trazione” (Fig. 22).

Alla prima categoria appartengono tutte le murature moderne, realizzate con blocchi squadrati incatenati, mentre un esempio canonico del secondo tipo è senza dubbio il cosiddetto “apparecchio aquilano”, costituito da ciottoli arrotondati.



21) Effetto catena in una parete di elementi squadrati evidenziato nella dinamica di collasso di una parete sollecitata nel piano<sup>5</sup>. Formazione di lesione a strappo nel punto di superamento della resistenza a trazione equivalente



22) Apparecchio aquilano con azione di contrasto orizzontale: formazione di lesione a strappo nel punto di annullamento dello sforzo di compressione orizzontale

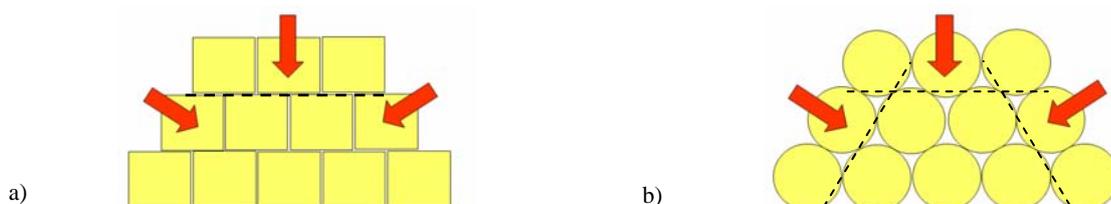
<sup>5</sup> Prove sperimentali su modelli in scala di muratura laterizia a secco condotte presso il Laboratorio di Costruzioni dell'I.T.C.G. “I.Salviani” – Città di Castello (PG), 2002.

A questa seconda categoria appartiene la maggior parte delle murature storiche che, sebbene ritenute di qualità scadente, contengono in sé dei principi costruttivi che è opportuno evidenziare, facendo riferimento ad una configurazione estrema costituita da elementi cilindrici (Fig. 23.b).

Un modello poco realistico, che tuttavia mette in evidenza una singolare caratteristica di questa muratura che la distingue positivamente, rappresentata dalla presenza di tre giaciture principali equivalenti, che le permettono di assorbire allo stesso modo sforzi obliqui o verticali, pertanto adatta alla risposta sismica.

In sostanza questo modello rispetta maggiormente quell'ipotesi di isotropia che è poco compatibile con le caratteristiche di una muratura di blocchi squadrati, dove la sola giacitura orizzontale è adatta a sopportare sforzi di compressione verticali, mentre gli sforzi obliqui generano sollecitazioni di taglio sugli stessi piani di giacitura.

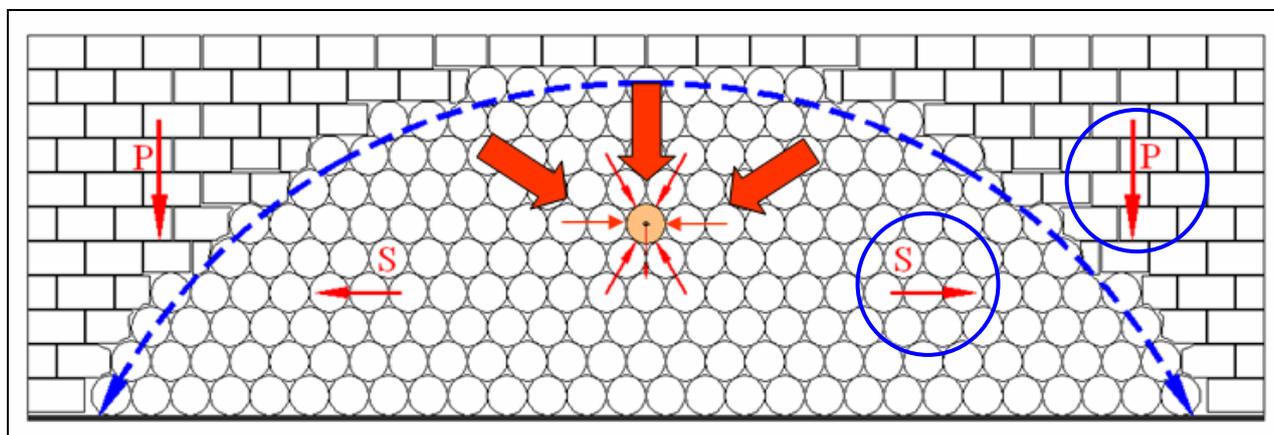
La muratura di cilindri ricorda il comportamento di una massa liquida, nella quale la pressione trasmessa ad un elemento si trasmette con la stessa intensità a tutti gli altri elementi e in tutte le direzioni.



23) Schema delle giaciture principali che caratterizzano murature di blocchi squadrati e di elementi cilindrici, particolarmente idonee ad assorbire sforzi inclinati, oltre che verticali.

I limiti oggettivi di una muratura di “cilindri” sono rappresentati dall'instabilità delle testate, che necessitano di una forte azione di trattenuta o di contrasto.

I cantonali squadrati nelle murature di pietrame sbozzato, oltre ad assicurare una buona connessione con la parete ortogonale, hanno la funzione di contenere le spinte interne che la muratura trasmette in testata come la pressione di un liquido contro le pareti di un recipiente (Fig. 24).



24) Muratura a cilindri stabilizzata in testata con blocchi squadrati incatenati che assumono la funzione di contrafforti

L'effetto spingente è lo stesso che si rileva in una catasta di tronchi di legna sovrapposti e puntellati alle estremità (speroni) o trattenuti attraverso la disposizione di radicamenti (tiranti) realizzati con delle ramaglie e frascame di scarto (Fig. 26).

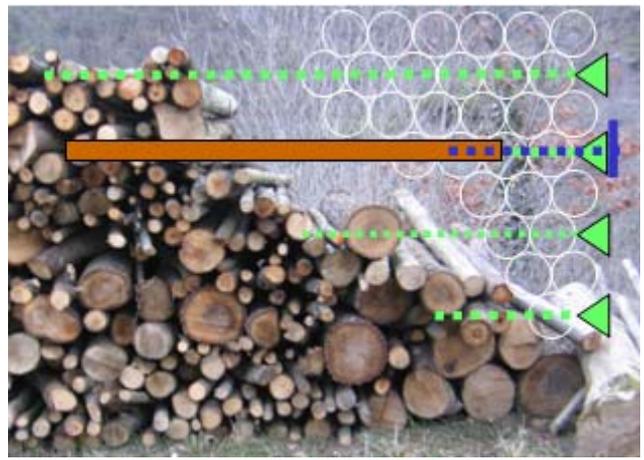
Il boscaiolo pertanto usa lo stesso criterio che in modo più raffinato i mastri muratori aquilani hanno adottato nella costruzione delle testate di muro, per dare stabilità alle estremità attraverso questo semplice accorgimento costruttivo. Un approccio simile a quello che già i romani seguivano nella realizzazione di robusti cantonali di pareti realizzate in *opus reticolatum* (Fig. 27). Un breve richiamo sulle tecniche murarie più antiche permette di trovare la sintesi di questo ragionamento nella costruzione di edifici a pianta circolare (fig. 28), privi di cantonali e quindi realizzabili interamente con elementi arrotondati.<sup>6</sup>

L'argomento, seppure interessante, rischia di spostare l'attenzione su aspetti che al momento esulano dalla trattazione specifica e che meritano comunque degli approfondimenti a parte.

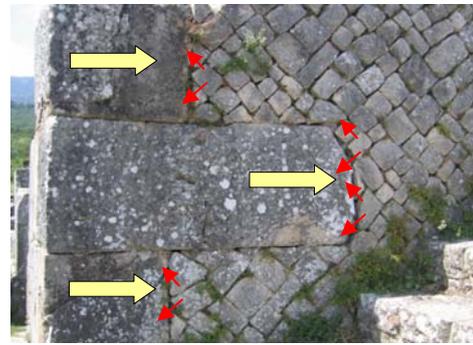
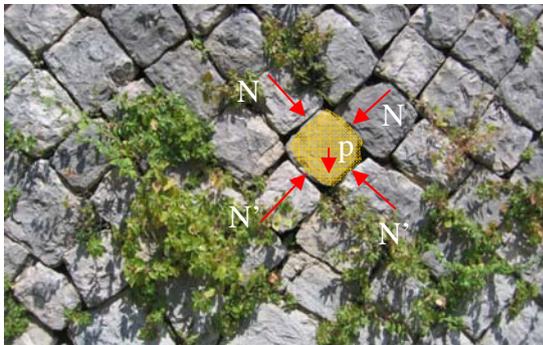
<sup>6</sup> Per approfondimenti si veda: G.Cangi, M.Caraboni, A.De Maria, *Analisi Strutturale per il Recupero Antisismico DEI*, Roma 2010.



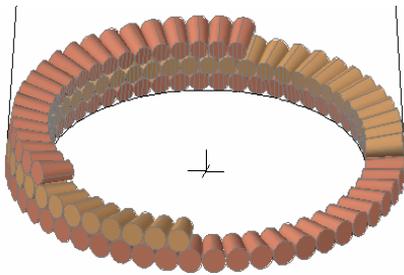
25) Cantonale di contrasto e tirante di trattenuta per paramento murario con tessitura spingente a spina-pesce. Isernia: campanile della chiesa di Santa Chiara



26) Catasta di tronchi di legno che simula il collasso di un muro di cilindri non contrastato all'estremità e ipotesi di trattenuta mediante radicamento (Vedi anche Fig. 53)



27) Paramento murario in *opus reticulatus* a Septinum (IS) con diagramma di equilibrio del singolo elemento e opera quadrata in testata a contrasto della spinta interna.



