

STRUTTURE E CALCOLI

Costruzioni storiche in muratura

Vulnerabilità sismica
e progettazione degli interventi

Sara Vallucci - Enrico Quaglini - Stefano Lenzi

Il comportamento di una struttura in muratura può essere definito come il suo modo di resistere, deformarsi e danneggiarsi fino ad arrivare al collasso, quando sollecitata dai carichi verticali (normalmente presenti sulla struttura) e da carichi esterni (le azioni orizzontali dovute al sisma).

L'edificio investito dall'azione sismica è esposto a **vulnerabilità** e indebolimento della struttura: diversi eventi sismici e danni riparati solo parzialmente, con il passare degli anni, producono infatti un danno cumulato.

Capire come la costruzione si è opposta nel tempo a queste azioni è importante per **progettare interventi nel rispetto della struttura** dell'edificio, agendo senza stravolgerlo e solo dove necessario.

Il volume offre dati e indicazioni utili per:

- analizzare i meccanismi di danno
- valutare la sicurezza degli edifici
- progettare interventi di miglioramento sismico su edifici esistenti
- intervenire su tutti gli elementi della struttura

Indice

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

Parte seconda – Metodi di conoscenza e verifica. Progettazione degli interventi a contrasto dei meccanismi di danno

- Valutazione della sicurezza di edifici esistenti in muratura
- La progettazione degli interventi
- Strutture particolari: archi e volte

Parte terza – Analisi sismica globale

- Introduzione all'analisi

Parte quarta – Esempi applicativi

- Caso di studio 1: edificio in località San Felice sul Panaro (MO)
- Caso di studio 2: edificio in località Cento (FE)
- Caso di studio 3: edificio in località Cento (FE)
- Altri esempi di meccanismi di primo modo
- Altri esempi di dimensionamento interventi

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

Fase conoscitiva

Importante per individuare tutti gli aspetti necessari a capire la fabbrica storica (storia dell'edificio / ingombro planimetrico e altimetrico / tecnologia costruttiva / materiali utilizzati / stato di conservazione)

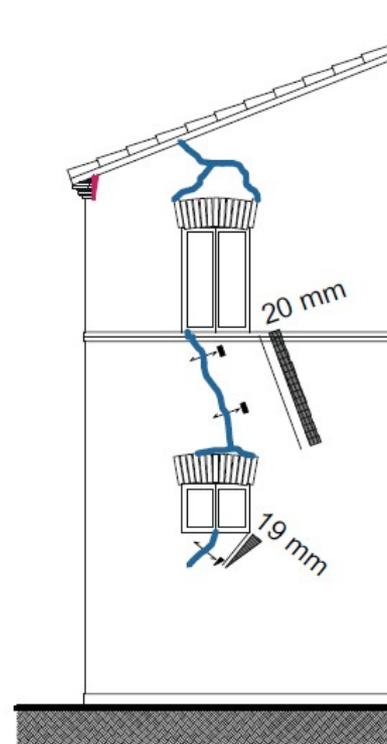


Diagnosi

↓ (caso per caso)

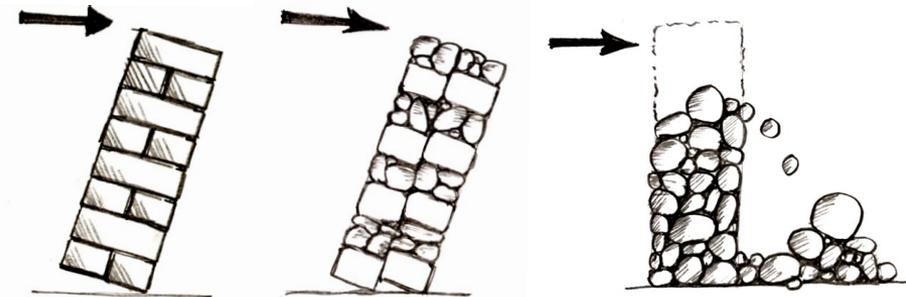
Terapia

È impensabile prendere decisioni ai fini progettuali prescindendo dalla storia dell'edificio, dalla sua evoluzione nel tempo in merito alla sua destinazione d'uso, agli eventi che ha subito e agli interventi a cui è stato sottoposto nel tempo.



Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

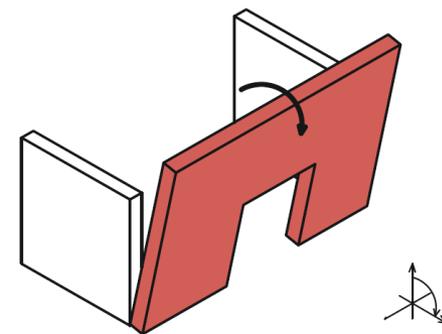


RIBALTAMENTO SEMPLICE: GLOBALE

Il meccanismo è influenzato da:

- inefficace ammassamento tra le pareti ortogonali;
- assenza di vincoli in sommità;
- presenza di aperture troppo vicine all'intersezione tra le pareti ortogonali;
- presenza di coperture spingenti.

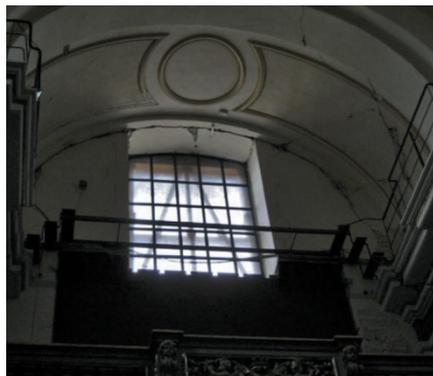
Il meccanismo di danno si presenta con lesioni pressoché verticali in prossimità dell'intersezione tra le pareti ortogonali.



Località San Gregorio (AQ)_ 2009



L'Aquila_ 2009



L'Aquila_ 2009
Chiesa Santa Maria del Suffragio
Netto distacco tra parete e volta a botte

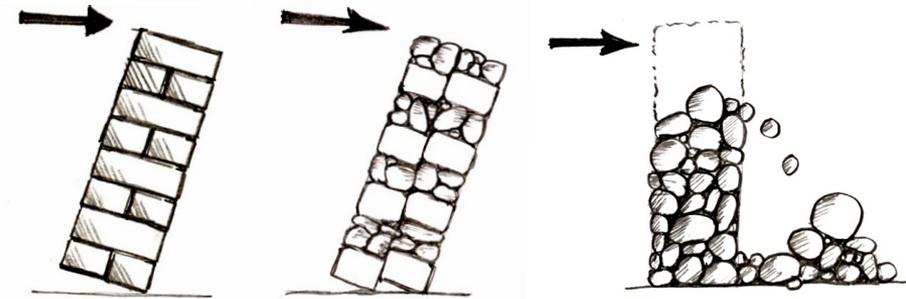


Mirandola (MO)_ 2012



Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno



RIBALTAMENTO SEMPLICE

parete a sacco



Situazione molto frequente nelle costruzioni storiche

parete NON monolitica

non può essere analizzata come una parete monolitica

↓
costituita da tre "parti" ben distinte

↓
non può essere analizzata però neanche come una parete a doppia cortina

↓
sacco interno costituito da materiale incoerente (spesso ciottoli e/o spezzoni di laterizio).

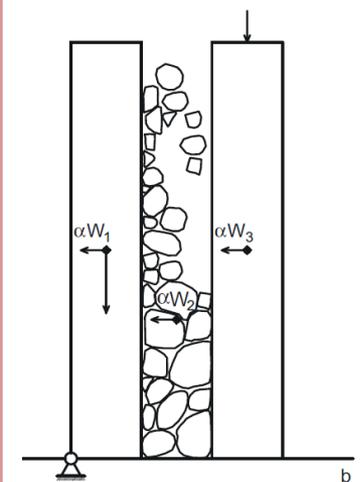
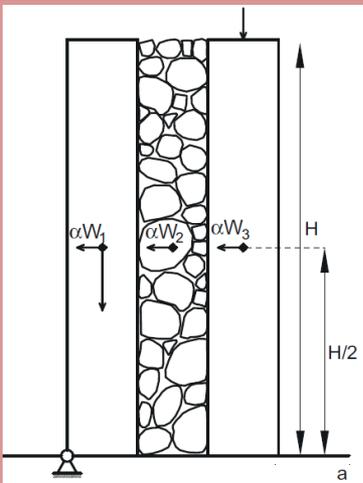
È plausibile considerare la sola cortina esterna come ribaltante



