

MECCANISMI DI COLLASSO DELLE STRUTTURE ESISTENTI IN MURATURA

Prof. Ing. Flora Faleschini
Dipartimento Ingegneria
Civile, Edile e Ambientale
VMSSE 2023/2024



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

NTC2018

Le Norme Tecniche prescrivono **due tipologie di verifiche**, nei confronti dei meccanismi di **collasso locale e globale** negli edifici esistenti in muratura.

L'analisi della risposta globale di un edificio **ha significato solo quando sono impediti i meccanismi di collasso** locali fuori dal piano (presenza di catene, cordoli...). La risposta globale dell'edificio è governata dalla resistenza nel piano delle pareti.

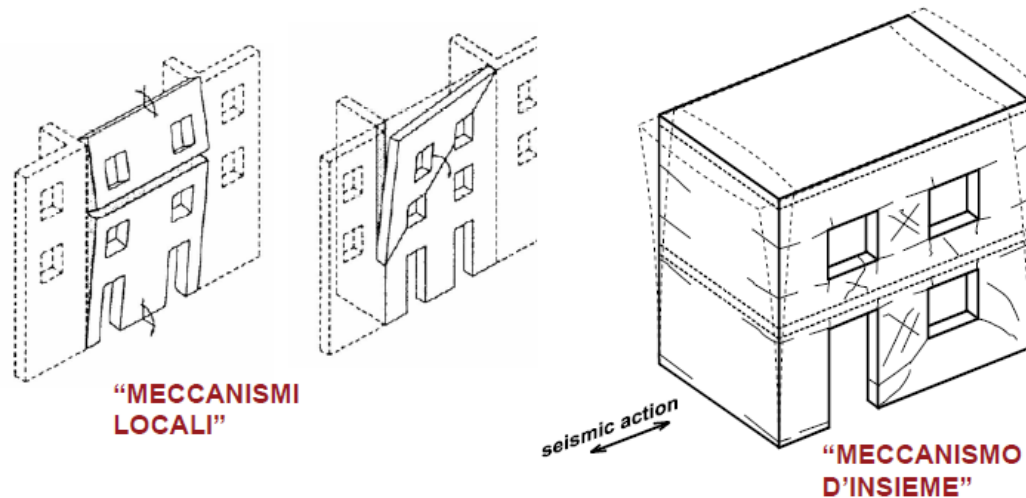
In edifici inseriti in un **aggregato**, il significato dell'analisi è convenzionale, a causa dell'interazione con gli edifici adiacenti. Necessità di analisi **dell'unità strutturale (US) oggetto di studio**, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

Quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma tende a reagire al sisma come un **insieme di sottosistemi** (macroelementi), la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico. In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali.

EVIDENZE STRUTTURALI

- I meccanismi **locali** interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione, e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra pareti e orizzontamenti, e negli incroci murari.
- I meccanismi **globali** sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano.

La **sicurezza** della costruzione va valutata nei **confronti di entrambi** i tipi di meccanismo.



EVIDENZE STRUTTURALI

La **massima resistenza** dell'edificio al sisma può essere sviluppata mediante una risposta globale se sono opportunamente **impediti i meccanismi locali**, mediante degli accorgimenti costruttivi adeguati (collegamenti, incatenamenti, etc).

Per l'analisi sismica dei meccanismi locali si può far ricorso **ai metodi dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie**, tenendo conto, anche se in forma approssimata, della resistenza a compressione, della tessitura muraria, della qualità della connessione tra le pareti e della presenza di catene e tiranti.

Con tali metodi è possibile valutare la capacità sismica in termini di **resistenza** (adottando un opportuno fattore di struttura) o di **spostamento** (determinando l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura può progressivamente sopportare all'evolversi del meccanismo).

EVIDENZE STRUTTURALI

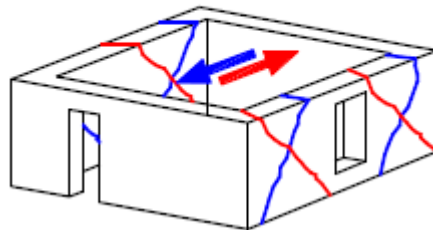
Per quanto riguarda gli edifici esistenti, essi sono generalmente caratterizzati da:

- Scadenti collegamenti tra le murature e tra orizzontamenti e muratura;
- Nessun comportamento scatolare → scomposizione in macro-elementi;
- Collasso governato dall'attivazione di meccanismi locali.

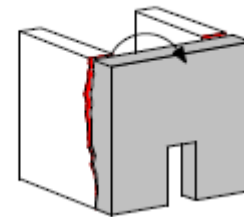
Associato al comportamento dei pannelli murari, si possono distinguere due macro-tipologie di comportamento:

- **Fuori piano;**
- **Nel piano.**

MECCANISMI NEL PIANO
- II modo



MECCANISMI FUORI
PIANO
I modo



EVIDENZE STRUTTURALI

La qualità della muratura è un parametro molto importante nel definire la modalità di danno fuori piano negli edifici in muratura. Infatti, negli edifici esistenti spesso avvengono collassi globali o parziali indotti dall'azione sismica, in genere per perdita dell'equilibrio di porzioni murarie.

Muratura di buona qualità

Formazione di lesioni e comportamento per blocchi rigidi



Muratura di qualità scadente

Fessurazione diffusa, disgregazione e distacco tra i paramenti



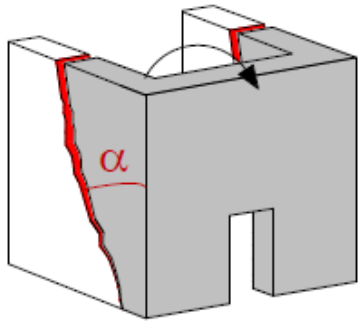
EVIDENZE STRUTTURALI



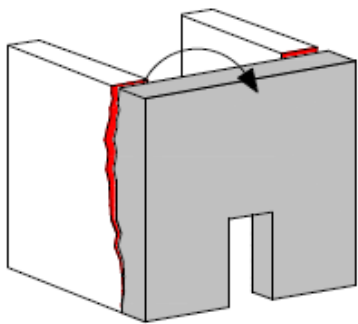
Sisma in Centro Italia, sequenza di Amatrice (agosto 2016)



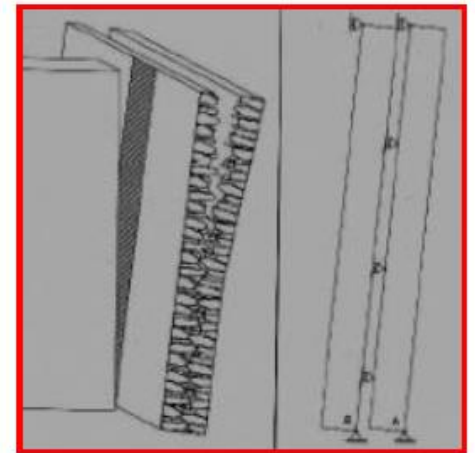
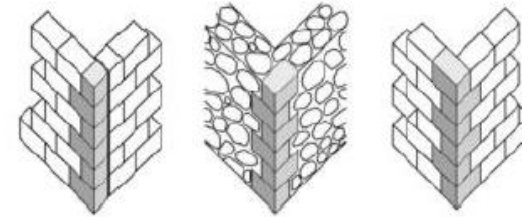
EVIDENZE STRUTTURALI