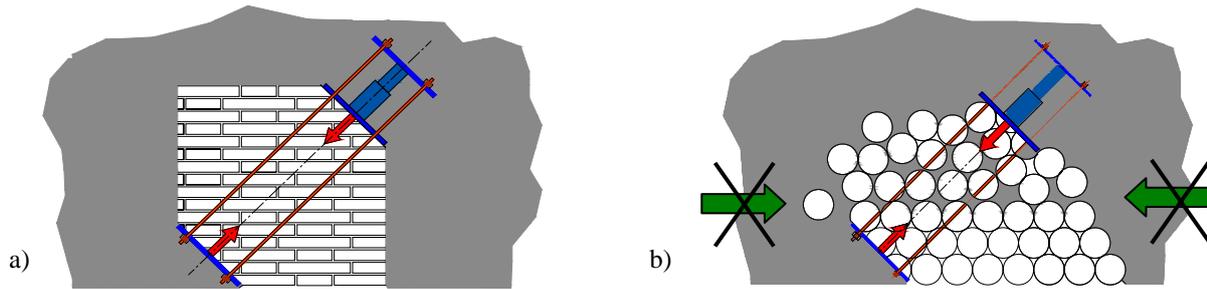
28) Schema qualitativo del funzionamento strutturale di una muratura ad impianto troncoconico o cilindrico priva di cantonali.

Conduzione ed esiti di prove sperimentali in relazione al tipo di muratura

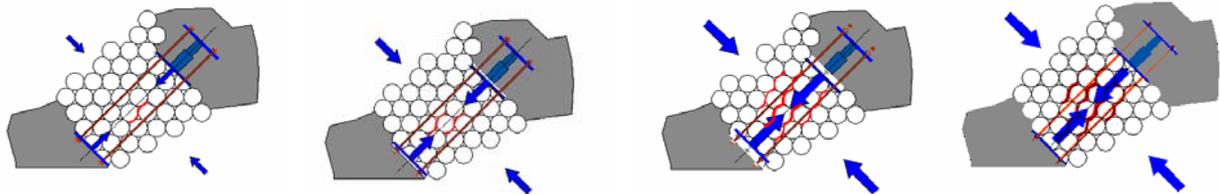
Quanto premesso è sufficiente per sollevare il dubbio che prove meccaniche condotte su murature diverse secondo i criteri indicati dalle NTC, a prescindere dalle caratteristiche tipologiche, rischiano di fornire risultati non confrontabili.

Una chiara evidenza deriva dal fatto che i protocolli per la conduzione delle prove di taglio, o di compressione diagonale, non sono tarati per apprezzare il contributo dell'azione di contrasto orizzontale che in realtà costituisce una vera risorsa di resistenza.

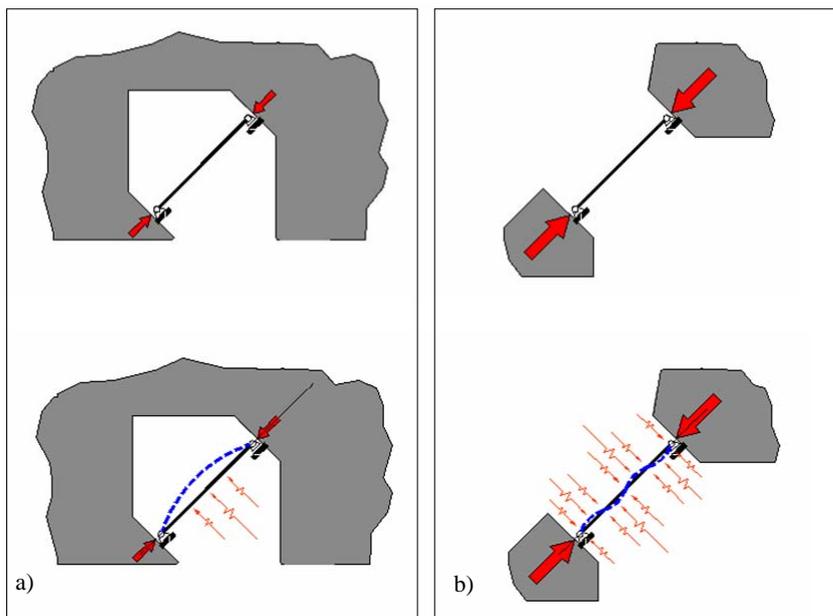
Murature con queste caratteristiche, come il tipico apparecchio abruzzese, risultano addirittura penalizzate, mostrandosi più deboli di quanto lo siano effettivamente, per l'incapacità di cogliere e comprendere quei meccanismi resistenti che nella realtà si manifestano con effetti positivi.



29) Prove di compressione diagonale su campioni di muratura costituiti da elementi squadrati incatenati e muratura di elementi arrotondati e sbazzati. Questi ultimi, privati dell'azione di contenimento e di contrasto che li contraddistingue, forniscono risultati non attendibili.

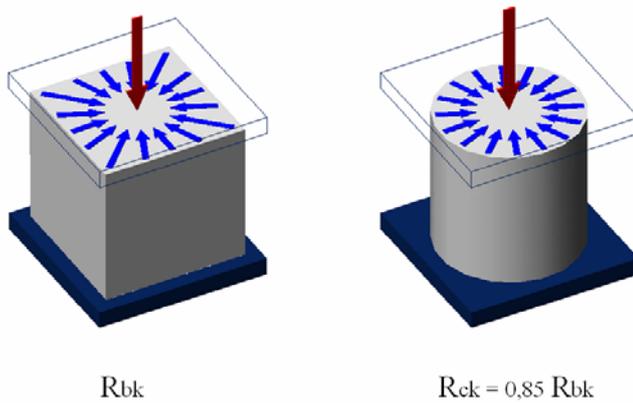


30) Prova di compressione diagonale in una muratura di ciottoli arrotondati confinata dalle masse murarie al contorno.



31) Prove di resistenza o prove di stabilità ?

Il risultato della prova a compressione diagonale deriva dall'azione di contrasto offerta dalle murature al contorno.



32) Prove condotte su provini di cls di diversa forma e dimensioni forniscono una resistenza a compressione sensibilmente diversa.

L'esito delle prove di resistenza delle murature di pietrame eseguite a taglio o a compressione diagonale, è fortemente condizionato dai fenomeni di instabilità, piuttosto che dalle caratteristiche meccaniche dei materiali che le compongono.

Gli effetti nel piano della parete risentono essenzialmente dei vincoli al contorno. Per pannelli liberi in muratura di ciottoli, come in figura 29, l'assenza di contrasti è assolutamente determinante, come dimostra l'evoluzione della prova illustrata in figura 30.

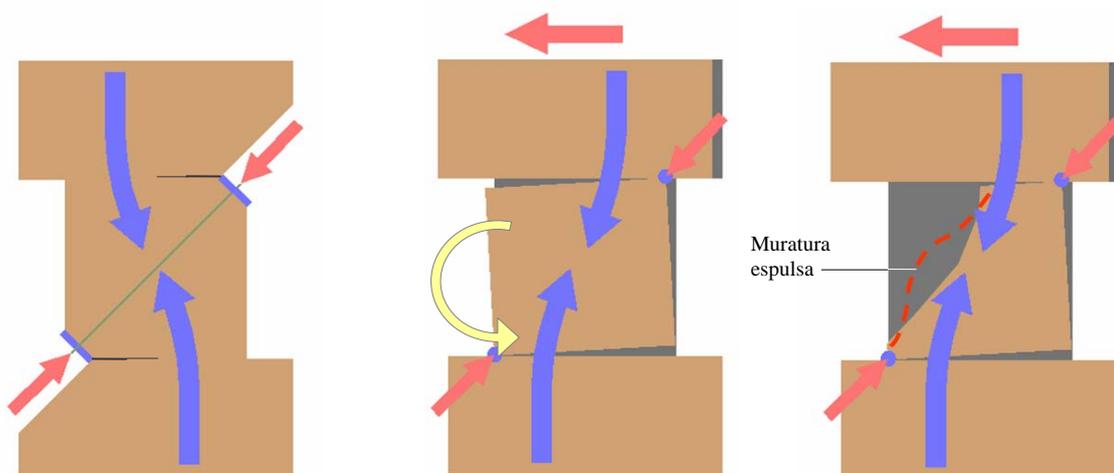
Il rischio di instabilità laterale invece è strettamente legato alla presenza di diafani che riducono la lunghezza di libera flessione fuori del piano dei singoli paramenti, che assume livelli preoccupanti per pannelli di grandi dimensioni con paramenti scollegati.

La figura 31 mette in evidenza due pannelli murari con differenti condizioni di vincolo, cui corrispondono risposte molto diverse quando vengono sottoposti alla stessa prova di compressione diagonale, con giudizi di qualità altrettanto diversi e troppo dipendenti dalle modalità di esecuzione delle prove stesse.

