

- Premessa

Il quadro dei danni causati dal terremoto in Emilia a tante strutture costituisce, senza volerlo, un'occasione di studio derivata dall'obbligo morale di non mandare dispersa una fonte di conoscenze che ci viene offerta ad un costo altissimo, pagato in termini di vite umane, prima ancora che sul piano economico.

Una fonte importante per comprendere il comportamento sismico delle strutture esistenti, attraverso quell'approccio pratico e intuitivo che ha segnato l'evoluzione della prevenzione sismica, oggi fortemente rivalutato dalla stessa normativa tecnica.

L'osservazione diretta dei danni prodotti dal sisma per riconoscere le cause che li ha determinati, costituisce pertanto la strada maestra da seguire in quel processo analitico che oggi sembra non poter fare a meno dell'impiego di software considerati come gli unici strumenti in grado di dare risposte attendibili.

In realtà certi fenomeni, per quanto complessi, si spiegano facilmente e in modo intuitivo attraverso una modellazione semplificata, nella quale si possono riconoscere molti fattori che concorrono all'innescio di determinati cinematici.

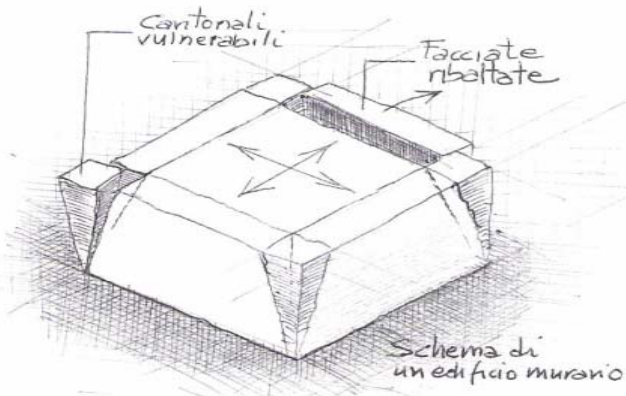
Con questo sintetico documento si intende fornire una chiave di lettura ispirata a questo criterio, limitata solo ad alcuni aspetti elementari, ma significativi, dell'analisi sismica degli edifici in muratura, con l'auspicio che si possa ricostruire nelle zone terremotate con maggiore consapevolezza, sulla base di una migliore conoscenza del comportamento meccanico delle murature storiche, per salvaguardare un patrimonio architettonico inestimabile.

Fa da filo conduttore una serie di schemi grafici, con modelli di danno che in molti casi si possono ritrovare negli edifici danneggiati, utili a suggerire anche degli appropriati provvedimenti di messa in sicurezza, di riparazione e prevenzione con tecniche nuove e comunque rispettose della tradizione costruttiva

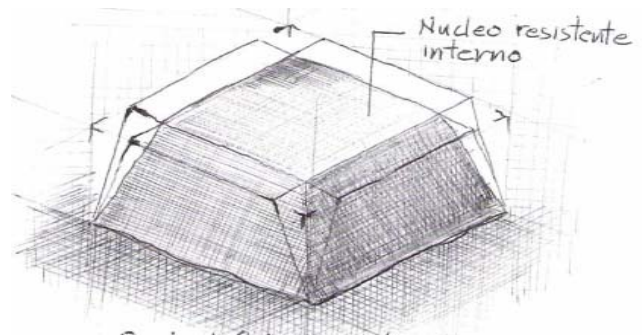
Giovanni Cangi

Il terremoto in Emilia e gli edifici in muratura

E' utile immaginare l'edificio in muratura come una scatola con delle pareti che possono essere ben collegate fra loro o completamente indipendenti. In tal caso la scatola tenderà ad aprirsi per dividersi in più elementi. Ai cantonali viene demandata questa importante funzione di connessione che può cambiare il destino dell'edificio sotto l'effetto del terremoto.

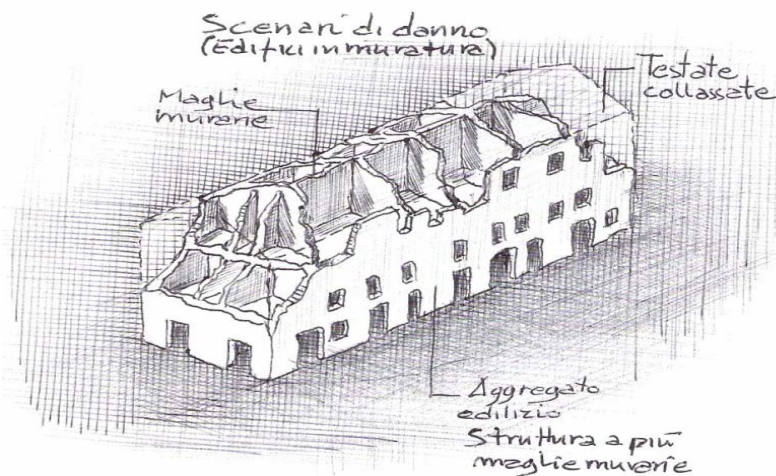


Gli elementi più vulnerabili sono proprio le pareti esterne, i muri d'angolo e le facciate, soprattutto quando non esistono elementi che legano insieme la struttura.

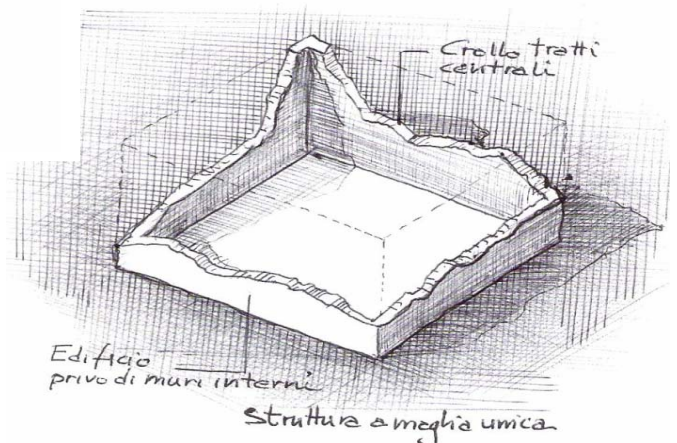


Questo è uno dei motivi per cui durante il terremoto può essere più pericoloso correre all'esterno che rifugiarsi in un luogo sicuro all'interno della casa.

In ogni edificio c'è un luogo sicuro, comunque più sicuro, dove rifugiarsi in caso di terremoto. Un luogo che dovrebbe essere individuato sulla base di una perizia tecnica. In genere, se ribaltano le pareti perimetrali, ciò che resta della fabbrica muraria assume la forma di un tronco di piramide; è all'interno di questo volume che va ricercato il "luogo sicuro".



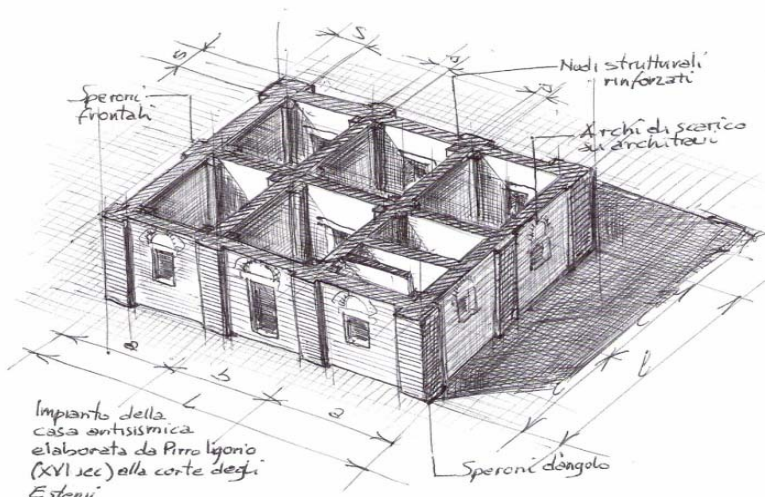
La conferma si ha osservando la forma di un aggregato edilizio gravemente danneggiato dal sisma: mancano le pareti esterne, soprattutto le parti più alte, inoltre crollano i solai di piano e gran parte dei tetti, ma restano in piedi i muri di spina.



I crolli avvengono principalmente all'esterno, per cui nei centri storici ogni via di fuga risulta compromessa. Non è la stessa cosa per gli edifici costituiti da grandi ambienti, come le chiese, dove purtroppo il collasso può avvenire anche all'interno con il crollo della copertura.