? $\alpha_{Max} = 10^\circ - 15^\circ$



Sisma in Centro Italia, sequenza di Amatrice (agosto 2016)



EVIDENZE STRUTTURALI

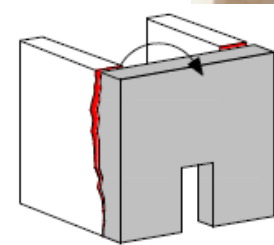
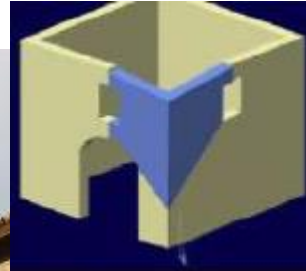


EVIDENZE STRUTTURALI



San Felice sul Panaro, Sisma Emilia (2012)

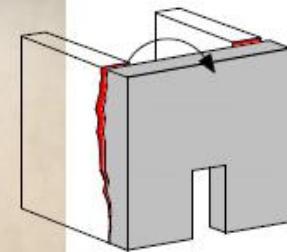
EVIDENZE STRUTTURALI



Innesco del meccanismo

San Felice sul Panaro, Sisma Emilia (2012)

EVIDENZE STRUTTURALI



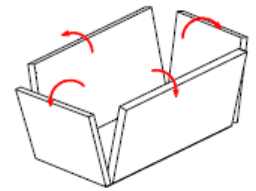
Crollo della parete perimetrale soggetta alla spinta della copertura e al peso della parete.

Si osserva modesto grado di ammorsamento tra le pareti e mancanza di diatoni di collegamento

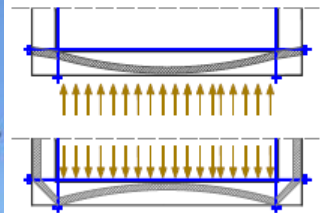
EVIDENZE STRUTTURALI



Sisma Centro Italia, sequenza Amatrice (2016)



Innesco del
meccanismo
dovuto
all'insufficiente
incatenamento



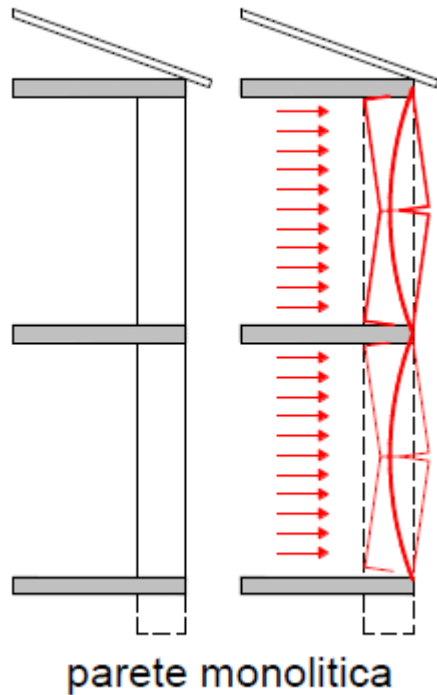
EVIDENZE STRUTTURALI



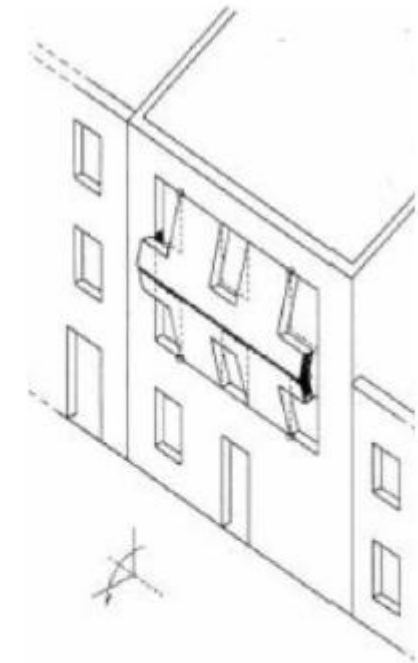
EVIDENZE STRUTTURALI



EVIDENZE STRUTTURALI

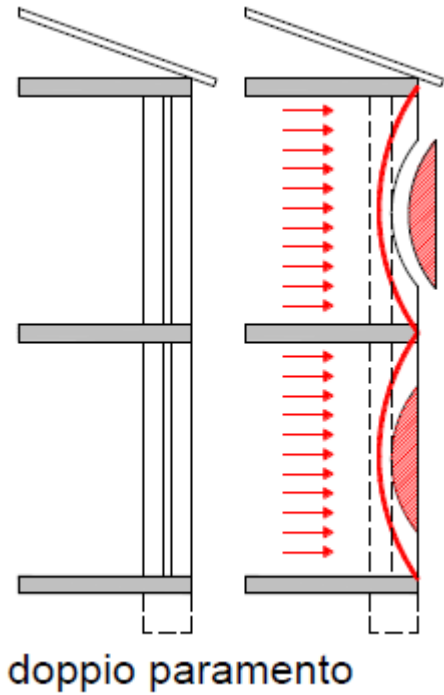


Sisma l'Aquila (2009), flessione fuori piano



- Copertura con cordolo perimetrale
- Muratura scadente
- Nessun collegamento tra solaio di interpiano e parete

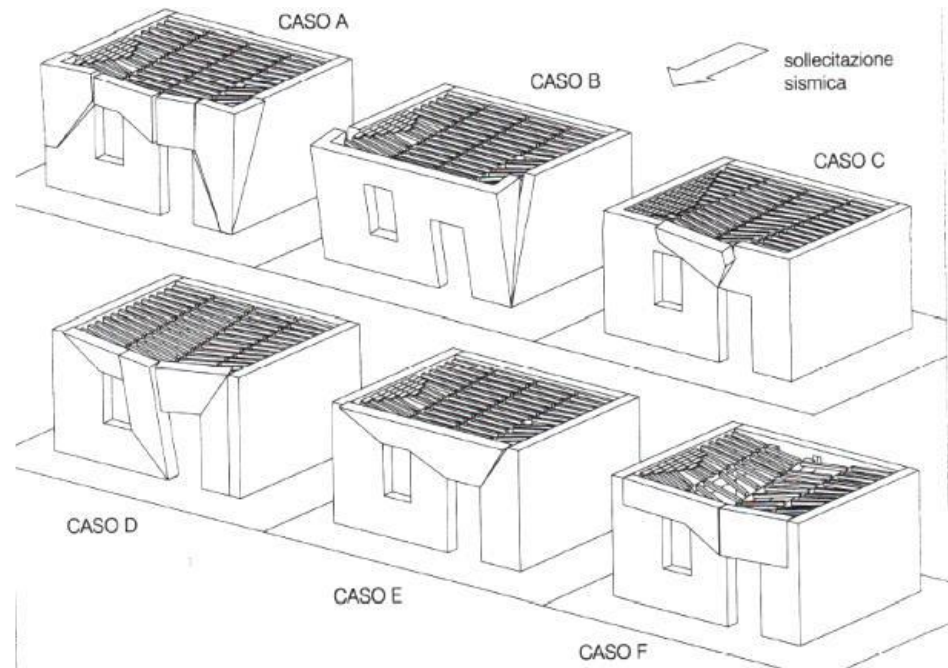
EVIDENZE STRUTTURALI



Sisma Centro Italia, sequenza Amatrice (2016)