I valori di resistenza misurati attraverso prove meccaniche condotte su un qualsiasi materiale dipendono sempre dalle modalità con cui le prove vengono eseguite; lo schiacciamento di provini di calcestruzzo cubici o cilindrici costituisce un esempio evidente. Infatti i provini di cls cubici o cilindrici, forniscono resistenze a compressione che risentono dall'azione di contenimento assicurata dalle piastre della pressa.

Per le murature vale lo stesso principio, pertanto si può ritenere che non esistano valori di resistenza a compressione assoluti, ma sempre rapportati in qualche modo al tipo di prova eseguita.

Per ricavare informazioni utili e attendibili è necessario pertanto che le prove siano il più possibile rispondenti alle reali condizioni di esercizio dei pannelli esaminati.



a) Configurazione statica con flussi tensionali stabilizzanti

b) Condizioni di carico dinamico con traslazione del pannello superiore e innesco di un cinematismo rotazionale che favorisce l'espulsione della muratura

33) Prove di compressione diagonale condotte sullo stesso pannello in condizioni statiche (a) e in condizioni dinamiche (b).

Un'ulteriore riflessione riguarda la difficoltà che si incontra nel simulare gli effetti di una prova dinamica attraverso l'esecuzione di una prova statica, che ovviamente non può riprodurre le stesse condizioni di vincolo e di sollecitazione.

Lo schema illustrato in figura 33 mostra la diversa diffusione dei flussi tensionali in un pannello sollecitato a compressione statica (schema "a") e dinamica (schema "b").

La differenza sta nel cinematismo rotazionale indotto sul pannello dallo spostamento delle masse sovrastanti, che non si registra nella prova statica. Piuttosto, l'azione statica genera un quadro fessurativo speculare che va a stabilizzare il pannello durante la prova, facendo registrare una maggiore resistenza. Il diverso andamento delle lesioni che si formano nei due casi, sopra e sotto il pannello, sono ancora più esplicite e sollevano da ogni dubbio.

La prova statica, pertanto, può indurre ad una pericolosa sovrastima dei parametri meccanici, con una conseguente riduzione del livello di sicurezza.

Per poter rendere più affidabili e confrontabili prove condotte su murature diverse è necessario pertanto codificare meglio le modalità esecutive.

La normativa tecnica, in realtà, fissa dei criteri da seguire nella conduzione delle prove. Si limita, tuttavia, ad indicare le dimensioni dei pannelli e le modalità d'applicazione dei carichi, senza fare alcuna distinzione rispetto al tipo di muratura esaminata.

Una materia così complessa richiede ancora molti approfondimenti ed un livello di sperimentazione che trova nell'Abruzzo del dopo terremoto una singolare opportunità, non solo per dare risposte immediate ai tanti problemi urgenti che pone l'attività di ricostruzione in questa Regione, ma anche per indirizzare l'attività di prevenzione in tutte le aree a rischio sismico del territorio nazionale.

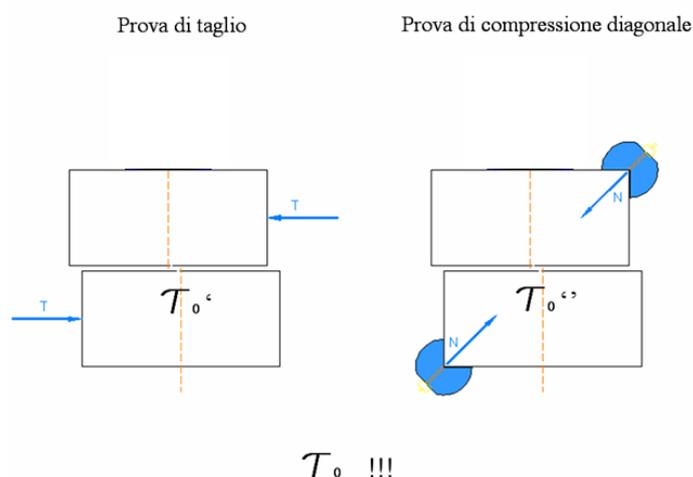
*Prime considerazioni sull'influenza dell'ingranamento verticale sul comportamento meccanico delle murature storiche*

In relazione a quanto premesso si intende entrare nel merito di alcuni aspetti costruttivi delle murature storiche che ne condizionano fortemente il comportamento meccanico, per capire se esistono altri parametri significativi, oltre quelli comunemente considerati per la valutazione della qualità muraria<sup>7</sup>.

Forti perplessità sono emerse in merito alla valutazione della resistenza a taglio di alcune murature identiche, ottenuta attraverso prove di taglio e di compressione diagonale, che hanno fornito risultati molto diversi fra loro, con valori della  $\tau_0$  doppi nel caso della prova a compressione<sup>8</sup>.

Il dubbio nasce dal fatto che la prova di compressione diagonale possa innescare un diverso funzionamento meccanico della muratura, soprattutto quando sono presenti elementi di forma irregolare che determinano un ingranamento verticale<sup>9</sup>.

La differenza riscontrata, infatti, è piuttosto marcata nelle murature caotiche, mentre non risulta altrettanto evidente nelle murature di mattoni o di blocchi squadrati impostati su piani orizzontali.



34) Si è riscontrato che prove di taglio e di compressione diagonale condotte sugli stessi pannelli per la valutazione della resistenza a taglio, pur depurando il contributo dello sforzo normale, forniscono risultati diversi e più elevati nella prova a compressione.

Prima di soffermarsi sull'influenza dell'ingranamento verticale nel comportamento di una muratura di elementi irregolari, è opportuno richiamare l'attenzione su un altro aspetto che può indirizzare verso una errata interpretazione dei risultati ottenuti attraverso prove di taglio dirette e prove di compressione diagonale.

Gli schemi vettoriali riportati nelle figure 35 e 36 stanno a dimostrare che nella prova di taglio diretta il contributo di resistenza garantito dalla malta si riesce a stimare facilmente mediante il confronto dei diagrammi costruiti con e senza la malta stessa.

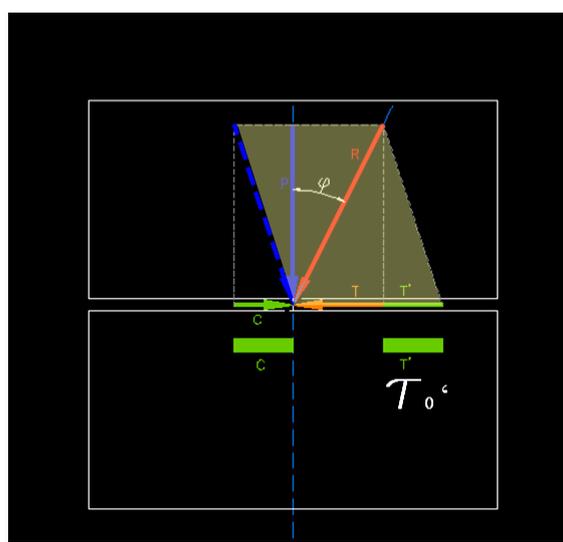
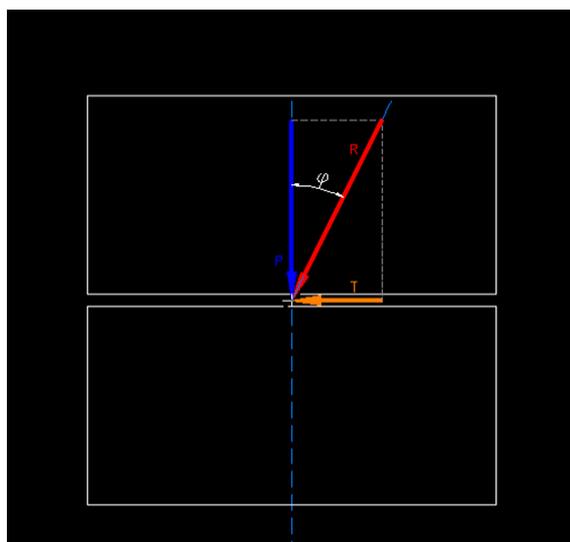
Lo stesso ragionamento elementare, applicato al caso di una prova di compressione diagonale porterebbe ad una sovrastima dell'incremento di resistenza assicurato dalla malta, con un valore anche doppio di  $\tau_0$  rispetto a  $\tau_0$ .

Questo sta a dimostrare che le due prove non sono facilmente correlabili, anche se attraverso un'analisi vettoriale più accurata si potrebbe risalire al reale contributo della malta.