- Una casa antisismica¹

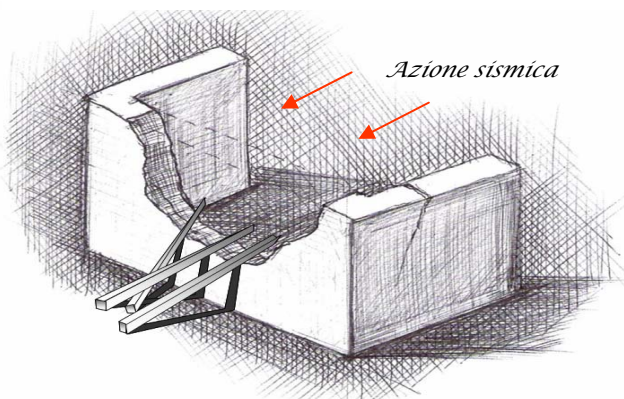
Per quanto possa sorprendere, uno dei primi progetti di “casa antisismica” è stato elaborato proprio a Ferrara, dopo il terremoto del 1570, poi purtroppo ci si è dimenticati. L'autore è niente meno che, Pirro Ligorio, Architetto succeduto a Michelangelo presso la Fabbrica di San Pietro e trasferitosi alla corte degli Estensi nel 1568.



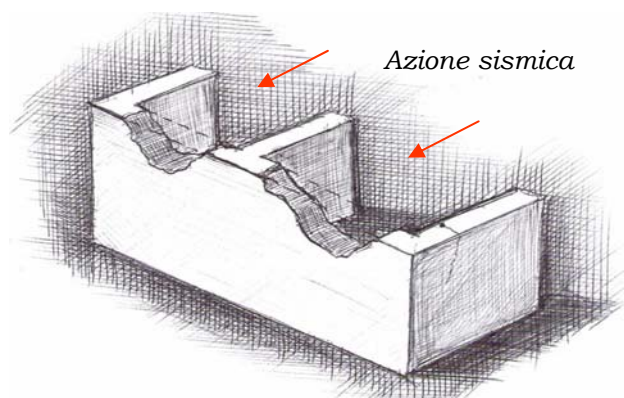
La “casa antisismica” riprodotta nel disegno a fianco si basa su alcuni punti essenziali:

- regolarità in pianta;
- interassi contenuti fra i muri portanti;
- spessori consistenti delle murature;
- cantonali rinforzati;
- rinforzo degli incroci murari;
- ordinata disposizione delle aperture;
- presenza di archi di scarico sopra gli architravi.

Regole fondamentali anche per la normativa sismica vigente, che però non hanno fatto scuola e pertanto non sono mai state applicate con convinzione nei secoli passati.



Ciò che avrebbe potuto fare la differenza sono soprattutto i muri interni che, fra le altre funzioni, servono a contrastare il ribaltamento delle pareti di facciata attraverso un'azione di trattenuta.



Molti edifici rurali hanno subito crolli dovuti a questa carenza, mentre a volte un solo muro di spina sarebbe stato sufficiente per contenere questo pericoloso fenomeno che associa il crollo del tetto al ribaltamento del muro perimetrale.

Una scatola muraria divisa in più maglie strutturali costituisce un criterio fondamentale di prevenzione sismica

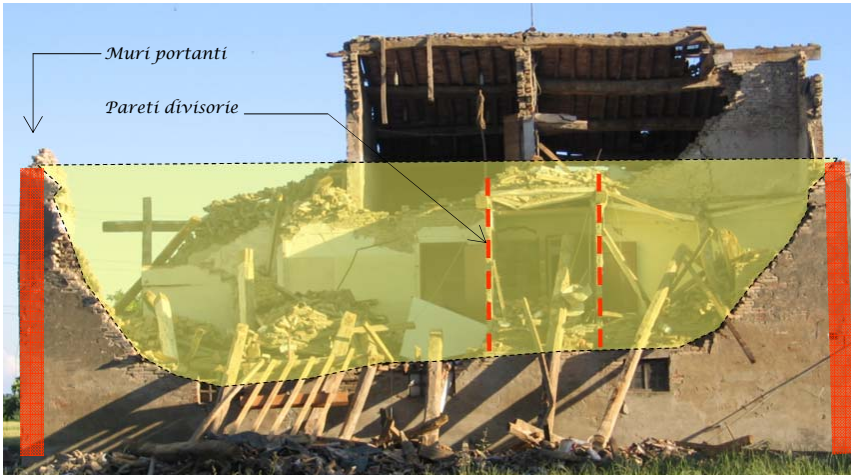
¹ Le notizie sono tratte dal volume: PIRRO LIGORIO, *Libri dei diversi terremoti*, edizione del codice Torino 28, a cura di Emanuela Guidoboni - De Luca Editori d'Arte, Roma 2005

- Edifici inadeguati

Dagli schemi alla realtà il passaggio è breve!

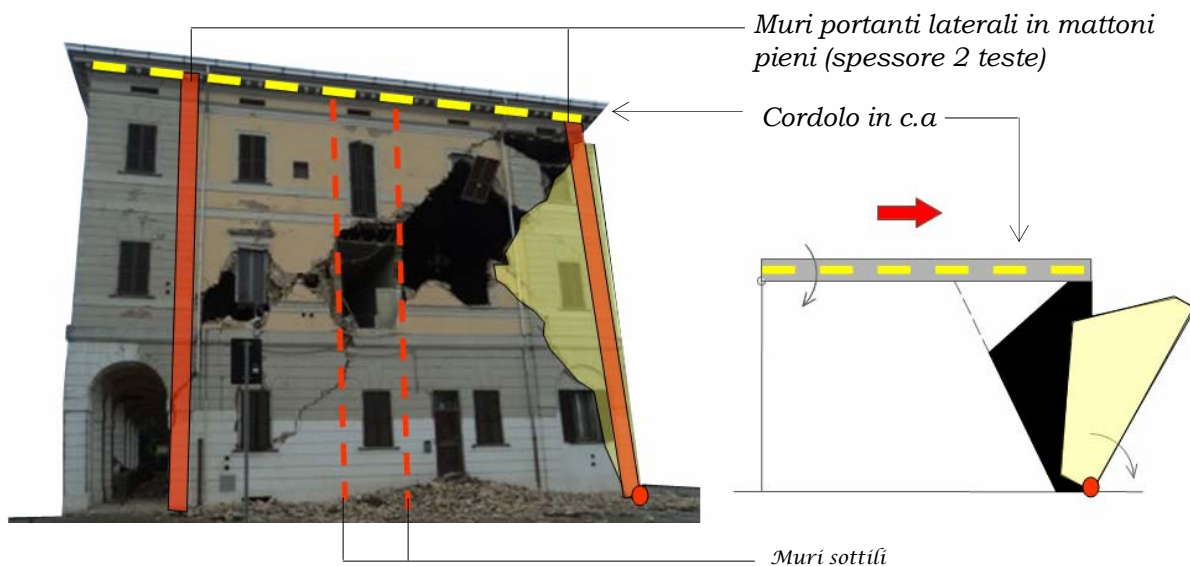
Molti edifici dall'aspetto solido e robusto, nascondono invece delle carenze gravi se ricadenti in zona sismica.

Tuttavia una semplice ricognizione a vista può essere sufficiente per stimare il livello di rischio



Ribaltamenti di facciata di edifici privi di muri intermedi. (Casi significativi)

La facciata sventrata del palazzo municipale di Sant'Agostino (FE), caso emblematico di questo evento calamitoso, mostra lo stesso difetto, dovuto all'assenza di muri di spina, cui si aggiunge uno spessore troppo sottile della parete.

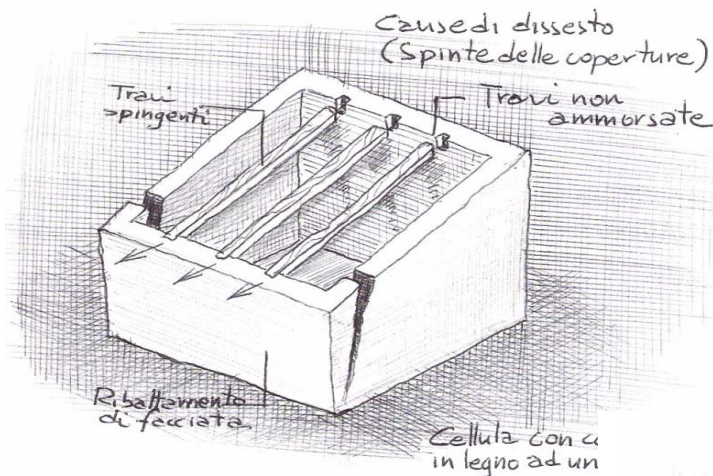


Si nota anche il cordolo del tetto in cemento armato, che ha modificato, ma non impedito, il meccanismo di ribaltamento del cantonale, avvenuto secondo lo schema illustrato a destra, già osservato in occasione di altri terremoti.