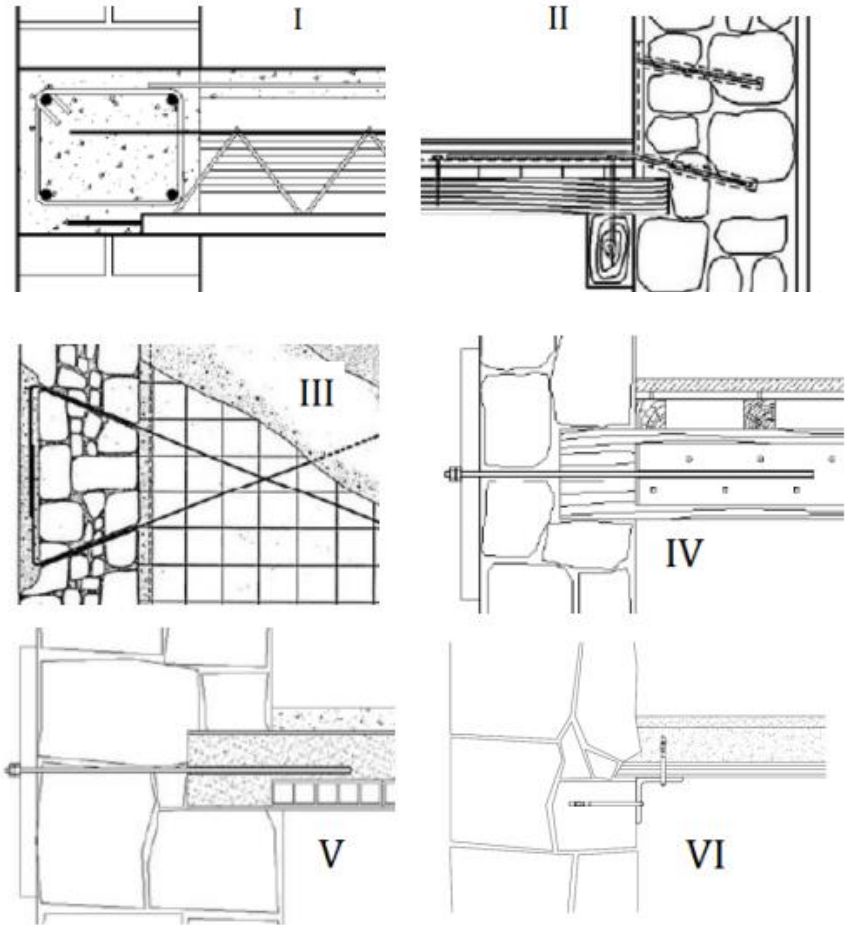
EVIDENZE STRUTTURALI

Meccanismo fuori piano indotto dal martellamento di un solaio:
solaio in legno ortotropo: in una direzione martellano i travetti, nell'altra il solaio non trasferisce alcun carico, l'assito non trasferisce azione sismica.



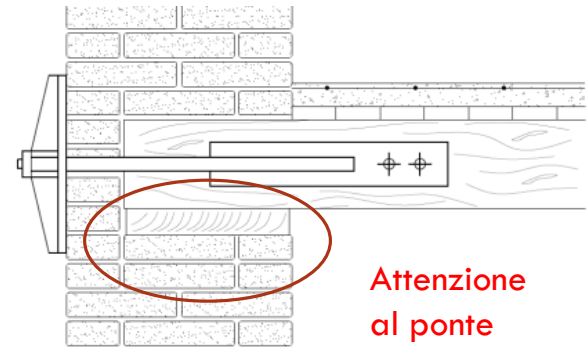
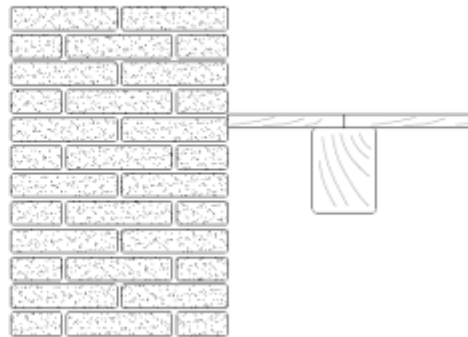
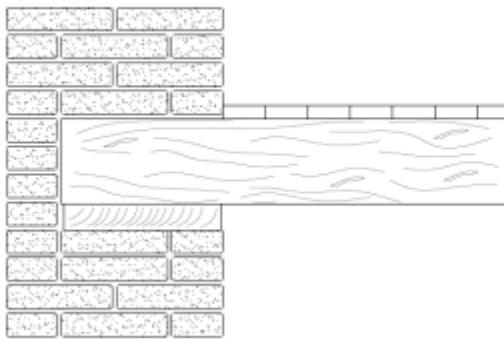
EVIDENZE STRUTTURALI

- I. cordoli in calcestruzzo armato;
- II. rete elettrosaldata risvoltata sulla parete;
- III. rete elettrosaldata collegata alla parete con ferri disposti a coda di rondine;
- IV. capochiave e tirante metallico ancorato a travi in legno o in acciaio;
- V. capochiave e tirante metallico annegato nella cappa in calcestruzzo;
- VI. profilo metallico continuo ancorato alla muratura e al solaio.



Es. di vincolo bidirezionale solaio-parete in grado di trasferire le azioni senza che avvenga il punzonamento della muratura o la prematura rottura del dispositivo di connessione stesso