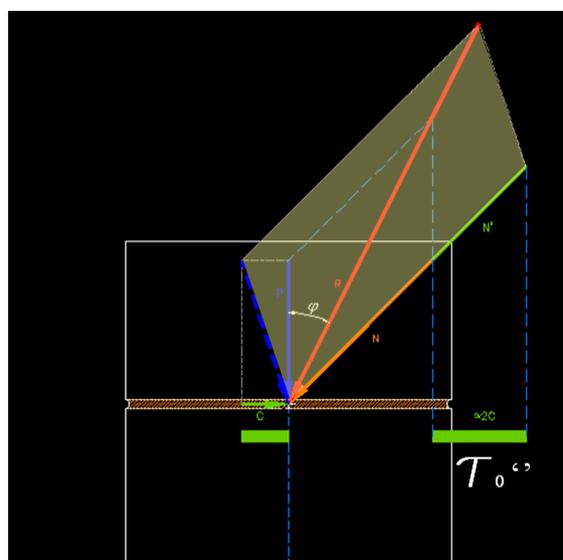
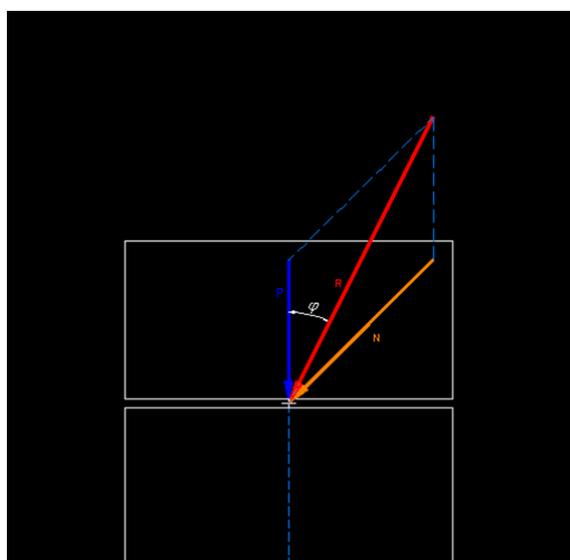
<sup>7</sup> A.Borri, A.De Maria L'Indice di Qualità Muraria (IQM): *Evoluzione ed applicazione nell'ambito delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008*. Atti del convegno ANIDIS, Bologna 2009

<sup>8</sup> Si veda: A.Borri, G.Cangi, A.De Maria, *Sulle caratteristiche meccaniche delle murature. Esperienze e perplessità Wonder Masonry* (Firenze, Dic. 2011).

<sup>9</sup> Si noti che l'ingranamento verticale in genere è considerato come un fattore negativo, che altera la regolarità e l'orizzontalità dei filari, secondo una convinzione che però si rivela sbagliata, come dimostra il modello ideale della muratura di cilindri, costituita da filari perfettamente orizzontali e ingranati. L'orizzontalità dei filari può essere rispettata a prescindere dall'andamento dei piani di posa in funzione dell'ingranamento verticale.



35) Valutazione del contributo di coesione offerto dalla malta (colore verde) nella resistenza a taglio delle muratura a filari orizzontali non ingranati attraverso una prova di taglio diretta



36) Valutazione del contributo di coesione offerto dalla malta (colore verde) nella resistenza a taglio delle muratura a filari orizzontali non ingranati attraverso una prova di compressione diagonale.

Altri aspetti molto importanti sui quali è necessario soffermarsi, a prescindere dall'influenza del legante, riguardano le caratteristiche di forma e dimensione degli inerti, la disposizione dei filari e soprattutto l'ingranamento verticale che caratterizza le murature tradizionali di elementi grossolanamente squadrati o irregolari.

L'ingranamento verticale è un aspetto costruttivo delle murature storiche certamente sottovalutato e di difficile interpretazione, da indagare, pertanto, attraverso schemi elementari seguendo un progressivo ordine di complessità.

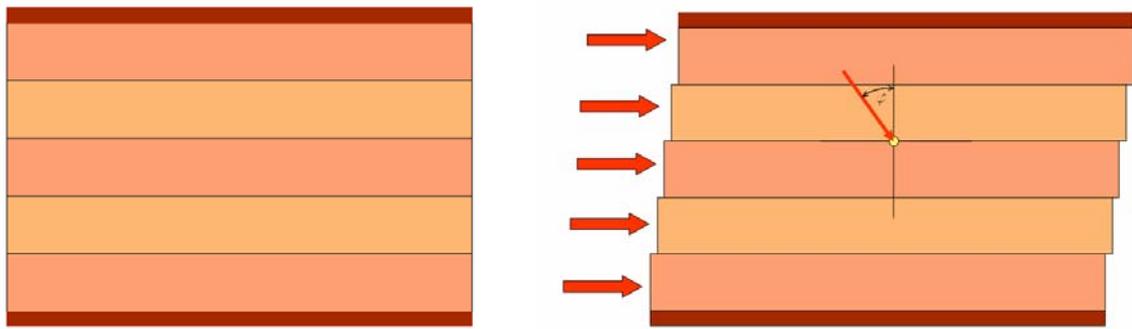
Per l'analisi di questo fattore al momento ci si pone lo scopo di suggerire alcune tracce di studio per ulteriori necessari approfondimenti e di fornire qualche ragionevole conclusione quando la logica del ragionamento lo consente.

Un primo modello interpretativo, molto semplificato, consiste nella rappresentazione dei filari di muratura attraverso una serie di fasce orizzontali sovrapposte e prive di legante.

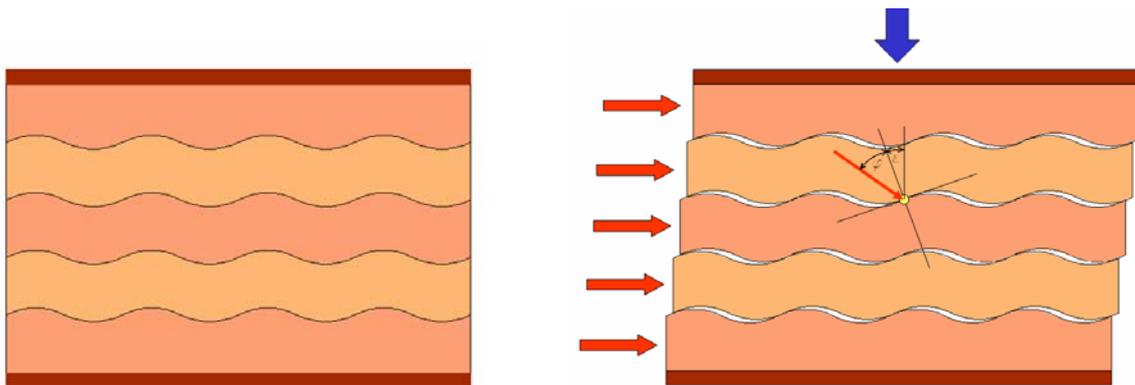
Sottoponendo la fasce ad azioni orizzontali distribuite uniformemente, queste tendono a scorrere simultaneamente l'una sull'altra, trovando impedimento solo nella resistenza d'attrito.

Una distribuzione lineare delle azioni orizzontali in condizioni sismiche tenderebbe invece a far scorrere le fasce superiori prima di quelle in basso.

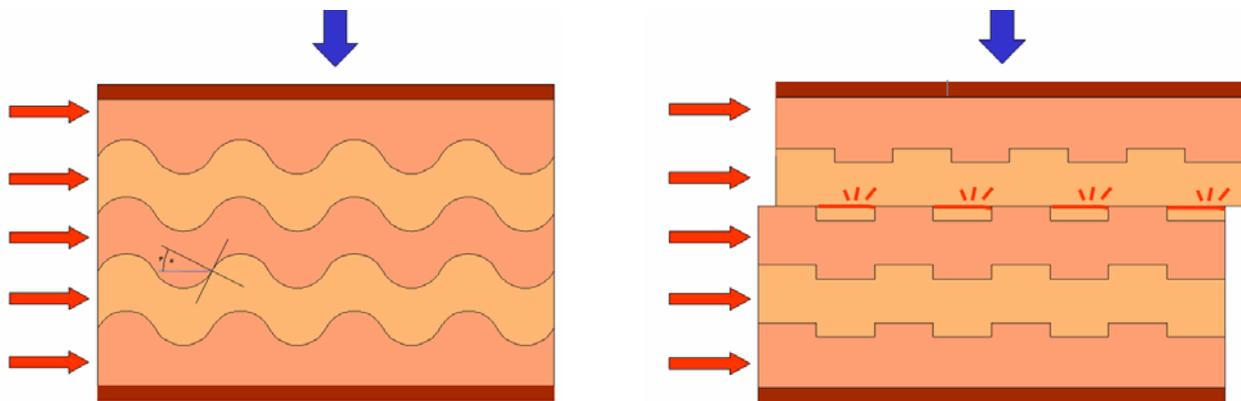
Lo schema a fasce orizzontali corrisponde ragionevolmente ad una classica muratura di mattoni priva di ingranamenti verticali.



37) Modello semplificato di una muratura a filari orizzontali sottoposta ad azioni di taglio con distribuzione uniforme. Lo scorrimento delle fasce si verifica quando la risultante delle forze di contatto raggiunge l'inclinazione dell'angolo d'attrito.



38) Modello semplificato di una muratura a filari orizzontali ingranati sottoposta ad azioni di taglio con distribuzione uniforme. Lo scorrimento delle fasce si verifica quando la risultante delle forze di contatto raggiunge un'inclinazione più accentuata, corrispondente alla somma dell'angolo d'attrito del materiale e dell'inclinazione massima delle fasce.



39) Una curvatura particolarmente accentuata della fasce rende improbabile l'innesco dello scorrimento e nel caso di dentellature lo scorrimento si rende possibile solo in seguito alla rottura delle fasce.