L'edificio è privo di qualsiasi ancoraggio dei solai ai piani intermedi.

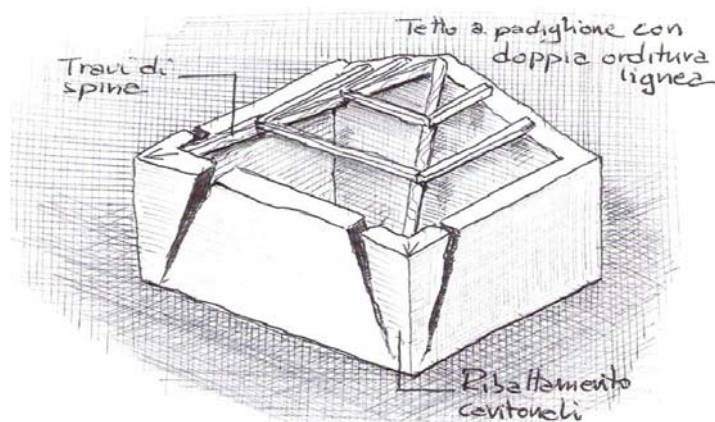
Va ricordato che i palazzi come questo, destinati ad assumere una funzione strategica in occasione di eventi calamitosi, sono soggetti a norme di sicurezza più restrittive rispetto agli edifici ordinari.

Oltre alla conformazione planimetrica dell'edificio assumono importanza le geometrie dei tetti e il modo in cui i pesi e le spinte vengono scaricati sui muri portanti.



Le travi di copertura semplicemente appoggiate sui muri maestri e senza ancoraggi, tendono a trasmettere delle azioni che spingono in fuori le pareti perimetrali e ne favoriscono il ribaltamento.

Nei tetti a padiglione sono soprattutto le travi di spina a gravare sui cantonali.



Tetti a falda unica, a capanna oppure a padiglione, trasmettono comunque delle azioni ai muri d'imposta che vanno esaminati caso per caso e contrastati attraverso la disposizione di efficaci elementi sommitali di trattenuta.

- La qualità delle murature

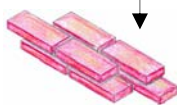
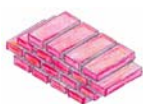
I fenomeni osservati possono essere più o meno pericolosi in relazione alla qualità della muratura, per cui in alcuni casi non si manifestano, mentre in altri, apparentemente simili, si possono verificare pure dei crolli.

Non basta usare buoni mattoni, ma bisogna sapere come appoggiarli l'uno sull'altro!

Tessitura gotica

Tessitura di diatoni

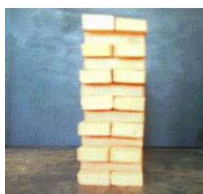
Paramenti scollegati



(Qualità buona)

(Qualità media)

(Qualità scadente)



Azione sismica

Azione sismica

Azione sismica



F_s

F_s

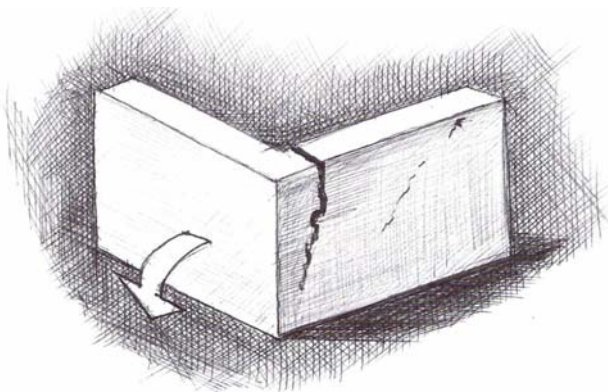
F_s



Un esempio di muratura di mattoni pieni di due teste con paramenti non ammortati

Comportamento sismico di pareti sollecitate da azioni ortogonali in relazione alle diverse modalità di ingranamento dei paramenti. (Modelli in scala murati a secco).

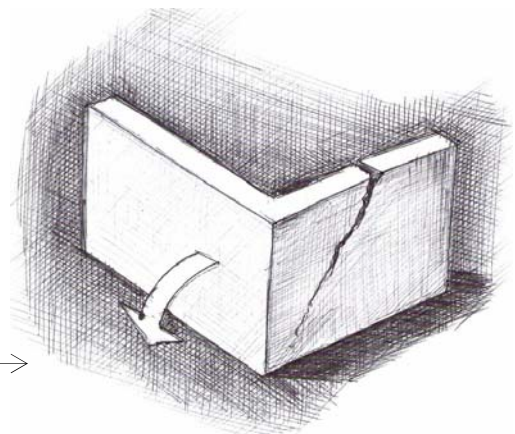
Per esprimere un giudizio di qualità sulla muratura sono necessarie indagini approfondite, tuttavia ci si può fare un'idea anche attraverso un'analisi sommaria



Un indizio utile per capire se ci si trova di fronte ad una buona muratura è fornito dalla forma delle lesioni in corrispondenza dei cantonali e dal profilo della linea di strappo fra i muri ortogonali

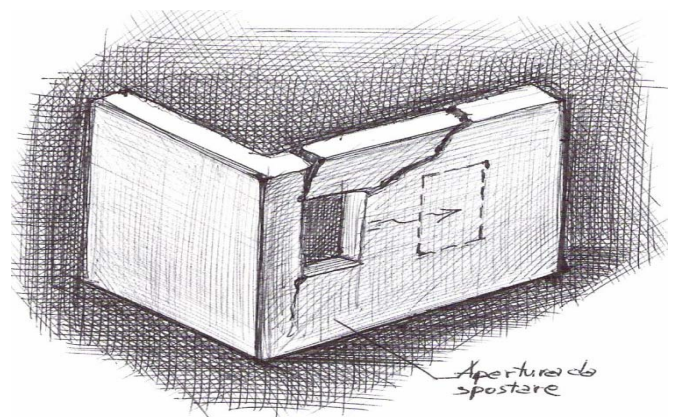
Se la fessura è piuttosto verticale e l'angolo di strappo piccolo la muratura è poco affidabile.

Al contrario, se lo strappo avviene con un angolo piuttosto ampio significa che il cantonale funziona bene.

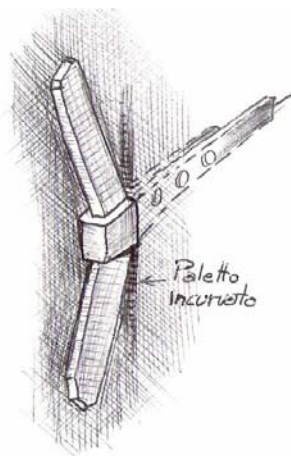


A modificare in senso negativo il comportamento strutturale sono le aperture di porte o finestre collocate a ridosso dei cantonali.

Ogni apertura costituisce un indebolimento strutturale, per cui la collocazione è molto importante. Le lesioni che si formano in prossimità del cantonale vengono attratte come calamite dai vuoti delle aperture. Il progetto di consolidamento, in questi casi, deve sempre prevedere lo spostamento dell'apertura a distanza di sicurezza dal cantonale.

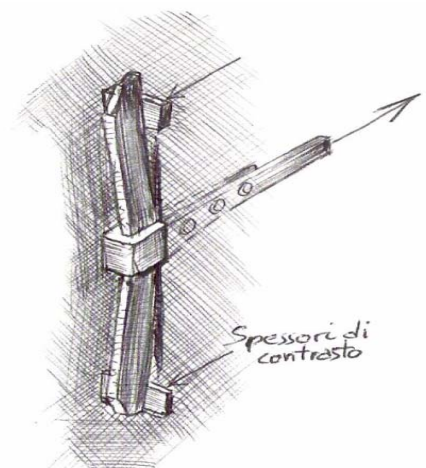


Prestazioni antisismiche molto più efficaci si ottengono disponendo tiranti e chiavi di trattenuta, che però nell'edilizia emiliana non sono molto diffusi.



Ove presenti questi elementi hanno funzionato bene. Paletti incurvati, presenti nelle zone colpite dal sisma, confermano l'elevato sforzo di trattenuta esercitato sulla parete.