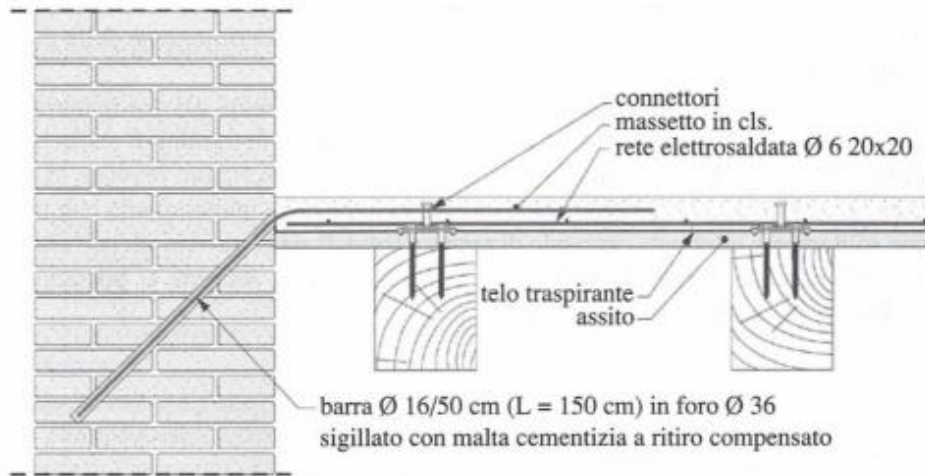
EVIDENZE STRUTTURALI



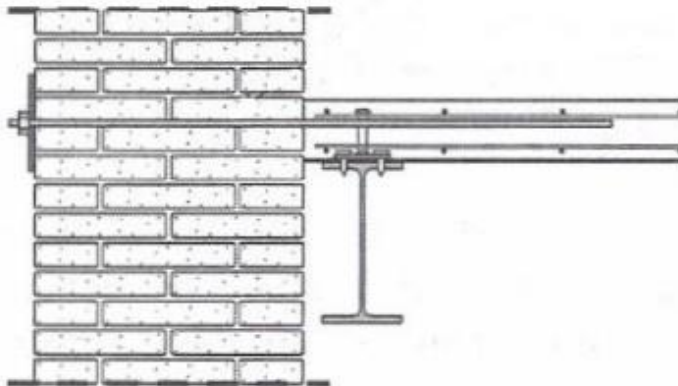
Attenzione
al ponte
termico

Il criterio generale per vincolare bilateralmente questo tipo di struttura, o altre simili, consiste nell'evitare lo scarroccio delle travi principali attraverso la posa di una cappa in calcestruzzo che doni la necessaria rigidezza alla struttura orizzontale + applicazione di tirante e capochiave. Non è importante fornire una pretensione alla barra che collega la chiavarda alla trave, ma sarà sufficiente un corretto serraggio. Inoltre è bene che le testate delle travi non siano annegate nella malta, perché i due materiali presentano delle incompatibilità tali da pregiudicare la durabilità dell'opera.

EVIDENZE STRUTTURALI

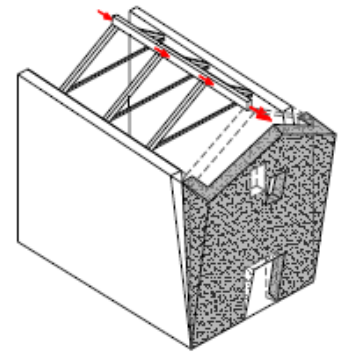


Possibile omettere le chiavarde andando ad inserire le barre all'interno di appositi fori praticati nella muratura e successivamente operare il loro riempimento mediante iniezioni di malta cementizia / di resine.

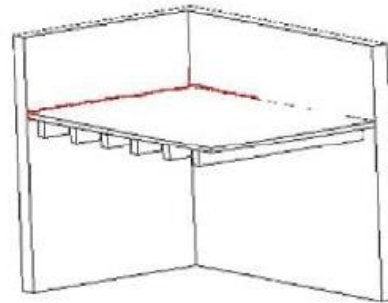
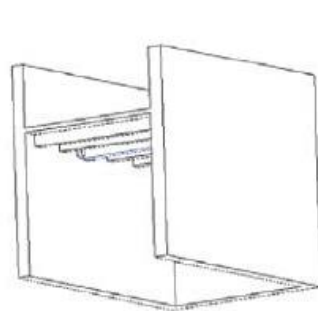
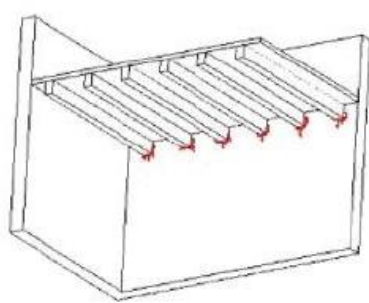
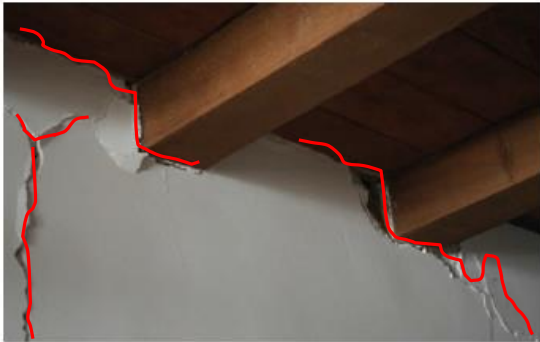


Valido anche per solai scarsamente vincolati alle pareti del tipo misto acciaio - laterizio, acciaio - calcestruzzo e in laterocemento.

EVIDENZE STRUTTURALI

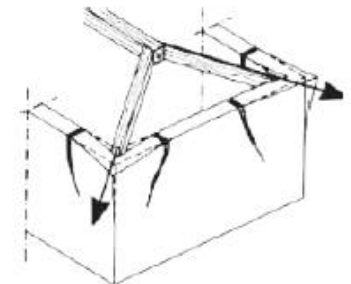
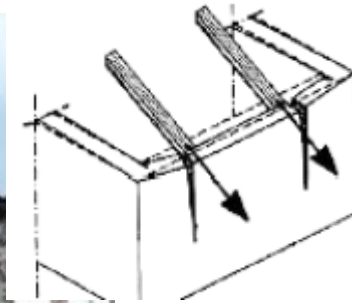


Martellamento delle travi:



EVIDENZE STRUTTURALI

Spinta delle travi di compluvio e displuvio delle coperture:

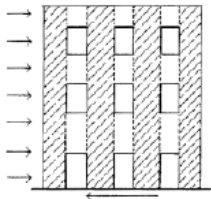
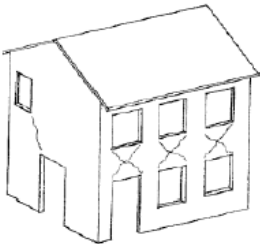
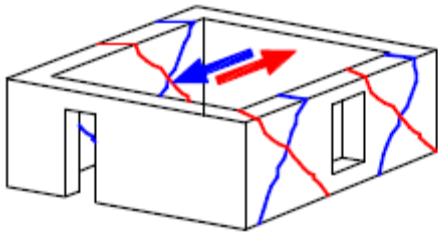


Innesco del meccanismo



EVIDENZE STRUTTURALI

Meccanismi nel piano: rottura a taglio dei maschi murari



Sisma Centro Italia, sequenza Amatrice (2016)