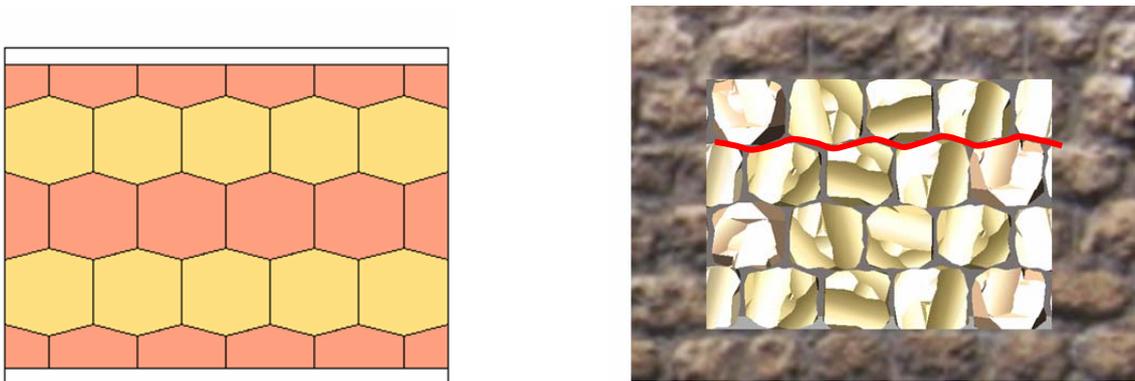
La sovrapposizione di fasce ondulate permette di apprezzare un primo effetto dovuto all'ingranamento verticale. Per far scorrere le fasce ondulate servono infatti delle componenti orizzontali più elevate; lo scorrimento, soprattutto, è subordinato alla possibilità di innalzamento delle murature. Un fenomeno che i geologi chiamano "dilatanza", quando riferita allo scorrimento di terreni granulari.

Questo effetto evidenzia una relazione particolare fra l'innesco del meccanismo e lo sforzo normale agente sulla parete, che per effetto del movimento stesso può subire incrementi tali da bloccare il fenomeno.

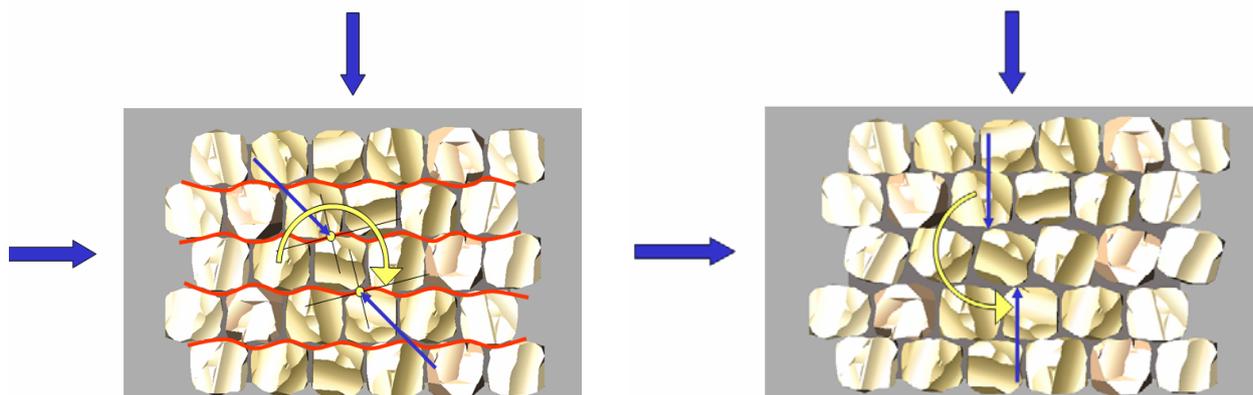
Una configurazione limite per il fenomeno osservato è rappresentata dalla presenza di dentellature che di fatto impedirebbero lo scorrimento se non a scapito di una rottura sistematica delle fasce.

E' evidente che queste considerazioni non sono direttamente estendibili alle murature costituite da elementi discontinui, ma servono ad inquadrare il fenomeno.

Un modello senz'altro più realistico è rappresentato da una muratura ad elementi esagonali distaccati, dove l'ingranamento è comunque apprezzabile.



40) Modello di muratura ad elementi esagonali ingranati confrontata con un paramento di apparecchio abruzzese



41) Innesco del meccanismo resistente in una muratura di blocchi irregolari ingranati per effetto della combinazione delle azioni orizzontali e verticali

Il passaggio dal modello schematico ad una rappresentazione più realistica permette di comprendere meglio le modalità d’innescò del meccanismo resistente.

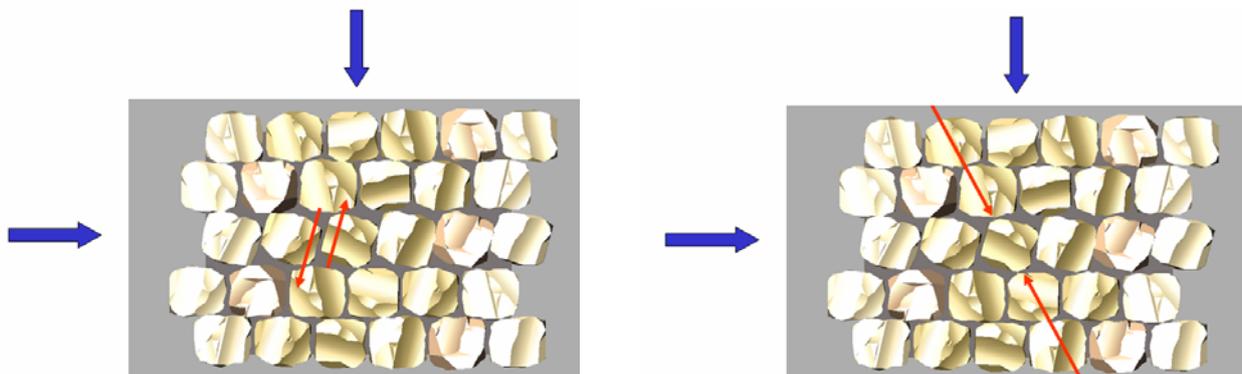
Ciascuna pietra sollecitata da una forza inclinata trasmessa dal filare superiore ricerca un punto di contrasto adeguato sul filare inferiore, dove scaricare lo sforzo lungo il percorso più agevole per condurlo fino alla fondazione.

In questo passaggio i punti di contrasto non si trovano mai allineati, se non casualmente, lungo la direttrice di diffusione degli sforzi, per cui insorgono delle coppie che producono la rotazione delle pietre (Fig. 41).

Il movimento innescato trova a sua volta una reazione nella muratura sollevata, come già osservato in figura 38. L’equilibrio si instaura solo a condizione che si possa verificare un perfetto allineamento dei punti di contrasto lungo la linea di diffusione degli sforzi di compressione.

Lo scorrimento del pannello genera un meccanismo rotazionale, che esclude l’attrito radente a favore di un attrito volvente, rendendo meno difficoltoso l’innescò del fenomeno.

Questa è una prima significativa differenza che si osserva nel passaggio dal modello a fasce continue allo schema più realistico di elementi discreti esagonali in grado di ruotare oltre che scorrere.



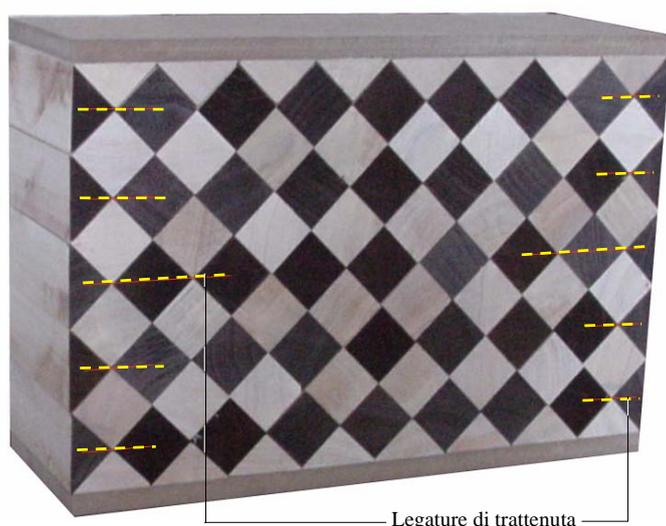
42) Rotazione e scorrimento delle pietre per effetto dello sforzo di taglio.

Una muratura che sfrutta al meglio l'effetto positivo dell'ingranamento è rappresentata dall'*opus reticolatum*, che pur rispettando la condizione di perfetta orizzontalità dei filari, presenta piani di posa con un profilo a dente di sega che contrasta lo scorrimento orizzontale.

Prove sismiche condotte su un modello in scala, confermano il comportamento che si può ipotizzare per queste strutture già sul piano intuitivo.

Particolarmente significativo è risultato il confronto fra un modello costituito da elementi lignei in *opus reticolatum* e un analogo modello di muratura isodoma realizzato con gli stessi moduli.

Per dare significato alle prove eseguite con i modelli in scala, è stato necessario simulare la presenza di cantonali attraverso l'inserimento di elementi di trattenuta, costituiti da legature passanti alle estremità, in grado di sostituirsi alla naturale azione di contrasto assicurata dalla continuità del muro (Fig. 43).