I paletti sotto sforzo non vanno assolutamente rimossi. Semmai si può ridurre lo stato di sofferenza attraverso la disposizione di spessori di contrasto sotto le estremità sollevate.

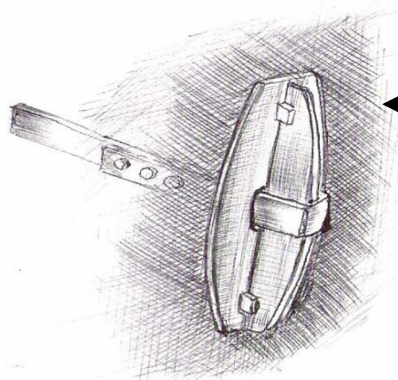


I benefici che si ottengono attraverso la disposizione di catene metalliche sono rilevanti, in relazione al costo irrisorio da sostenere per la posa in opera.

Le catene vanno sempre disposte sulla base di un attento studio preliminare e non in modo casuale, così da garantire la massima efficacia.

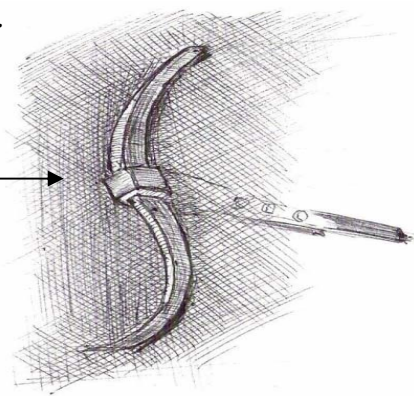
La storia delle prevenzione sismica ci offre importanti insegnamenti per evitare di improvvisare soluzioni che alla lunga potrebbero rivelarsi inadeguate.

Le forme delle chiavi di trattenuta, ad esempio, sono molto importanti.



Sono sicuramente da preferire i capopiastra, al posto dei paletti.

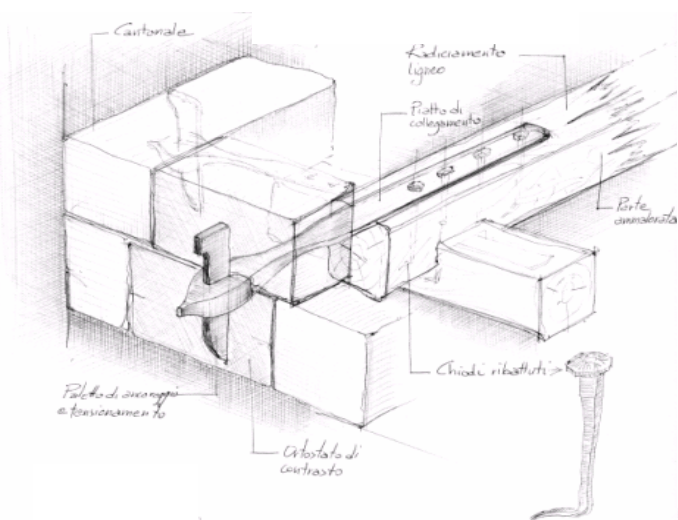
Soprattutto vanno evitate forme estetiche che privilegiano l'aspetto gradevole alla funzionalità strutturale.



Queste, infatti, quando vengono sottoposte a sforzo di trazione, si deformano facilmente e perdono efficacia.

Uno sguardo alle tecniche premoderne di prevenzione sismica diffuse nei territori soggetti a questo rischio, serve a comprendere meglio il fenomeno e le modalità adottate per migliorare le prestazioni strutturali.

La tradizione Abruzzese, ad esempio, offre degli ottimi suggerimenti, come l'inserimento di radiciamenti lignei.

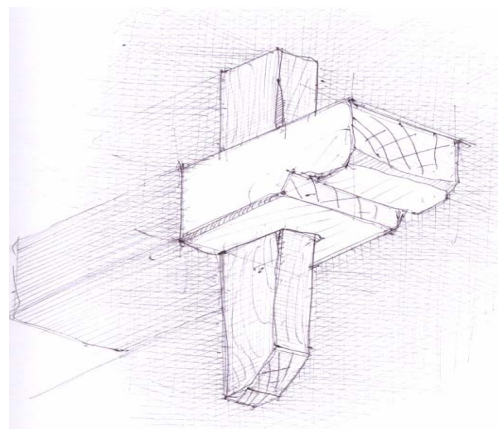


Il termine deriva dalla funzione che assumono degli elementi di legno inseriti nei muri, come delle radici nel terreno.

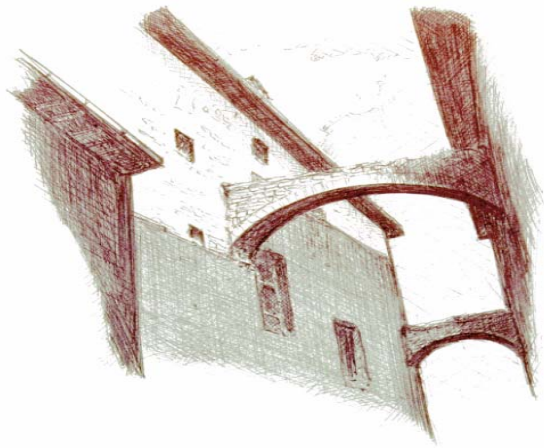
Questi sono disposti agli angoli e fissati all'esterno mediante dei paletti di ferro posti a contrasto del paramento di pietra.

La presenza di questi elementi di acciaio con anime di legno conferisce alla struttura il carattere di una muratura armata premoderna.

Soluzioni alternative prevedono l'impiego di elementi di trattenuta interamente in legno, in grado di assolvere ugualmente la funzione richiesta, sebbene meno affidabili a lungo tempo a causa del progressivo deterioramento del materiale esposto agli agenti atmosferici.



Diverso, ma non meno importante, è il principio di funzionamento degli archi di sbatacchio, sempre presenti nei centri storici situati in zona sismica.



Gli archetti impostati su edifici fronteggianti servono a contrastare il movimento delle pareti, al contrario dei tiranti che invece trattengono.

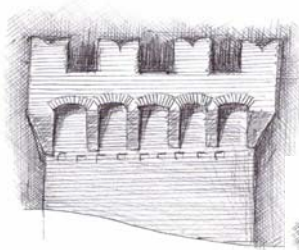
Lo scopo è lo stesso, ma gli archi creano una continuità strutturale fra edifici prospicienti, che tradisce un patto di reciproca collaborazione.

- Un tecnica di consolidamento moderna, ma inadeguata: i cordoli in cemento armato.

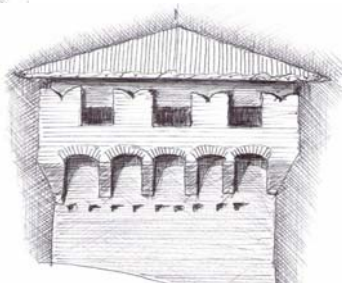
Stride fortemente con la tradizione una delle soluzioni tecniche di prevenzione sismica adottate sistematicamente negli ultimi decenni, basata sulla costruzione di cordoli in cemento armato.

In Emilia, dove purtroppo i criteri di prevenzione non sempre sono stati applicati, la tecnica del cordolo in cemento armato invece ha convinto e attecchito, a prescindere dal problema sismico.

Se n'è fatto uso anche in molti restauri di edifici monumentali dove sono stati sostituiti i tetti originali.