- il sacco interno non è in grado di assumere alcun comportamento monolitico
- nella pratica costruttiva i solai poggiavano solitamente sulla sola cortina interna

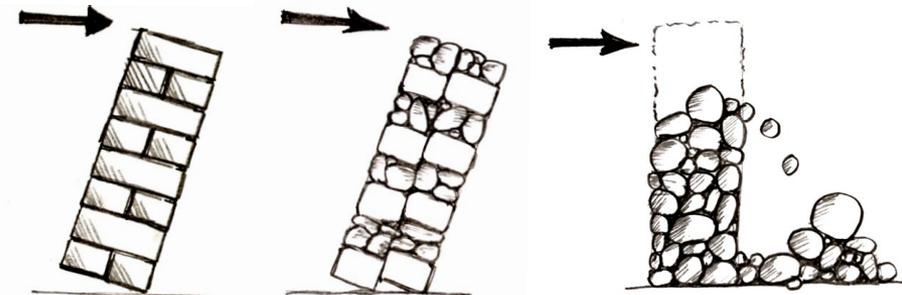


Si può assumere come azione stabilizzante il solo peso proprio della cortina esterna, mentre il sacco interno e la cortina interna contribuiscono al cinematismo solo come azioni ribaltanti.



Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

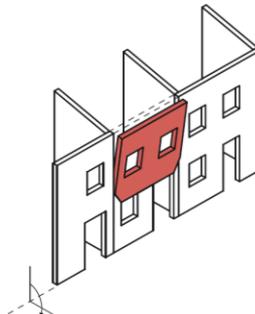


RIBALTAMENTO SEMPLICE. PARZIALE

Il meccanismo è influenzato da:

- assenza di vincoli in sommità;
- presenza di vincoli di interpiano;
- inefficace ammorsamento tra le pareti ortogonali;
- aperture troppo vicine all'intersezione tra le pareti ortogonali;
- presenza di coperture spingenti;
- presenza di corpi addossati;

Il meccanismo di danno si presenta con lesioni pressoché verticali in prossimità dell'intersezione tra le pareti ortogonali.



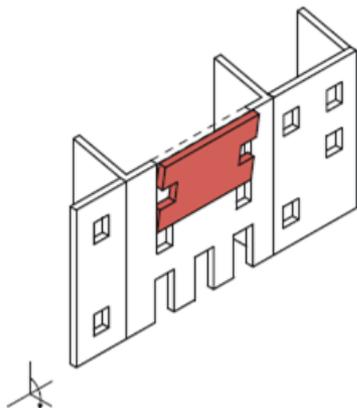
Località San Gregorio (AQ) _ 2009



Novi (MO) _ 2012



Paganica (AQ) _ 2009



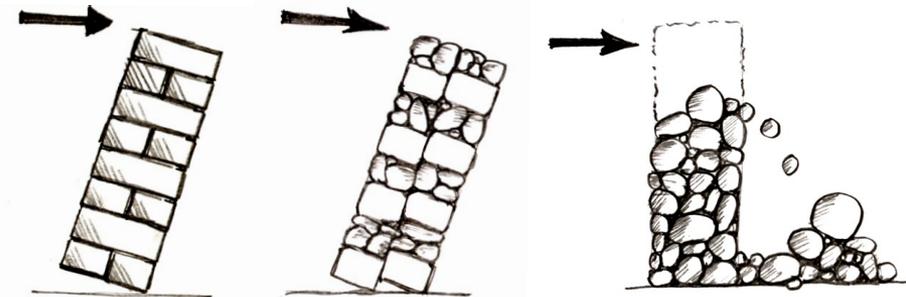
Paganica (AQ) _ 2009



Buonacompria (MO) _ 2012

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

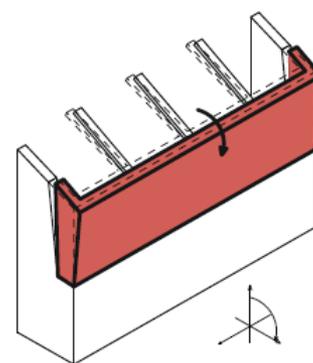


RIBALTAMENTO SEMPLICE. PARZIALE

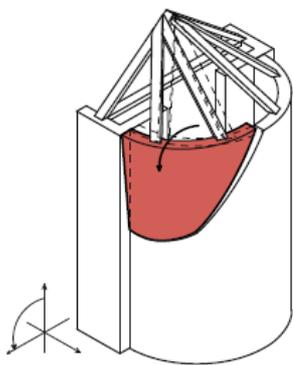
Il meccanismo è influenzato da:

- assenza di vincoli in sommità;
- presenza di vincoli di interpiano;
- inefficace ammorsamento tra le pareti ortogonali;
- aperture troppo vicine all'intersezione tra le pareti ortogonali;
- presenza di coperture spingenti;
- presenza di corpi addossati;

Il meccanismo di danno si presenta con lesioni pressoché verticali in prossimità dell'intersezione tra le pareti ortogonali.



Mirandola (MO) _ 2012



Buonacpra (MO) _ 2012



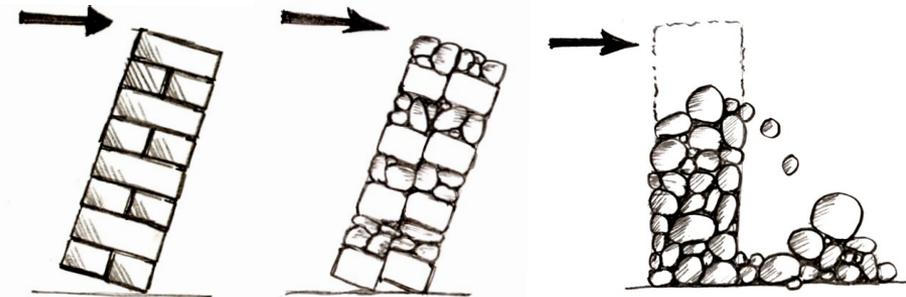
Novi (MO) _ 2012



Buonacpra (MO) _ 2012

Parte prima – Murature storiche e sisma

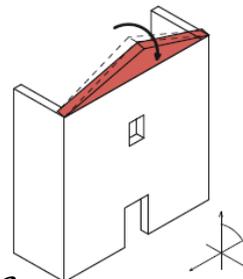
- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno



RIBALTAMENTO SEMPLICE: TIMPANO

Il meccanismo è influenzato da:

- assenza di vincoli in sommità;
- discontinuità con la muratura sottostante;
- riduzione dello spessore tra il timpano e il resto della facciata.



Mirabello (FE)_ 2012



Mirandola (MO)_ 2012



Mirandola (MO)_ 2012

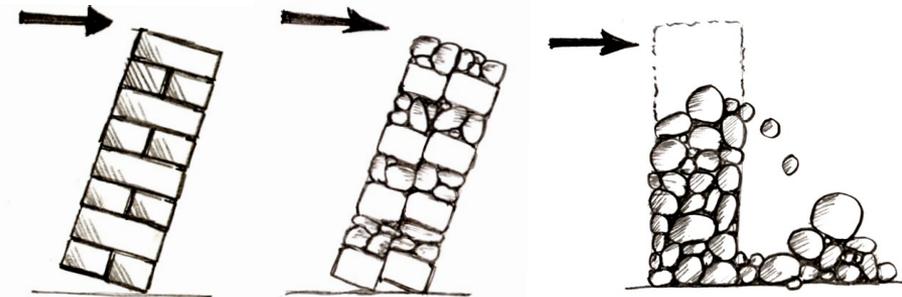


Disetro (MO)_ 2012

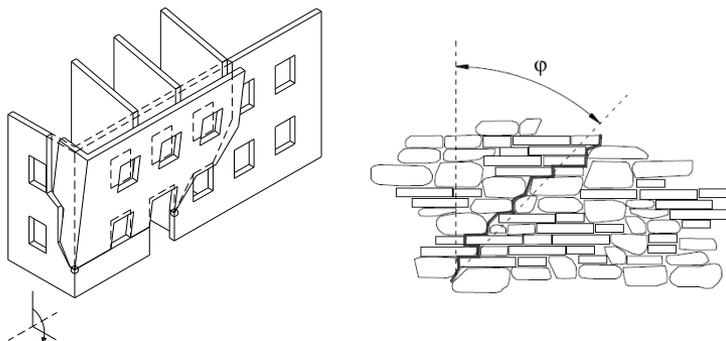
L'immagine mostra anche l'innescò del ribaltamento semplice globale della facciata con una lesione pressoché verticale all'intersezione tra la facciata stessa e la parete ortogonale