43) Modello ligneo in scala di pannello murario in *opus reticolatum*, da sottoporre a prove sismiche statiche e dinamiche per l'analisi del comportamento delle murature ingranate.<sup>10</sup>

Le prove sono state condotte sia in condizioni statiche che in condizioni dinamiche, utilizzando un piano oscillante dotato di un dispositivo che ne permette anche la progressiva inclinazione, registrando comportamenti e risultati del tutto equivalenti. Per apprezzare i risultati delle prove sono state riportate di seguito due immagini particolarmente significative delle prove statiche eseguite, che mettono in evidenza il momento del collasso delle strutture.

Il modello di muratura isodoma ha manifestato uno scorrimento su piani orizzontali al superamento dell'angolo d'attrito del materiale, corrispondente a circa 15°-18°, con andamento pressoché uniforme su tutti i filari, come si evince dalla figura 44.

Molto diverso si è presentato il meccanismo del pannello in *opus reticolatum*, nel quale è impedito lo scorrimento su piani orizzontali, per cui si è generato un cinematismo rotazionale al raggiungimento di una inclinazione di 35°-40°, che equivale ad una componente orizzontale molto superiore rispetto alla prova precedente.

In questo caso non è l'attrito del materiale a svolgere il ruolo prevalente, bensì l'ingranamento verticale, che trasforma il cinematismo di scorrimento in un cinematismo di ribaltamento.

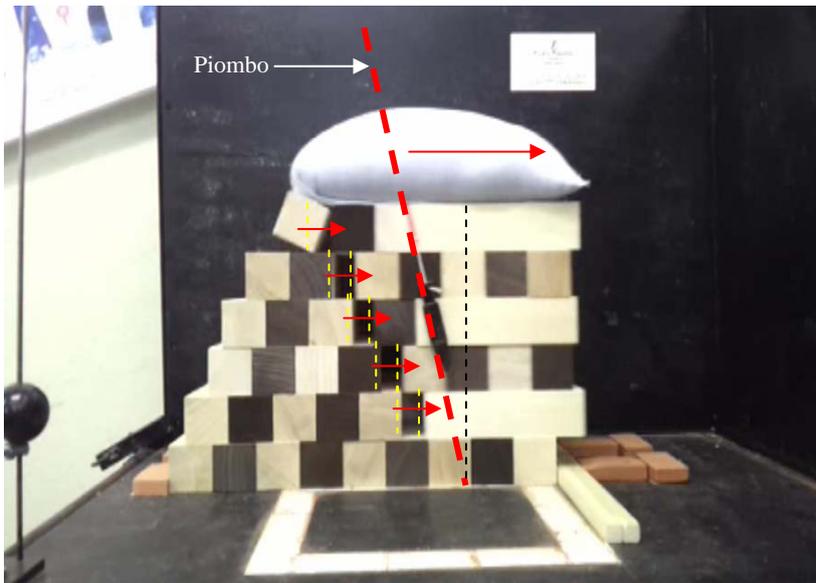
Una prima differenza sostanziale si rileva nella forma della lesione, di scorrimento, in un caso, e di strappo, nell'altro. Ma la più significativa riguarda il movimento del cuneo, che nel modello di elementi ingranati produce il sollevamento del pesante cordolo sovrastante, che si oppone alla rotazione con l'innescò di un momento stabilizzante.

Questo movimento è contrastato anche dal peso del cuneo stesso, in grado di assicurare un momento resistente di forma che da solo può essere sufficiente ad impedire l'evoluzione al collasso.<sup>11</sup>

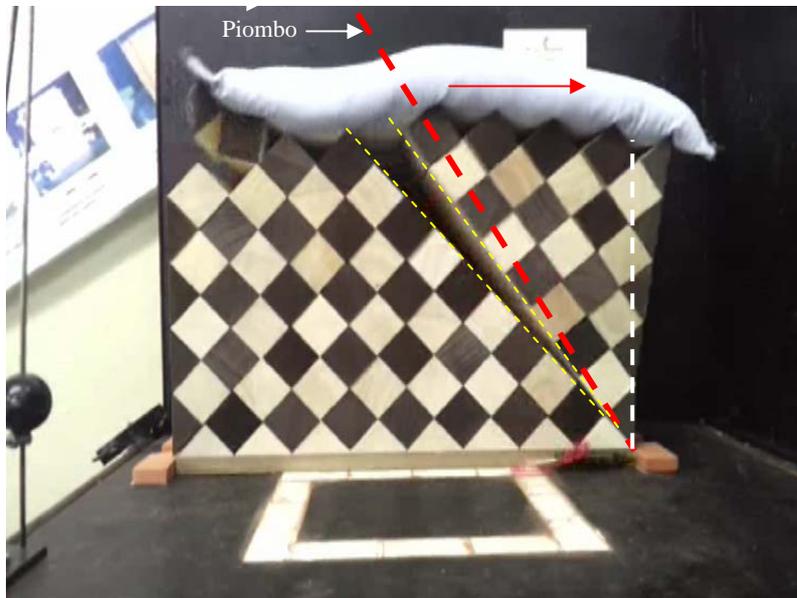
<sup>10</sup> IIS Franchetti-Salviani di Città di Castello (PG) - Corso Geometri - Laboratorio di Costruzioni.

Prove sperimentali su modelli in scala eseguite in collaborazione con la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia. Modello in legno realizzato dalla Falegnameria Fodaroni Arredamenti di Città di Castello (PG).

<sup>11</sup> Si veda: G.Cangi, *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico* (Cap.1 - Murature storiche in zona sismica) Editore DEI, Roma 2005



44) Scorrimento della muratura a filari orizzontali con un angolo di inclinazione di circa 15°



45) Meccanismo alternativo nel pannello in opus reticulatum innescato con un angolo di inclinazione di circa 35-40°  
L'ingranamento verticale impedisce lo scorrimento e favorisce un meccanismo di ribaltamento all'estremità

Si può concludere, pertanto, che il coefficiente di attivazione del cinematicismo è associato al sistema di tessitura dei filari, piuttosto che alla natura dei materiali e che l'ingranamento verticale costituisce un fattore di resistenza positivo del quale tenere conto in relazione al confinamento della muratura stessa.

Lo scorrimento nelle murature ingranate è possibile solo se esistono margini di dilatazione verticale delle pareti.

Come valutare questo contributo è una domanda che al momento non trova una risposta precisa, tuttavia si stanno mettendo a punto delle prove sperimentali su altri modelli in scala presso il laboratorio di Costruzioni dell'IIS Franchetti-Salviani di Città di Castello (PG), cui seguirà una sperimentazione su modelli al vero presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia nell'ambito di un protocollo di collaborazione fra i due Enti, finalizzato a questi studi specifici.

Il criterio che si intende seguire consiste nel confrontare la resistenza a taglio di campioni di muratura dello stesso tipo, forma e dimensioni, valutando la dilatazione verticale indotta dallo scorrimento del pannello, che costituisce un indizio significativo del livello di ingranamento.

## Conclusioni

Con la consapevolezza di aver sollevato molti dubbi senza aver fornito soluzioni in ragionevole proporzione, si intende richiamare l'attenzione su un altro fronte che riguarda l'analisi critica dei danni prodotti dal sisma negli edifici storici dell'aquilano, come supporto alle indagini stesse.

Senza voler sminuire l'importanza delle tante prove sperimentali condotte sulle murature danneggiate dal sisma, si ritiene che una lettura approfondita delle modalità di fessurazione di queste caratteristiche murature possa costituire un indizio non meno importante delle prove stesse. Sicuramente meno costoso e invasivo.

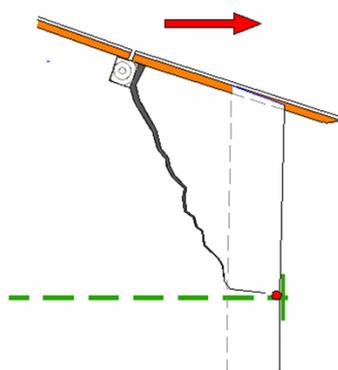
L'esempio illustrato in figura 46 e in figura 47, sembra particolarmente significativo. Gli schemi si riferiscono al cinematismo di ribaltamento di un cuneo d'angolo per effetto dell'azione sismica orizzontale.

Nel primo caso la buona qualità della muratura porta all'innescò del meccanismo resistente con la formazione della classica lesione di strappo, indirizzata verso la trave di copertura. La cerniera di rotazione si forma spontaneamente alla quota del tirante, dove il cuneo si imposta saldamente sul cantonale.

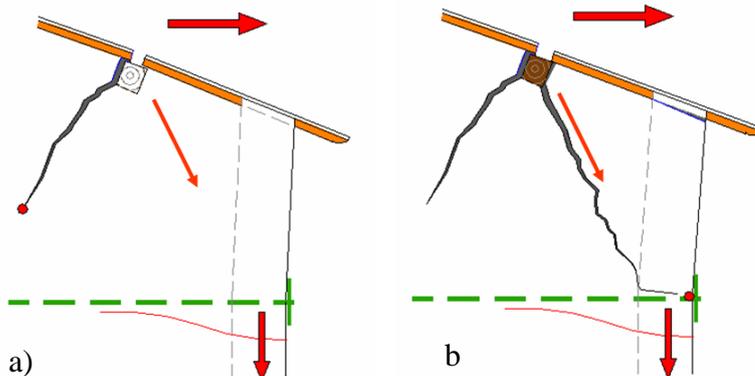
La seconda figura mostra l'evoluzione dello stesso cinematismo in una muratura di qualità scadente, scomposta in due fasi distinte: a) l'innescò, cui corrisponde un assetamento verticale del cantonale, per cui la muratura si fessura come se si trattasse di un cedimento fondale; b) il ribaltamento, che genera una seconda fessura e produce una disgregazione dell'apparecchio murario.