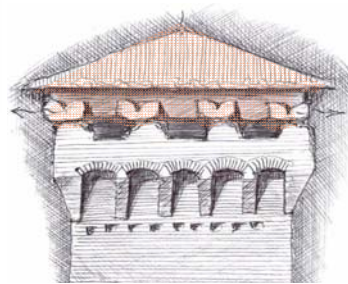


a) Configurazione originaria della torre merlata



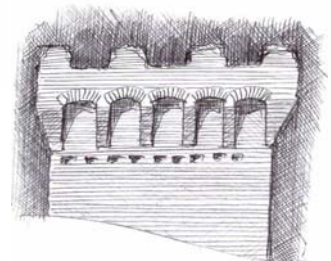
b) Realizzazione di una copertura protettiva rigida

c) merli vincolati al cordolo in c.a. troncati dallo sforzo di taglio sismico



Azione sismica

d) configurazione finale seguita al collasso del tetto durante il sisma



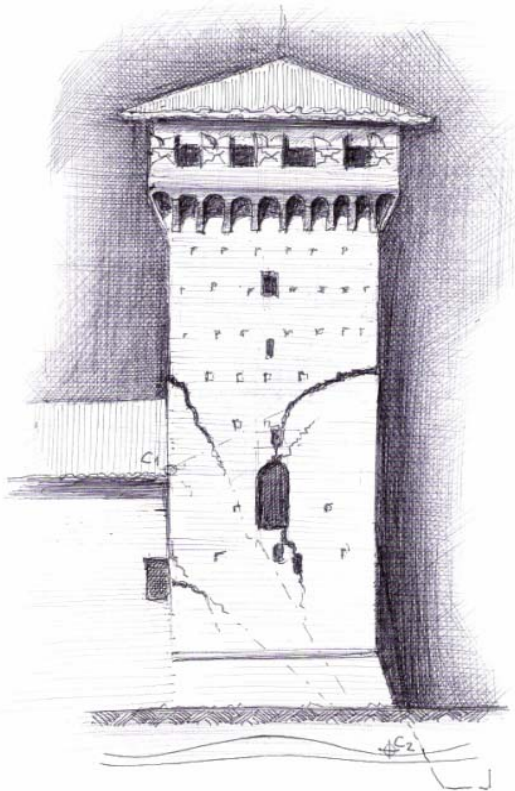
Fasi di trasformazione di una torre estense con effetti prodotti dal terremoto sulla copertura rigida

L'esperienza maturata negli ultimi decenni dimostra che questi cordoli sono più dannosi che utili e in alcuni casi creano pure condizioni di pericolo. Si veda lo stesso Municipio di Sant'Agostino, oppure le antiche torri merlate, troncate dai pesanti tetti in c.a. costruiti sopra.

Sono molti i casi di effetti negativi dovuti proprio ad interventi eseguiti con questa logica, peraltro imposta dalla normativa.

- Un caso di studio: la Rocca Estense di San Felice sul Panaro

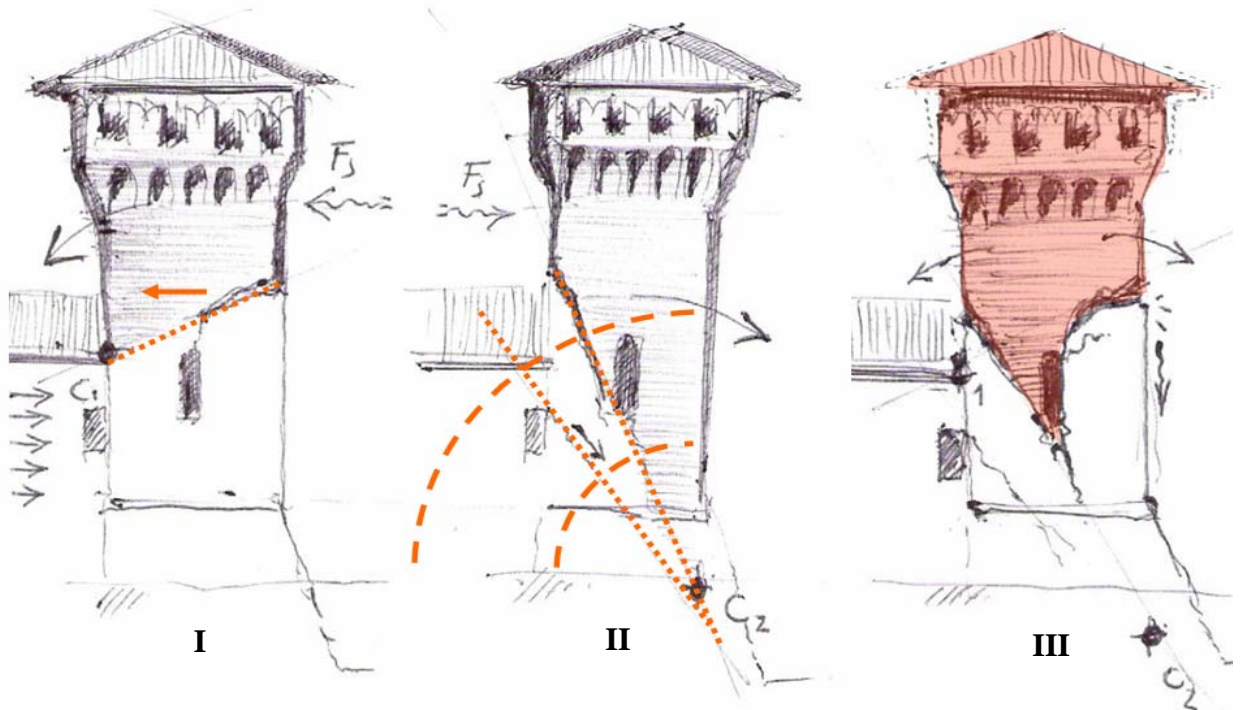
Caso emblematico di edificio monumentale danneggiato dal sisma con manifestazione dei dissesti riconducibili a quelli illustrati in precedenza è la torre della Rocca Estense di San Felice sul Panaro.



Le oscillazioni della torre prodotte dal sisma agente in direzione trasversale hanno prodotto danni diversi in funzione delle particolari condizioni di vincolo laterali.

Sul lato sinistro la torre trova il contrasto della massiccia struttura del castello, mentre sulla destra si trova completamente libera di oscillare a tutta altezza.

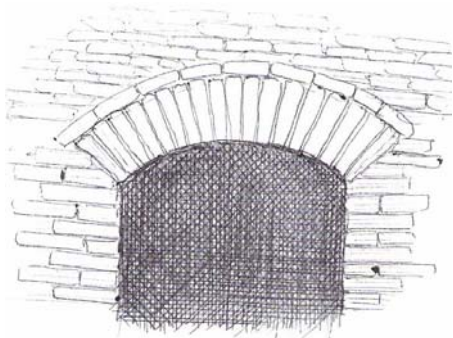
Il quadro fessurativo complessivo della torre deriva pertanto dalla combinazione dei due cinematismi e dall'evoluzione che lo sciame sismico ha prodotto nella struttura già compromessa dalla prima forte scossa.



Schema del cinematismo di danno composto che ha caratterizzato le fasi di dissesto di una torre d'angolo della Rocca Estense di San Felice sul Panaro.

- I segni del terremoto

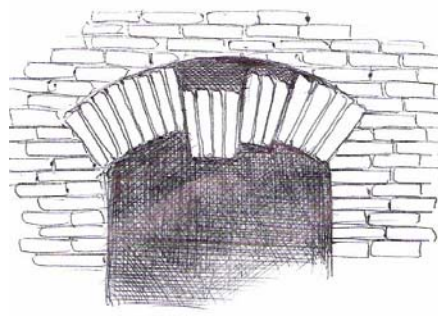
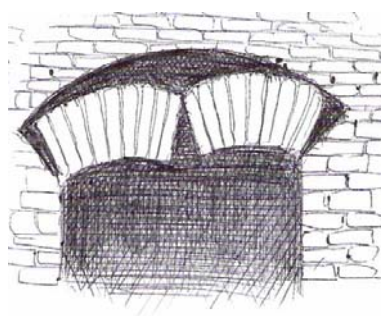
Associati ai crolli e dissesti particolarmente evidenti, il terremoto lascia sulle strutture murarie anche dei segni che si possono cogliere solo attraverso una attenta osservazione. Segni molto importanti per capire come si è comportato l'edificio e se sussistono particolari condizioni di pericolo.



Segni che a volte permangono a lungo e tendono a riproporsi nel tempo, anche a distanza di secoli, quando il fenomeno, malauguratamente, si ripropone. Per questo motivo possono attestare la sismicità di un'area.

Valutazioni di questo tipo spettano comunque ai tecnici e al personale preposto alle verifiche statiche, ma è sempre utile riconoscere questi segni.

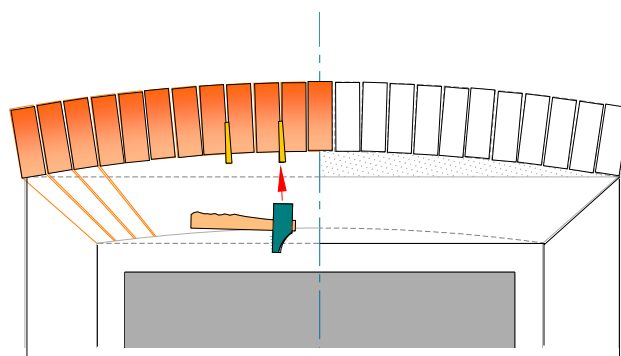
Fra le strutture più vulnerabili vi sono soprattutto gli archi, le volte e i solai realizzati con il sistema delle voltine di mattoni. Gli archi possono deformarsi in tanti modi diversi, però alcune configurazioni sono più pericolose di altre.