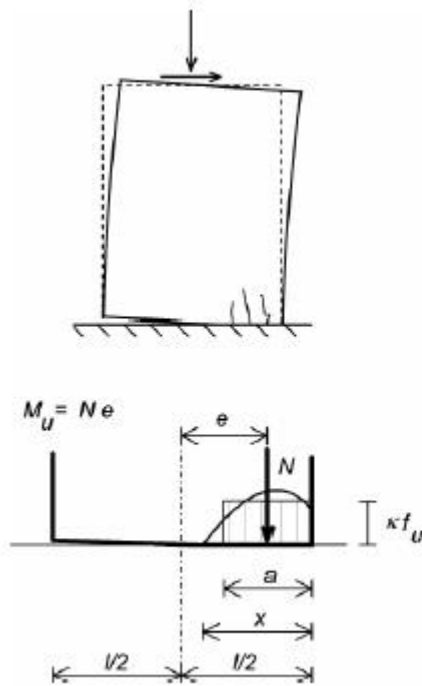
EVIDENZE STRUTTURALI

Meccanismi nel piano: possono nascere significativi effetti torcenti per edifici molto allungati



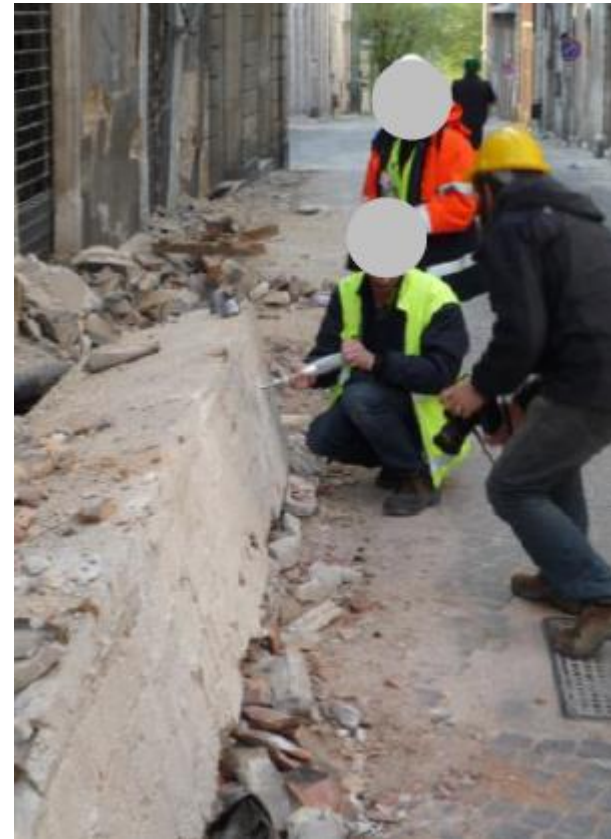
EVIDENZE STRUTTURALI

Meccanismi nel piano: rottura a pressoflessione



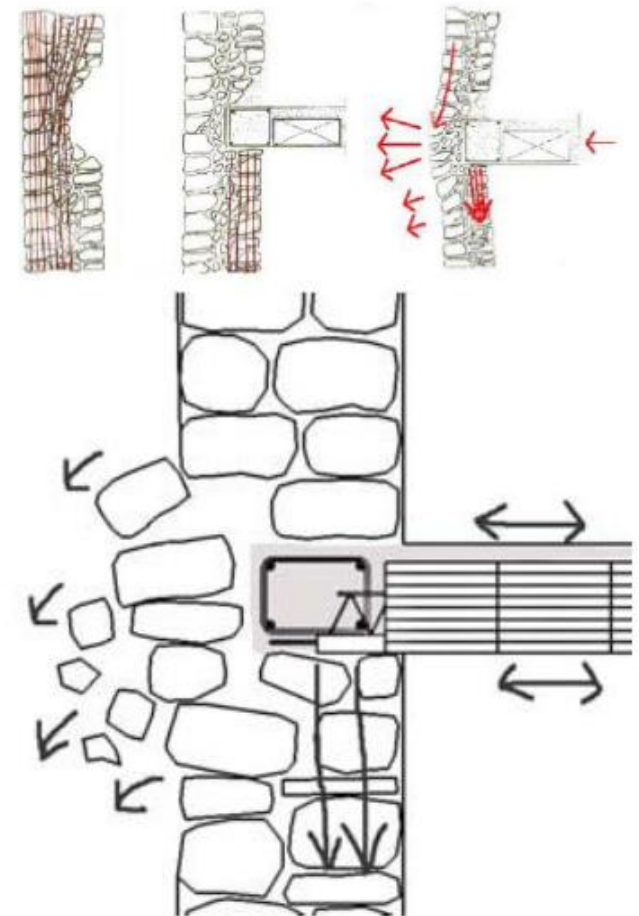
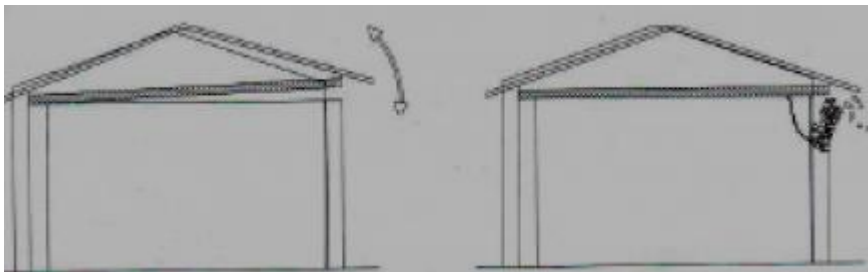
EVIDENZE STRUTTURALI

Presenza di cordoli o solette in c.a. non ammortate



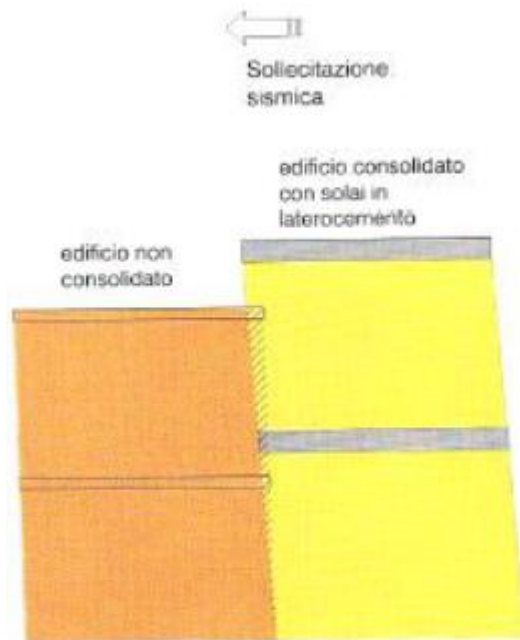
EVIDENZE STRUTTURALI

Presenza di cordoli o solette in c.a.