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno



RIBALTAMENTO COMPOSTO



Il meccanismo è influenzato da:

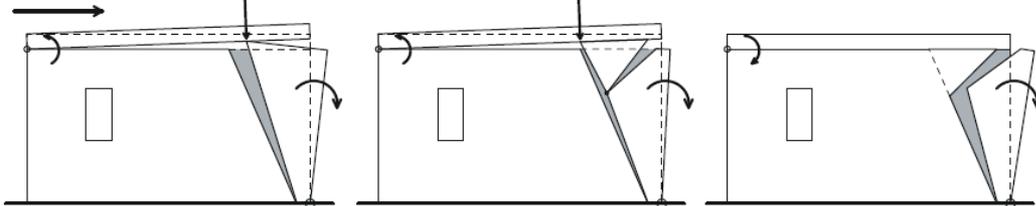
- elevata snellezza paramento murario
- inefficace collegamento strutture orizzontali
- mancanza di presidi in sommità
- buon ammorsamento alle pareti di spina

La geometria del cuneo è funzione di:

- dimensione e posizione delle aperture
- qualità della muratura

Come influisce la presenza di solai e coperture rigide

Azione sismica



a) fase 1

b) fase 2

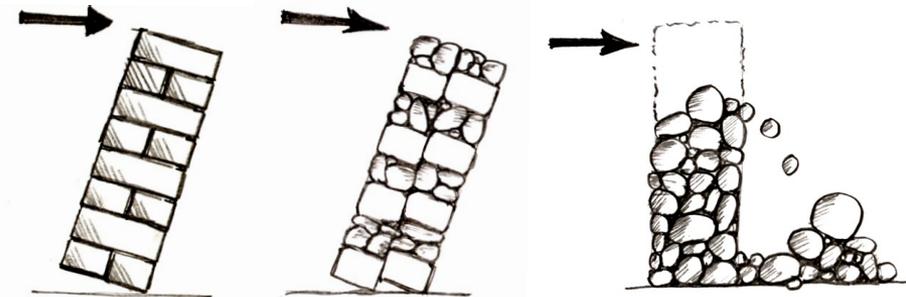
c) fase 3

A causa dell'elevata rigidità di tali strutture, il cuneo, che tende a sollevarsi in modo canonico (FASE 1), viene impedito nel suo movimento rotazionale e va incontro a una seconda fessurazione dovuta alla concentrazione degli sforzi che si viene a creare tra cuneo e cordolo (FASE 2), con un possibile conseguente effetto di "martellamento verticale" (colpo di frusta) sulla sommità della parete con la formazione di un cuneo a doppia diagonale (FASE 3).



Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

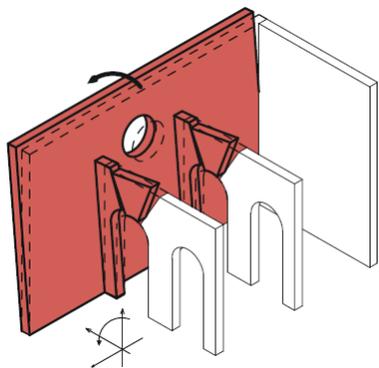
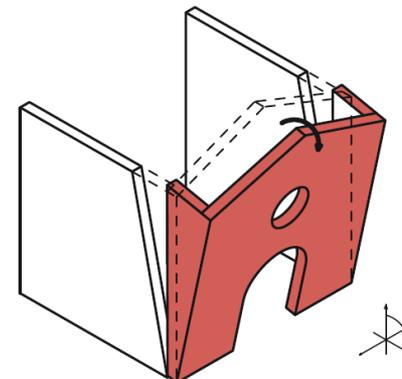


RIBALTAMENTO COMPOSTO. GLOBALE

Il meccanismo è influenzato da:

- assenza di vincoli in sommità;
- efficace ammorsamento tra le pareti ortogonali;
- presenza di aperture troppo vicine all'intersezione tra le pareti ortogonali;
- presenza di spinte non contrastate di archi e/o volte.

Il meccanismo di danno si presenta con lesioni oblique in prossimità dell'intersezione tra le pareti ortogonali.