Se nell'arco, o nelle volte, si osservano delle lesioni centrali nella parte inferiore e ai lati nella parte superiore, significa che l'arco funziona, sfruttando le risorse di resistenza che ancora possiede.

Più pericoloso è l'arco allentato, dove solo la parte centrale scorre in basso e in seguito a piccoli movimenti può crollare senza preavviso. In questo caso è opportuno disporre delle puntellature.

Quando possibile si possono inserire dei cunei, anche di legno, utili per evitare il collasso.



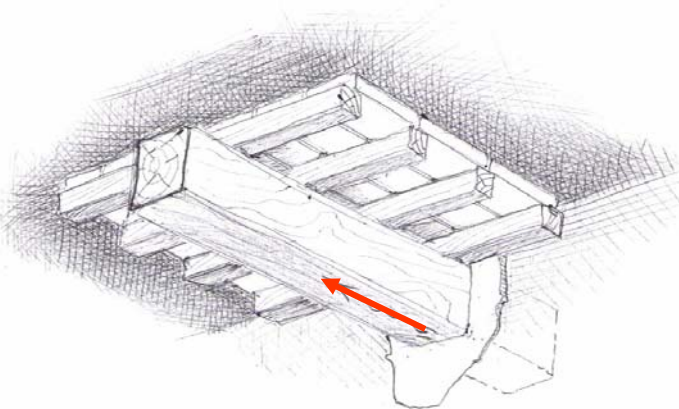
- Riparazione e prevenzione

‘Dove la terra ha tremato, tremerà ancora!’. Così scriveva Plinio il Vecchio, con la consapevolezza che non si possono prevedere i terremoti e con la certezza che dove il fenomeno si è manifestato è destinato a ripetersi e senza preavviso.

La prevenzione costituisce pertanto l’unica arma che si può mettere in campo per contrastare questo fenomeno.

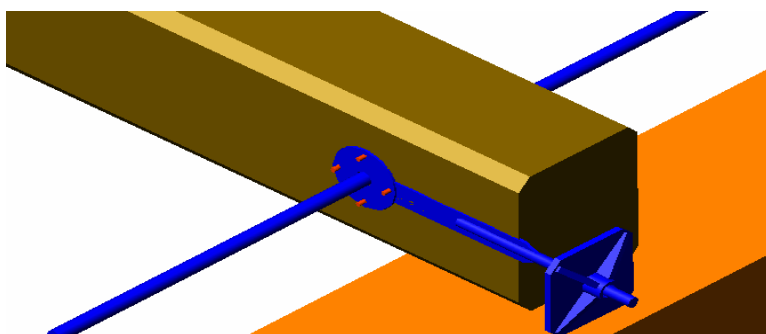
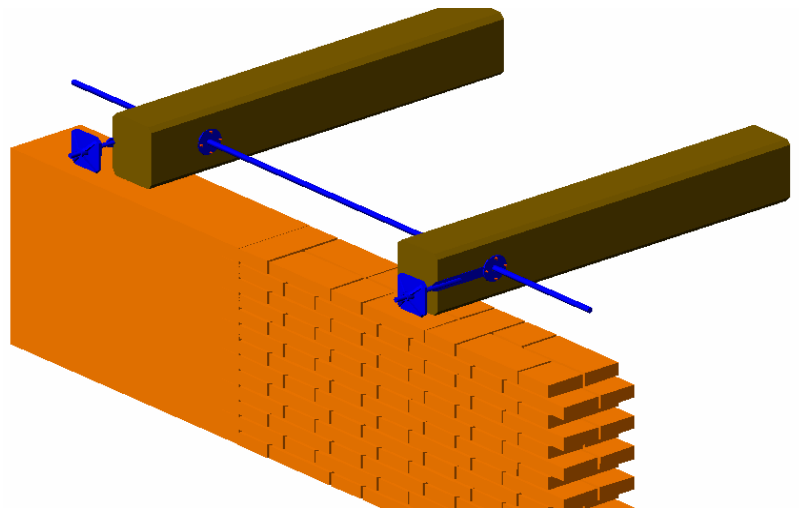
La strada da seguire consiste nell’osservare i danni e capire perché si sono manifestati, per apportare quelle migliorie che la moderna tecnologia consente.

L’esperienza del passato dimostra che spesso i provvedimenti più efficaci prescindono dalla tecnologia stessa e si affidano a soluzioni semplici e intuitive, come quelle che Pirro Ligorio ha messo a punto nel XVI sec.

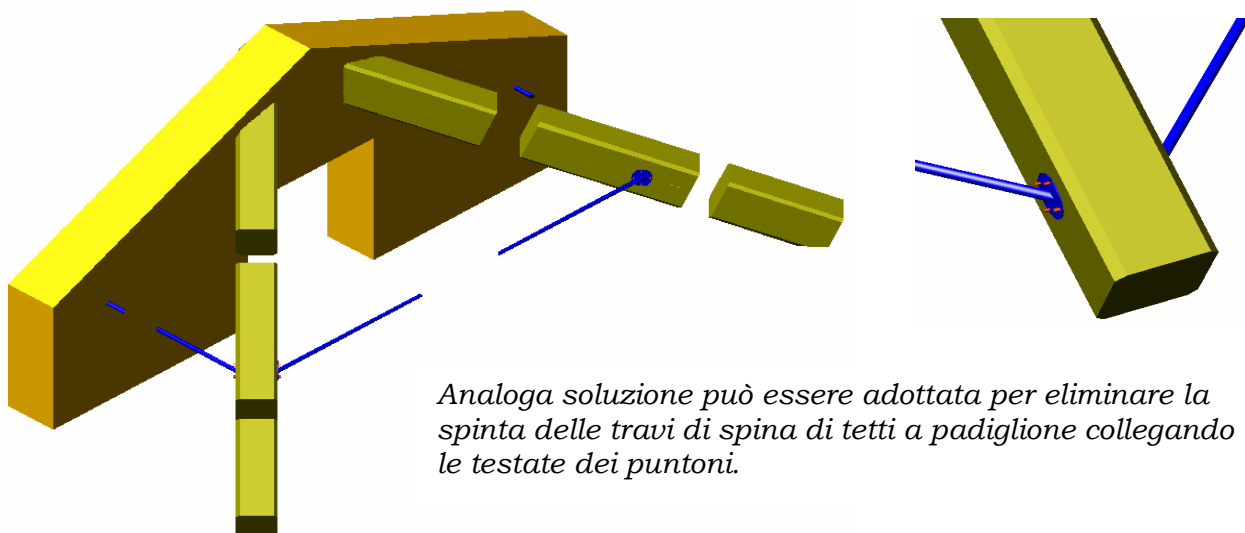


Un danno tipico che interessa le connessioni orizzontali fra i muri e i solai riguarda lo sfilamento dagli appoggi delle testate di travi. L’innesco del danno si manifesta con il distacco dell’intonaco lungo il bordo della trave.

Per collegare le teste delle travi fra loro e agli appoggi si può ricorrere all’impiego di tiranti fatti passare direttamente nei legni a raso parete e di piccole piastre di ancoraggio a muro, per trasformare dei vincoli monolateri in efficaci vincoli bilateri, capaci di funzionare sia a contrasto che per trattenuta

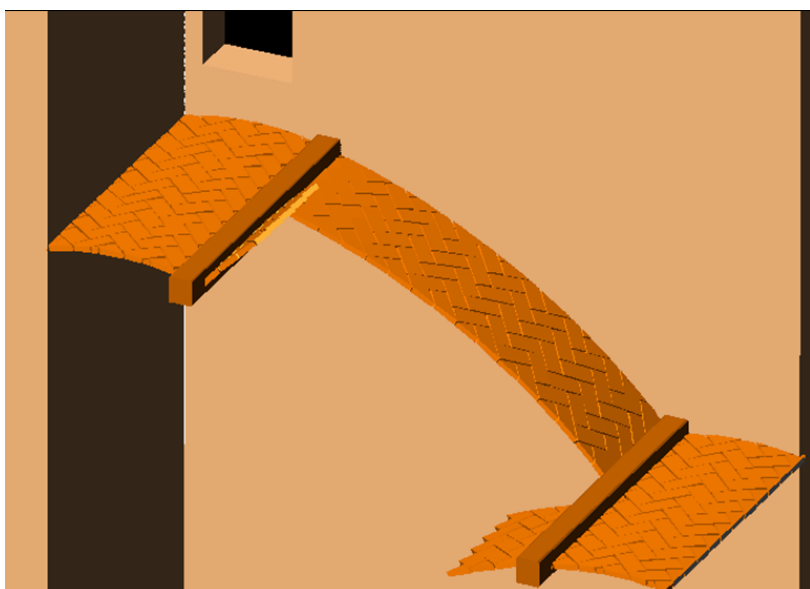


Due dischi di acciaio chiodati alla trave sono sufficienti per consentire al legno di sopportare l’azione di taglio dovuta alla forza di trattenuta. Le opere murarie in questo modo sono ridotte al minimo



Analoga soluzione può essere adottata per eliminare la spinta delle travi di spina di tetti a padiglione collegando le testate dei puntoni.