EVIDENZE STRUTTURALI

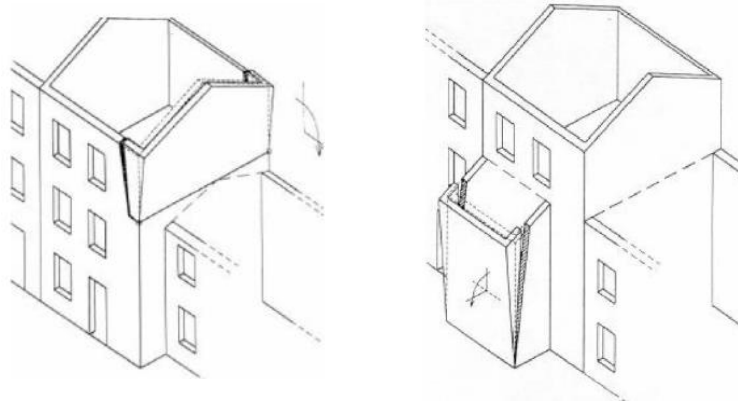
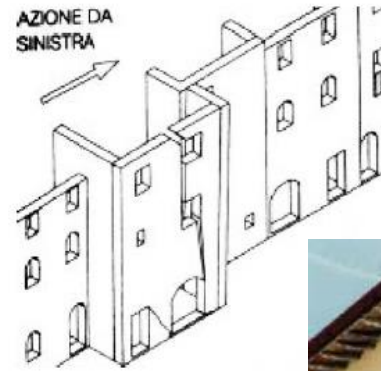
Edifici in aggregato: parziali consolidamenti



Sisma Centro Italia, sequenza Amatrice (2016)

EVIDENZE STRUTTURALI

Edifici in aggregato: irregolarità in altezza e influenza sui meccanismi fuori piano ed in piano

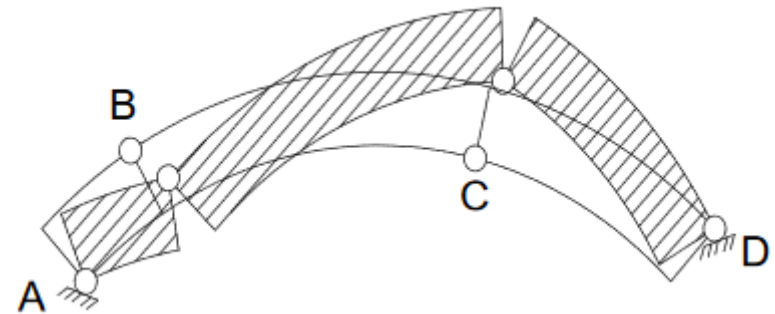
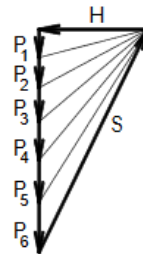
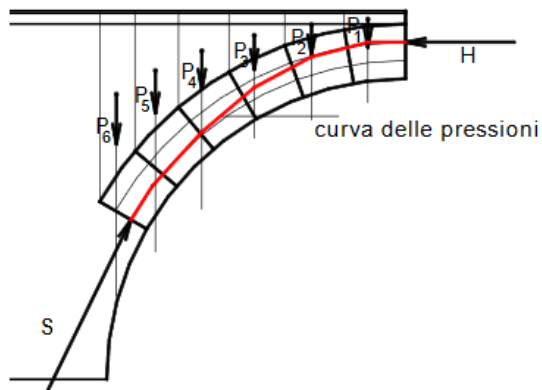


Sisma Centro Italia, sequenza Amatrice (2016)



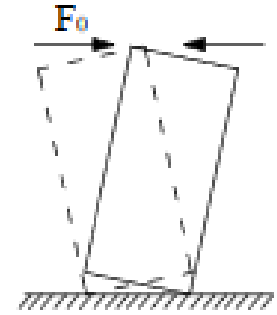
EVIDENZE STRUTTURALI

Dissesti di archi e volte



L'accelerazione
sismica che porta all'innescio del meccanismo varia
modificando i tre parametri che caratterizzano
l'arco stesso: la luce, la freccia, lo spessore

EVIDENZE STRUTTURALI

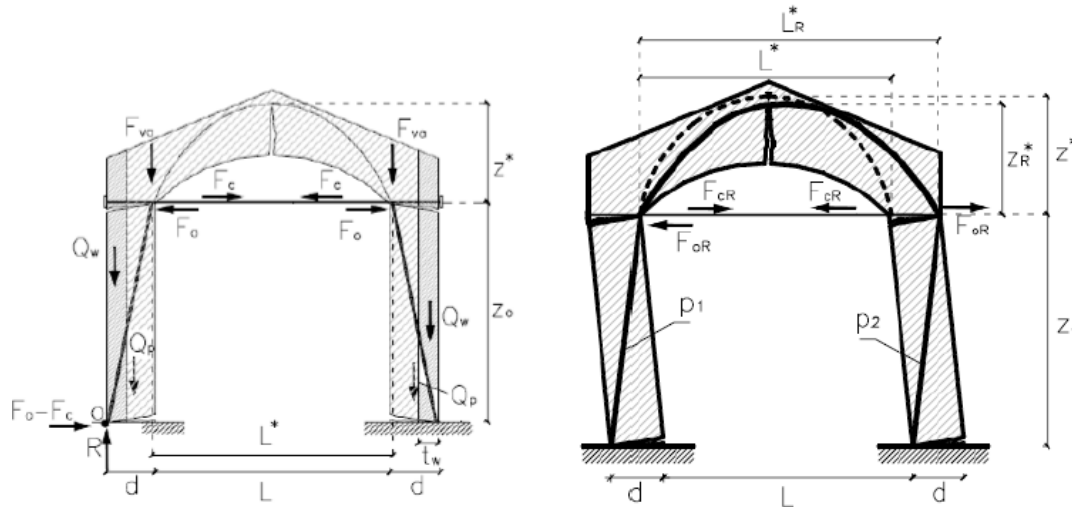


Dissesti di archi e volte: effetto rocking

CONDIZIONI DI RIPOSO: il tiro della catena è in generale inferiore alla spinta dell'arco per la presenza dell'effetto contrafforte.

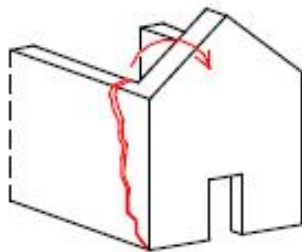
CONDIZIONI SISMICHE: viene meno l'effetto contrafforte e aumenta la spinta dell'arco a causa dell'incremento della luce.

Condizioni Statiche vs Condizioni Sismiche

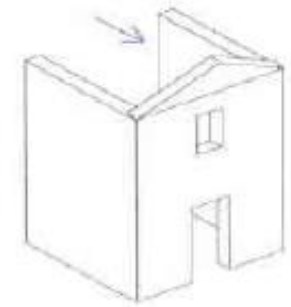


EDIFICI MONUMENTALI

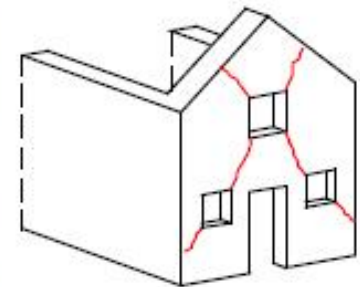
Ribaltamento della facciata



Ribaltamento della sommità della facciata

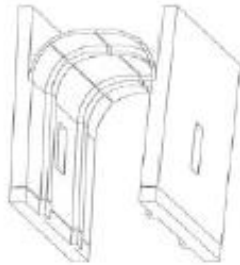


Meccanismi nel piano della facciata

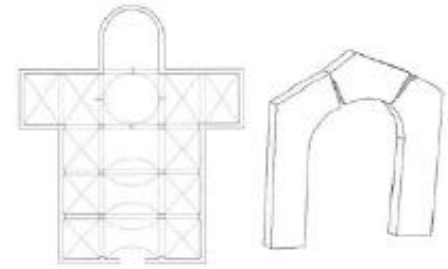


EDIFICI MONUMENTALI

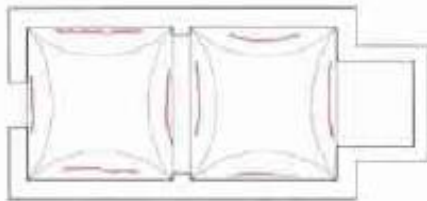
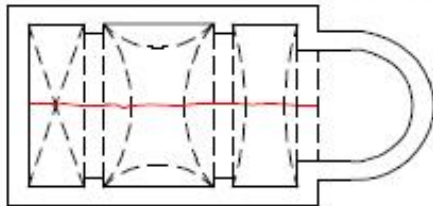
Risposta trasversale dell'aula