Si possono cogliere così delle informazioni utili attraverso una semplice analisi delle modalità di collasso, che costituiscono la spia evidente delle reali condizioni della muratura, peraltro senza costi aggiuntivi.

Sebbene questo tipo di analisi qualitativa non possa sostituire le prove sperimentali, può servire in ogni caso a ridurle a ad indirizzare le indagini in modo più oculato.



46) Fessurazione classica di distacco di un cuneo d'angolo in una muratura di qualità ordinaria



47) Fessurazione in due fasi di un cuneo d'angolo in presenza di una muratura scadente:  
a) assetamento del cantonale per schiacciamento del muro;  
b) successivo innescò del cinematismo di ribaltamento.

Un'altra riflessione riguarda il modo di sfruttare al meglio le peculiarità di quelle murature ordinarie che, sebbene carenti per molti aspetti, presentano comunque delle risorse e dei requisiti che ne possono garantire un buon funzionamento.

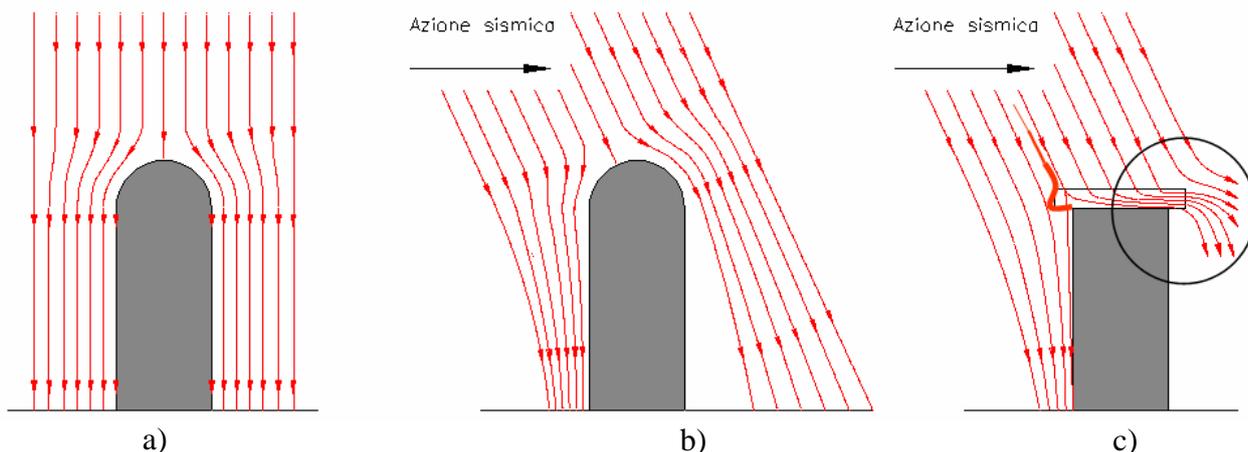
Questo è possibile solo attraverso la conoscenza ed un recupero delle tecniche costruttive tradizionali, concepite ed evolute sulla base degli stessi presupposti e sperimentate per secoli.

E' chiaro che non è questa l'occasione per affrontare un argomento così articolato, che tuttavia può trovare elementi di approfondimento nella ricca manualistica di settore. In ogni caso si possono portare degli esempi significativi sotto l'aspetto metodologico.

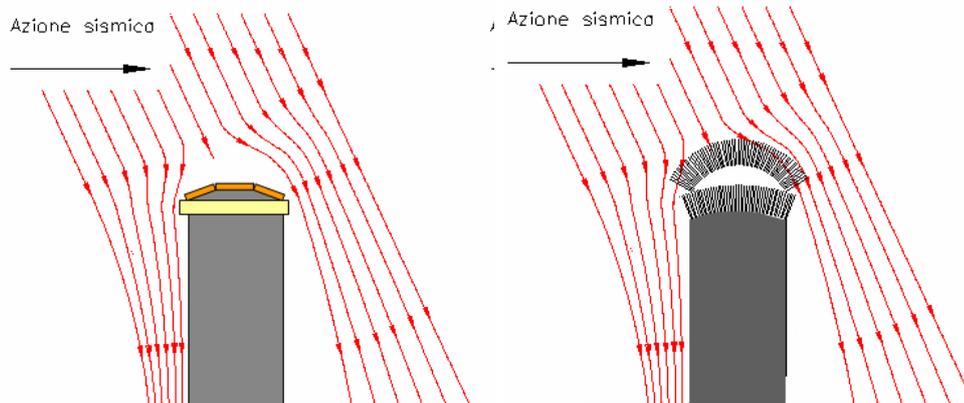
Un principio fondamentale consiste nell'evitare forti concentrazioni di sforzi e brusche deviazioni dei flussi tensionali, sia in condizioni statiche che in condizioni di carico dinamico.

Vi sono interventi ordinari che seppure modesti, come la semplice sostituzioni di architravi e piattabande, eseguiti peraltro secondo le indicazioni della normativa, con l'inserimento di elementi prefabbricati in c.a. o in acciaio, sotto l'effetto del sisma introducono delle forti concentrazioni di sforzi in corrispondenza dell'appoggio sotto vento (Fig. 48.c), a differenza di archi e piattabande, che disegnano flussi tensionali più dolci e meno traumatici per la struttura (Fig. 48.a.b).

Soluzioni tradizionali come la realizzazione di archi di scarico sopra architravi o piattabande, costituisce tuttora la soluzione ottimale anche nel caso di inserimento di nuovi elementi.



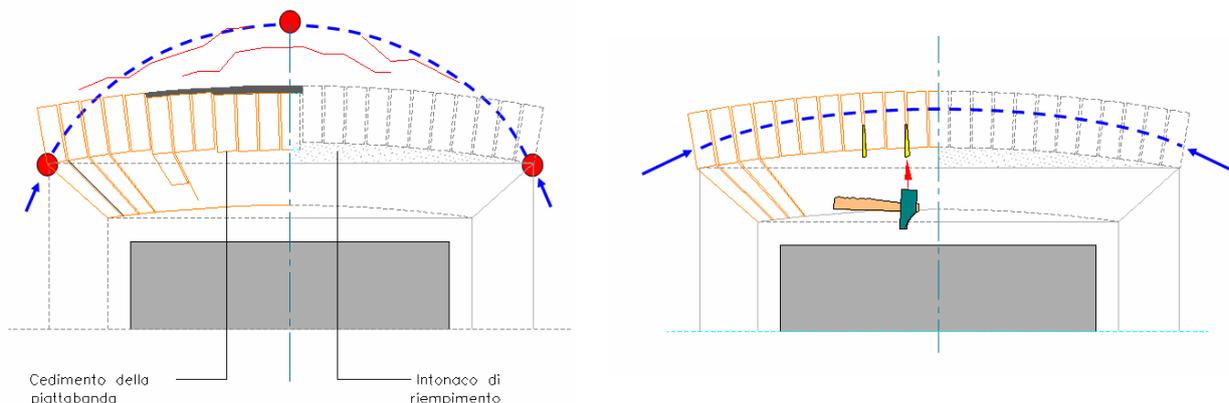
48) Andamento dei flussi di compressione in una parete muraria in presenza di aperture sormontate da archi o architravi in condizioni statiche e sismiche. Nel caso di architravi (c) si determina una forte concentrazione dei flussi tensionali in corrispondenza dell'appoggio a valle.



49) Architravi composti:  
 a) architrave con cappuccina (o sordino);  
 b) piattabanda con arco di scarico.

Suggerimenti che non vanno interpretati in senso troppo restrittivo nei confronti della diffusa sostituzione degli architravi, ma che servono ad evidenziare l'utilità di soluzioni tradizionali come la cappuccina di mattoni o l'impiego stesso di piattabande realizzate sull'estradosso di architravi.

Considerazioni che comunque invitano ad una riflessione sull'opportunità di recuperare archi e piattabande che, sebbene dissestati, possono essere ricomposti e resi sicuri e funzionali attraverso interventi agevoli e poco onerosi (Fig. 50).