Un intervento rapido, che non richiede alcuna opera in copertura, eseguibile dall'interno dell'edificio e senza ponteggi e puntellature

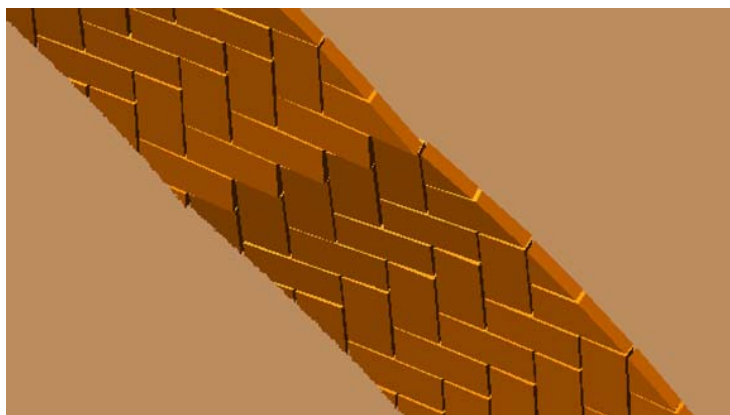


Una particolarità tutta emiliana sono le scale a volte di mattoni in foglio, costituite da tre moduli di volte laterizie di mattoni montati a spina, sostenute da due travi intermedie che delimitano i pianerottoli e le rampe.

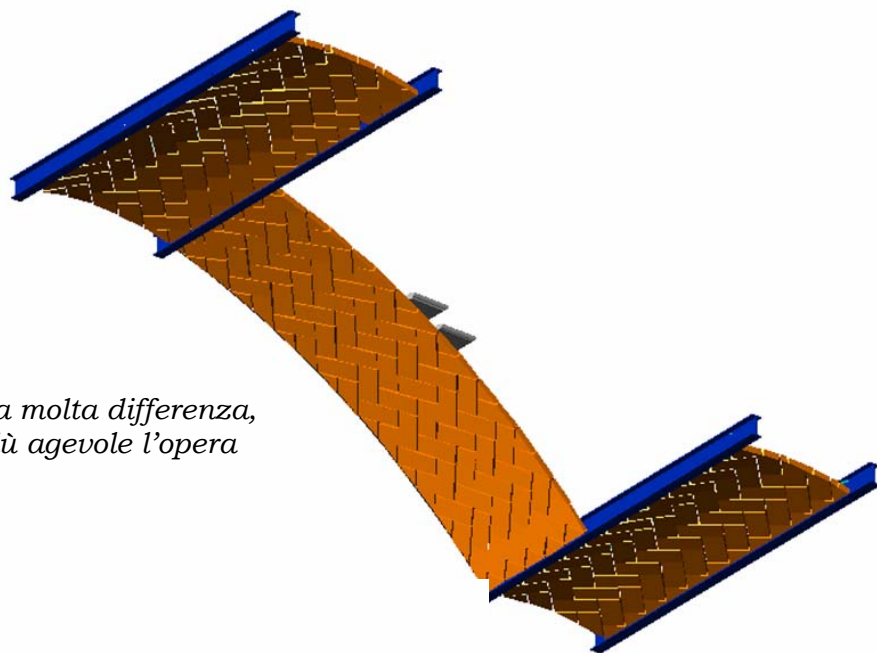
Un vero capolavoro strutturale, capace di sfruttare degli elementi sottili, disposti con una modesta curvatura, per ottenere una elevata capacità portante.

La vulnerabilità di queste scale dipende soprattutto dalla stabilità delle imposte, per cui, è sufficiente un leggero assestamento delle travi per osservare l'innesco di lesioni in mezzeria.

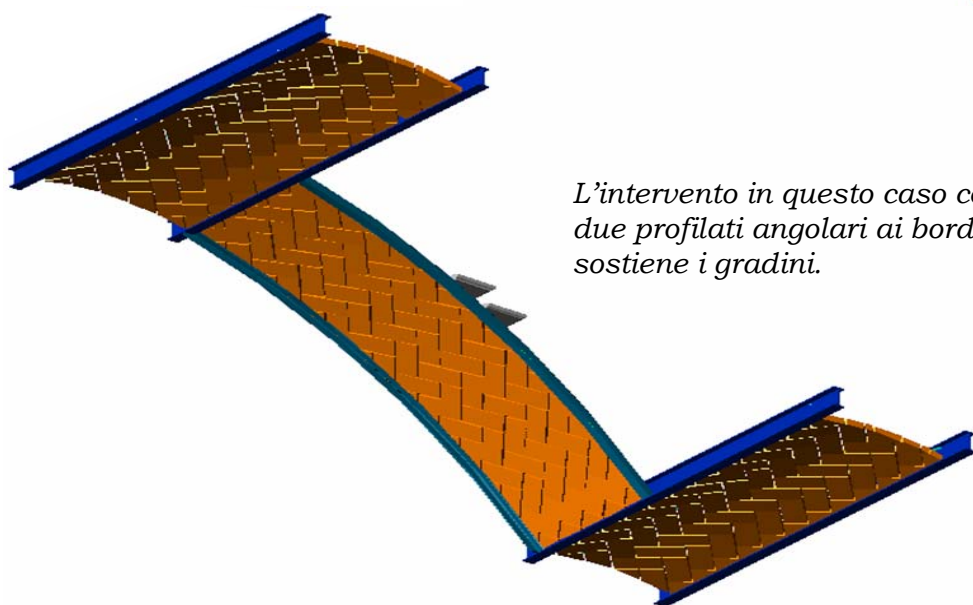
La tessitura a spina serve a contrastare la formazione di lesioni che comunque si formano, anche se con maggiore difficoltà, causando il distacco delle punte dei mattoni



Una variante “moderna” dello stesso tipo di scala si trova nella casa del primo novecento in stile Liberty, con i laterizi impostati su travi di acciaio invece che su travature di legno.



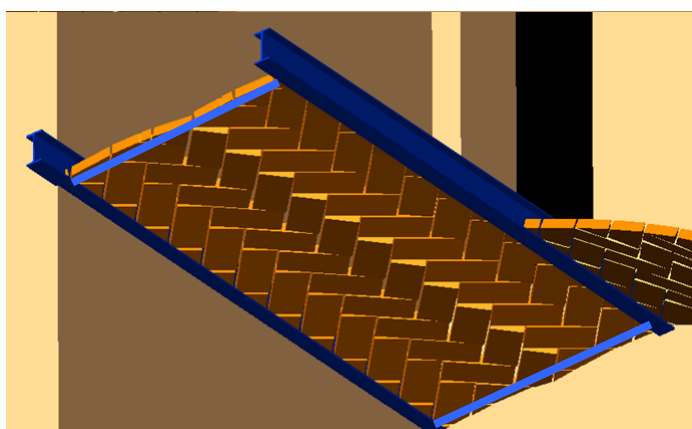
Ai fini della stabilità questo non fa molta differenza, mentre le travi di ferro rendono più agevole l'opera di consolidamento



L'intervento in questo caso consiste nella disposizione di due profilati angolari ai bordi della volta rampante che sostiene i gradini.

I profilati possono essere saldati alle travi dei pianerottoli in modo da creare una connessione efficace fra la prima e la terza voltina della scala.