Rottura in chiave dell'arco trionfale

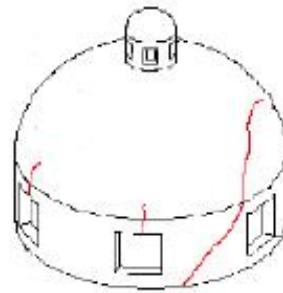


Volte della navata centrale

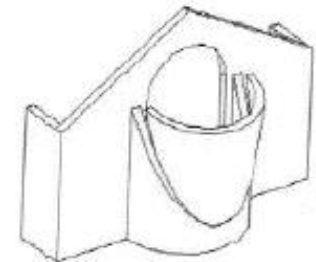


EDIFICI MONUMENTALI

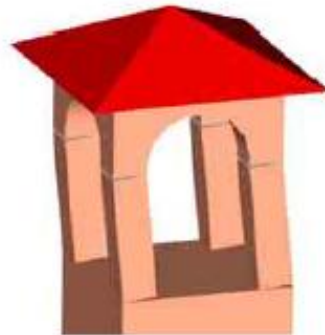
Cupola



Ribaltamento dell'abside



Torre e cella campanaria





EDIFICI MONUMENTALI

Seismic damage survey and empirical fragility curves for churches after the August 24, 2016 Central Italy earthquake

Lorenzo Hofer^{a,*}, Paolo Zampieri^b, Mariano Angelo Zanini^b, Flora Faleschini^{a,b}, Carlo Pellegrino^a

^a University of Padova, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering – ICED, Via Mensura 51, 35131, Italy

^b University of Padova, Department of Industrial Engineering, Via Gradenigo 6a, 35121, Italy

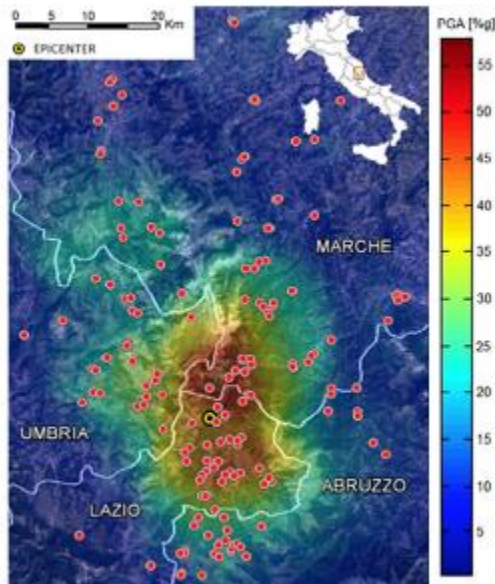
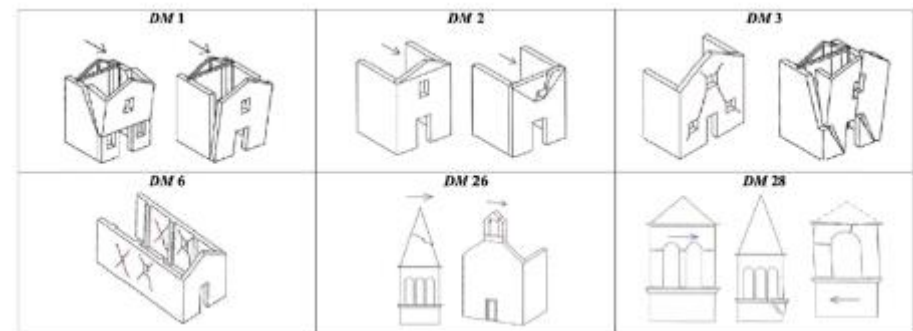
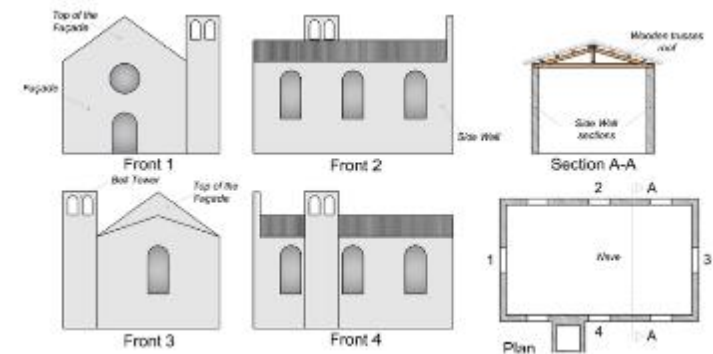


Fig. 3. August 24, 2016 Amatrice earthquake shake map and location of the 196 surveyed churches.

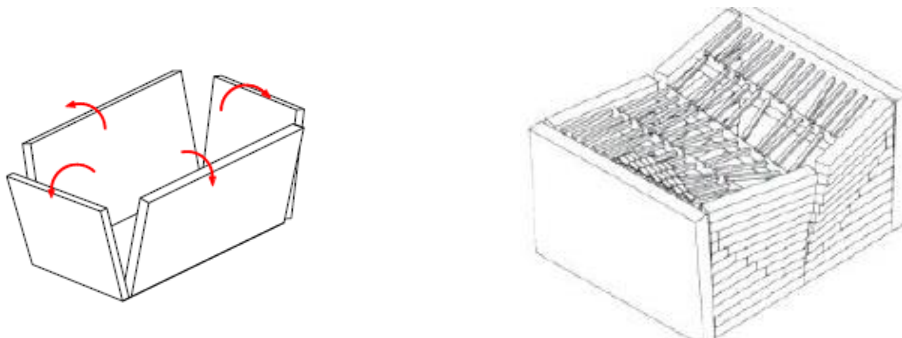
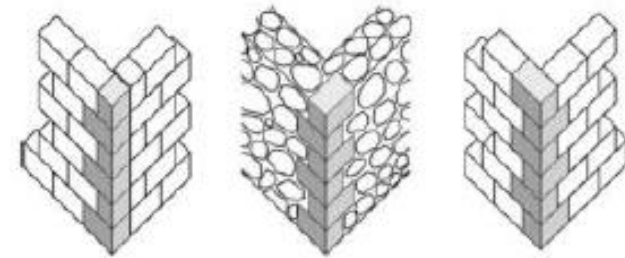