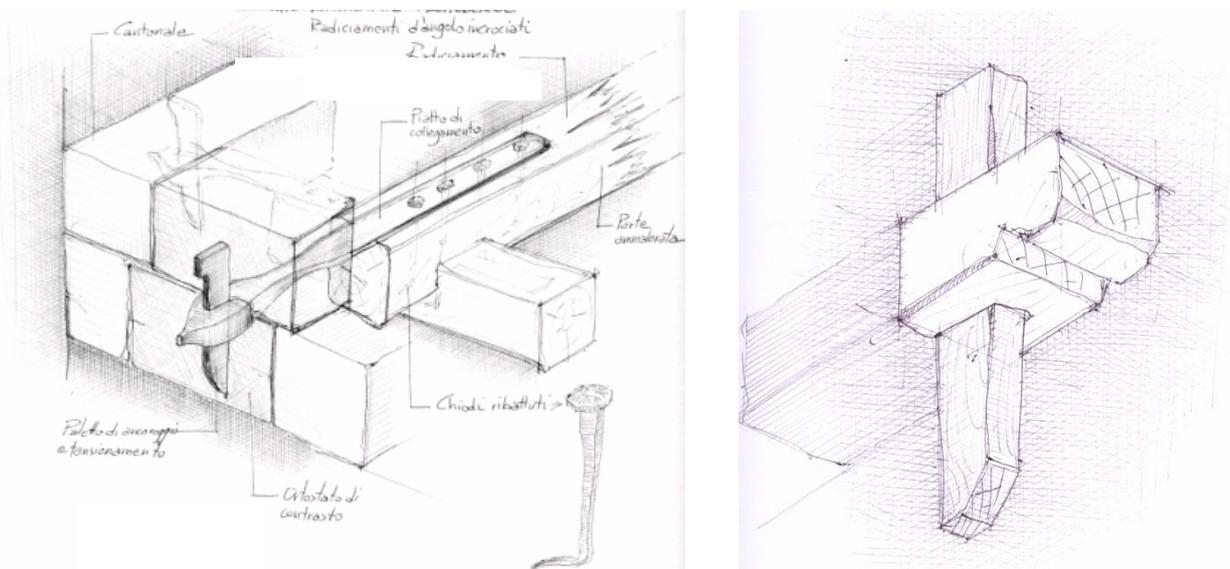


50) Splintaggio di una piattabanda con inserimento di cunei per il ripristino dello stato di compressione. Intervento da attuare solo dopo aver verificato la capacità di contrasto della struttura ai lati dell'apertura e in seguito ad eventuali interventi prioritari di consolidamento dei muri che fungono da contrafforti.

Nell'ottica di un recupero filologico dell'edilizia storica aquilana, condotto con l'obiettivo di salvaguardare i caratteri costruttivi originali e di incrementare i livelli di sicurezza, non si può prescindere da uno dei più caratteristici e diffusi presidi antisismici locali, costituiti dai tradizionali radiciamenti lignei.

Elementi che conferiscono agli edifici storici il carattere di una "muratura armata premoderna" e che non possono essere assolutamente dimenticati nell'opera di recupero.

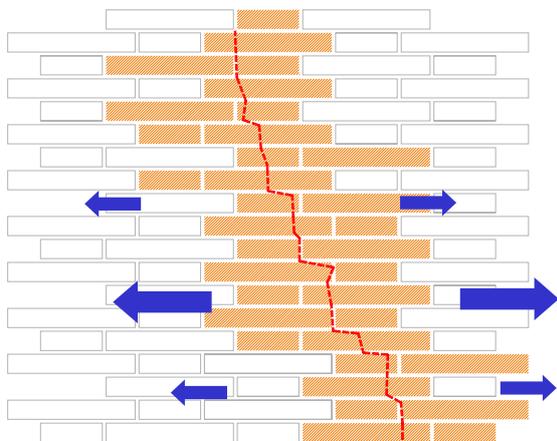
L'obiettivo perseguito attraverso l'inserimento di questi elementi è quello del confinamento sistematico di una muratura che evidenzia le proprie carenze soprattutto nelle testate, dove viene meno quella naturale azione di contrasto presente nel corpo centrale.



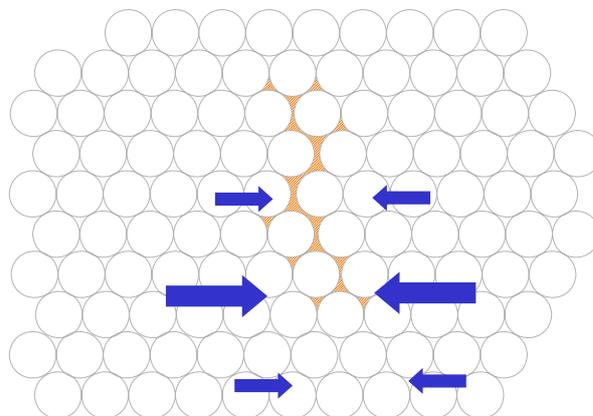
51) Caratteristico radiciamento ligneo d'angolo con sistema di connessione a paletto metallico posto a contrasto del paramento lapideo. La particolarità dei sistemi di ancoraggio abruzzesi emerge dal funzionamento combinato delle pietre di contrasto e degli elementi metallici, che sostituiscono i tradizionali paletti di ferro con cunei di tensionamento. Gli ancoraggi con elementi lignei esterni sono meno frequenti e più facilmente degradabili.

Operazioni comuni come la ricomposizione delle lesioni eseguita con la tecnica del cuci-scuci, ormai collaudata da una lunga esperienza pratica, possono in realtà essere ridotte drasticamente se si considera che "rammendare" una lesione può avere significato solo per una muratura di elementi squadrati ingranati e concatenati, dove lo scopo è quello di ripristinare la resistenza a trazione equivalente.

Nelle murature realizzate con elementi di forma irregolare l'obiettivo è esattamente l'opposto e deve puntare al ripristino della continuità muraria attraverso il contatto e con essa lo sforzo di compressione orizzontale.



52) Ripristino della continuità muraria e della resistenza a trazione equivalente attraverso interventi a cuci-scuci in una muratura lesionata di elementi squadrati concatenati e ingranati.



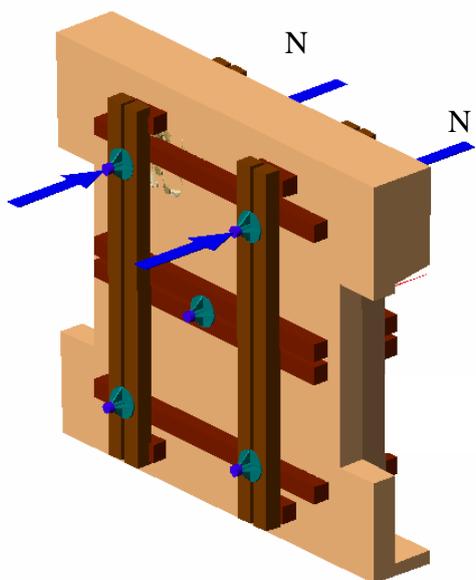
53) Ripristino della continuità muraria e dello stato di compressione orizzontale attraverso la rinzeppatura della fessura e il ripristino dell'azione di contrasto.

In questi casi la rinzeppatura delle lesioni, alternativa e più efficace della ricucitura stessa, ha anche il vantaggio di non richiedere grossi strappi nella parete, per realizzare quei concatenamenti che non avrebbero alcuna utilità, risultando peraltro meno onerosa.

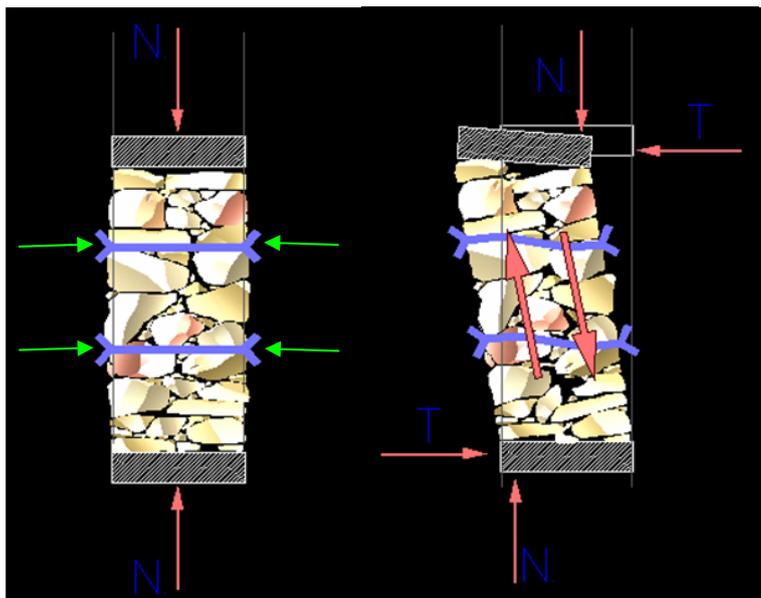
In queste situazioni può essere utile integrare l'intervento con iniezioni di malta, che però necessitano di un pretensionamento trasversale alla parete, in modo da scongiurare fenomeni di rigonfiamento dei paramenti causando altri tipi di danni.

Operazione da condurre pertanto secondo lo schema illustrato nella figura 54, con la consapevolezza che i tiranti trasversali di collegamento dei paramenti non possono fornire altro contributo che quello di contrastare il rigonfiamento del muro, mentre sono irrilevanti ai fini dell'assorbimento degli sforzi di taglio lungo il piano medio della parete, quando sollecitata da azioni ortogonali (Fig. 55).

Il pericolo in questo caso deriva proprio dall'illusione di ritenere risolutivo un intervento che invece è destinato con molta probabilità a tradire le aspettative.<sup>12</sup>



54) Pretensionamento della parete per l'esecuzione di iniezioni di malta da ottenere mediante spillature trasversali.



55) Utile azione di contenimento dei tiranti trasversali inseriti nella parete di pietrame in grado di contrastare il rigonfiamento dei paramenti, comunque inefficaci ai fini dell'assorbimento degli sforzi di taglio lungo il piano medio della parete.

Giovanni Cangi

<sup>12</sup> Per ulteriori approfondimenti si rimanda a: G.Cangi, *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico* (II edizione, con schede tecniche) Editore DEI, Roma 2012