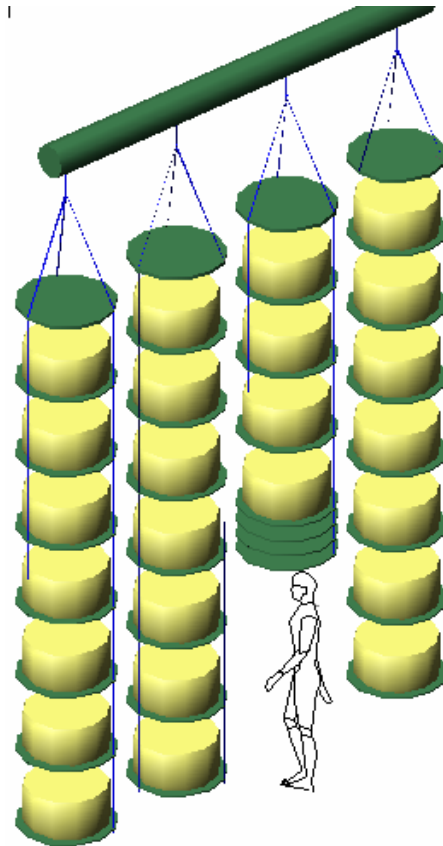
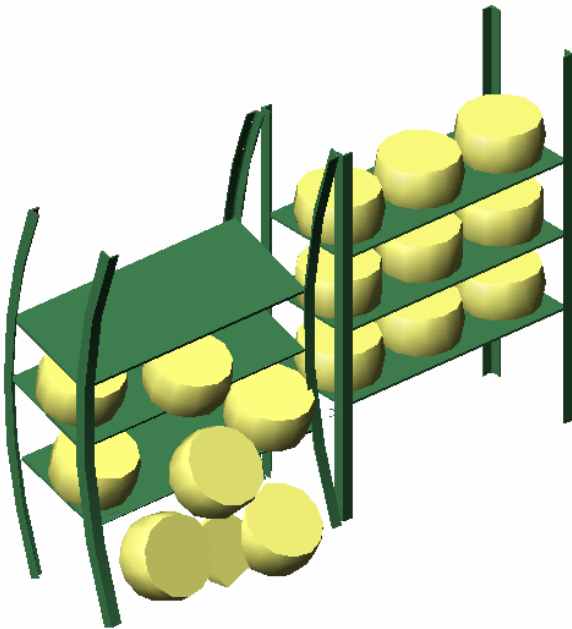
L'intervento sui pianerottoli può essere limitato alla disposizione di due tiranti d'intradosso per collegare le testate delle travi che fungono da catene fra le imposte della volta.
I tiranti sono collocati a filo intonaco e opportunamente mascherati.



In una regione dove il pericolo del terremoto non era considerato così rilevante, tanto meno ci si era posti il problema dello stoccaggio in sicurezza di prodotti da conservare all'interno di scaffali.

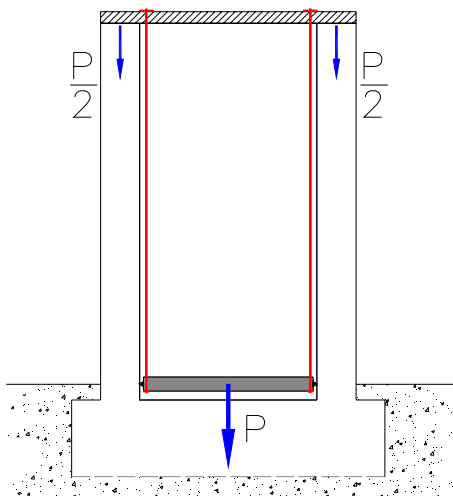
Il collasso degli scaffali carichi di pesanti forme di formaggio grana-padano costituisce un caso emblematico.

Gli scaffali dimensionati per sopportare carichi verticali anche rilevanti, si sono dimostrati inadeguati a sopportare le componenti sismiche orizzontali con conseguenze note.



Stoccaggio di forme di formaggio appese: un esempio di sistema antisismico dissipativo flessibile e funzionale

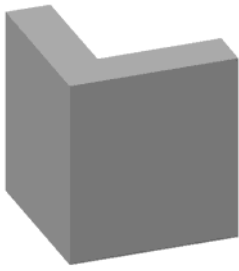
La possibilità di appendere le forme a soffitto su travature opportunamente dimensionate, come si usa normalmente nelle navi, risolverebbe il problema alla radice, rendendo la struttura più flessibile e sicura.



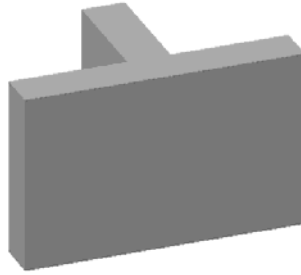
Per chi nutre perplessità rispetto a questa tecnica si richiama l'attenzione sulla tradizione dei pendoli antisismici utilizzati nelle moschee di molte regioni del medio oriente, dove grossi macigni di pietra venivano appesi alla sommità delle volte per dare carico verticale stabilizzante con modesti incrementi delle azioni sismiche orizzontali.

Applicazione pratica del "pendolo antisismico" costituito da una massa disposta alla base e appesa al tetto, in grado di assicurare un forte effetto stabilizzante.

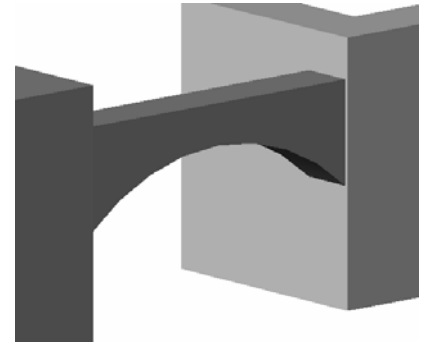
- Glossario



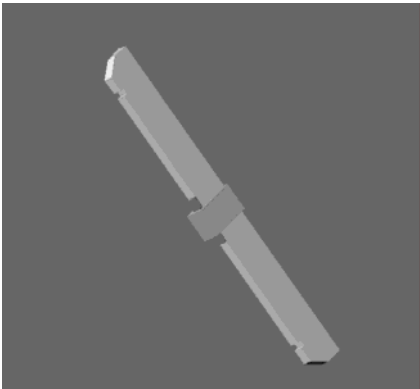
Cantonale o muro d'angolo



Muro di spina (intermedio)



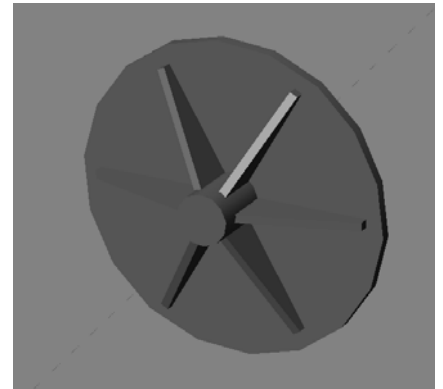
Arco di sbatacchio



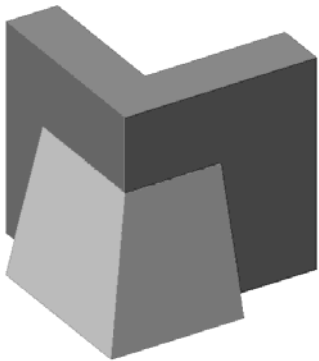
Capochiave a paletto



Capochiave a paletto doppio



Piastra di ancoraggio



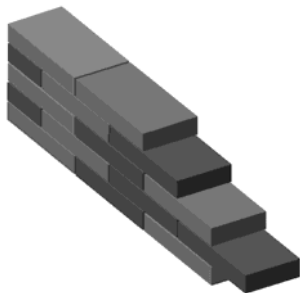
Sperone d'angolo



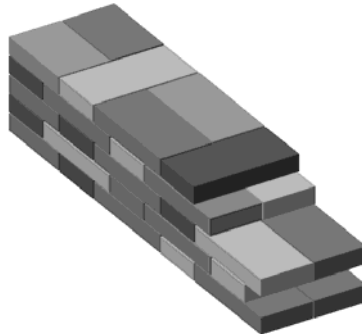
Sperone di facciata



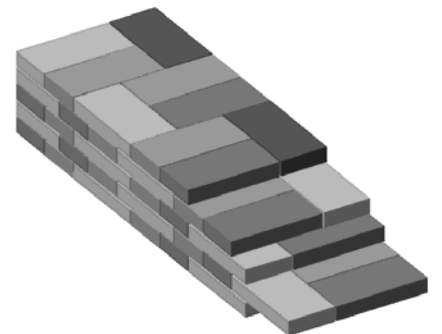
Contrafforti



Muro di una testa



Muro di due teste



Muro di tre teste