196 chiese ispezionate dopo la 1 scossa della sequenza dell'Italia Centrale

SINTESI

Gli elementi che possono rappresentare una notevole fonte di vulnerabilità per le strutture in muratura possono essere così riassunti:

1. Mancanza di **COLLEGAMENTO** tra le murature ortogonali;
2. Impossibile attivazione del **comportamento scatolare**:
 - **Inefficace INCATENAMENTO**;
 - **Inefficace collegamento di murature e solai** - Solai eccessivamente deformabili nel piano e non collegati alle murature;
 - Coperture e solai orditi solo in una direzione e non collegati al piano;

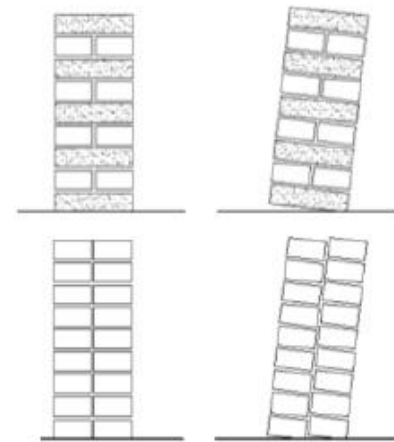


SINTESI

Gli elementi che possono rappresentare una notevole fonte di vulnerabilità per le strutture in muratura possono essere così riassunti:

3. Qualità della muratura:

- **Faticenza o scarsa qualità dei materiali costituenti** (legante degradato o malta magra, muratura in ciotoli, etc);
- **Scarsa qualità della tessitura** (murature a sacco, assenza di diatoni, forte disomogeneità della tessitura).

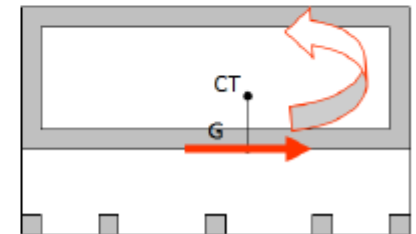
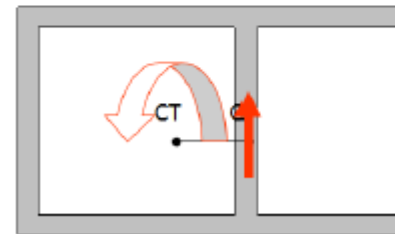
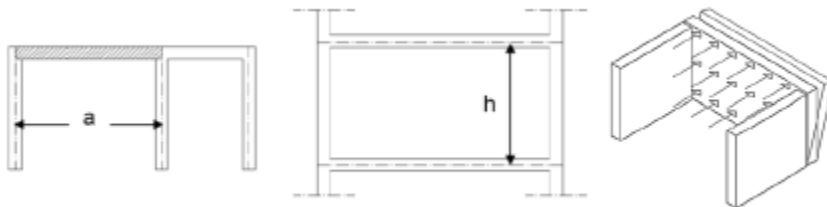
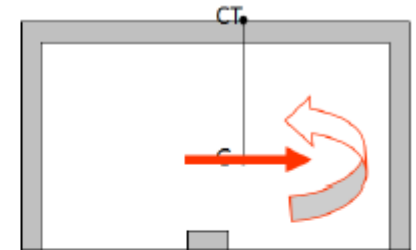
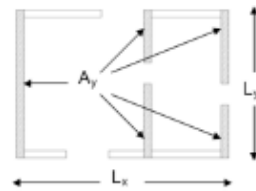
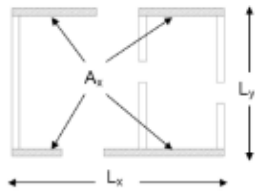


SINTESI

Gli elementi che possono rappresentare una notevole fonte di vulnerabilità per le strutture in muratura possono essere così riassunti:

4. Geometria:

- **Difforme presenza di murature resistenti nelle due direzioni principali;**
- **Grande eccentricità del centro di massa rispetto al centro di torsione.**

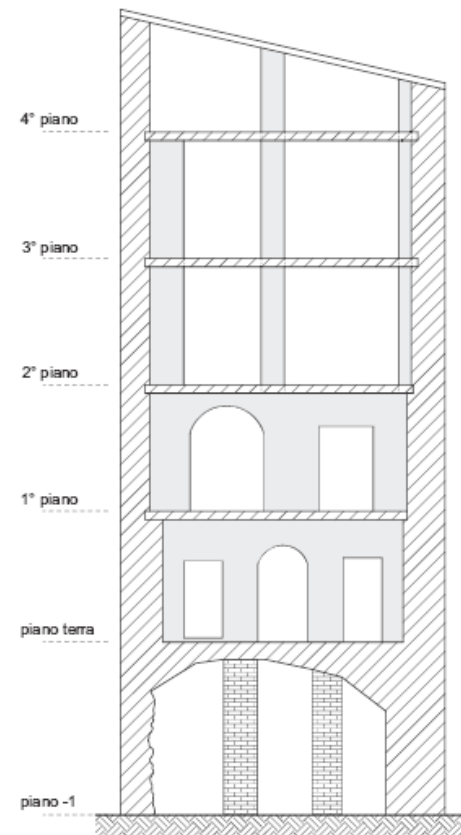
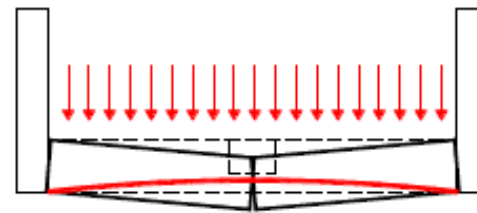


SINTESI

Gli elementi che possono rappresentare una notevole fonte di vulnerabilità per le strutture in muratura possono essere così riassunti:

5. Irregolarità geometrica:

- **irregolarità delle strutture in elevazione** (presenza di logge...);
- murature portanti con alta percentuale di **bucature** e/o aperture sfalsate;
- presenza di piani sfalsati;
- **PRESENZA DI CAVITA'** (nicchie, canne fumarie) nello spessore del muro.



SINTESI

Gli elementi che possono rappresentare una notevole fonte di vulnerabilità per le strutture in muratura possono essere così riassunti:

6. Presenza di **spinte orizzontali non contrastate**:

- **insufficiente incatenamento di volte e archi;**
- spinta in copertura.

7. **Carenze delle fondazioni con rischio di cedimenti**:

- disomogenea natura del terreno, struttura in parte su roccia e in parte su terreno;
- materiali sabbiosi quasi saturi soggetti a fenomeni di liquefazione;
- modesta profondità del piano di fondazione.

8. **Esiti di pregressi interventi sulle strutture**:

- pesanti coperture/solai in c.a.;
- cordoli robusti su murature scadenti e/o cordoli in breccia;
- significative soluzioni di continuità nella rigidità di porzioni di edifici in aggregato.