L'Aquila_ 2009



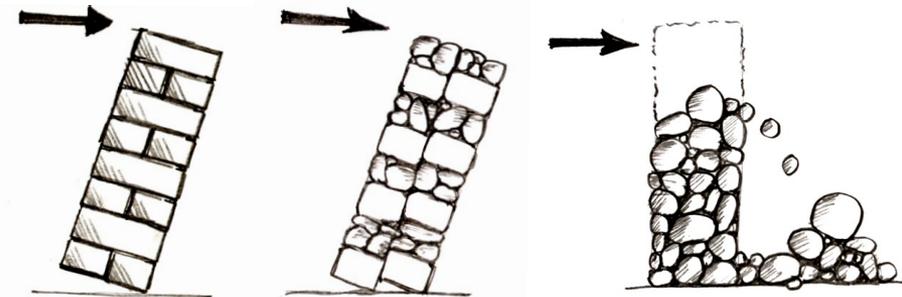
Località San Gregorio (AQ)_ 2009



Paganica (AQ)_ 2009

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

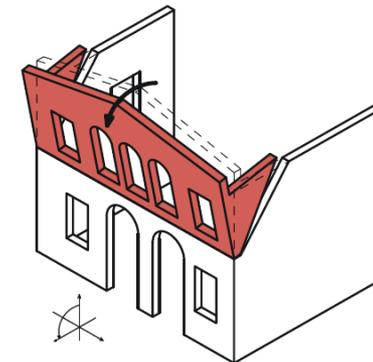


RIBALTAMENTO COMPOSTO. PARZIALE

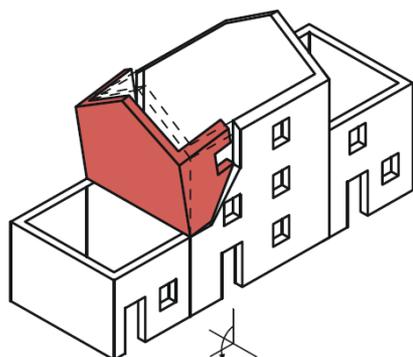
Il meccanismo è influenzato da:

- assenza di vincoli in sommità;
- presenza di vincoli di interpiano;
- presenza di corpi addossati;
- efficace ammorsamento tra le pareti ortogonali;
- presenza di aperture troppo vicine all'intersezione tra le pareti ortogonali.

Il meccanismo di danno si presenta con lesioni oblique in prossimità dell'intersezione tra le pareti ortogonali.



L'Aquila_ 2009

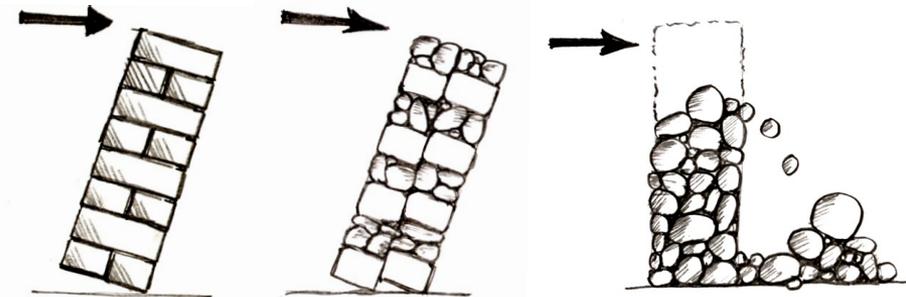


Località San Gregorio (AQ)_ 2009

Il meccanismo è influenzato dalla presenza di corpi addossati alla parete di testata; condizioni di ammorsamento fra parete di testata e quelle a essa ortogonali; vicinanza di aperture alla zona d'angolo (influenza la dimensione del cuneo di distacco)

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

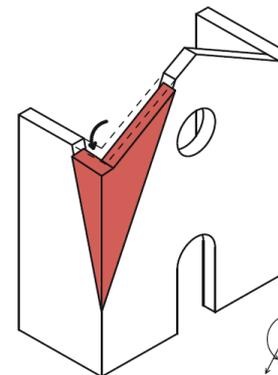


RIBALTAMENTO CANTONALE

Il meccanismo è influenzato da:

- presenza di puntoni diagonali spingenti in copertura.

Il meccanismo di danno si presenta all'intersezione tra due pareti ortogonali con lesioni oblique convergenti nella parte bassa dell'angolata.



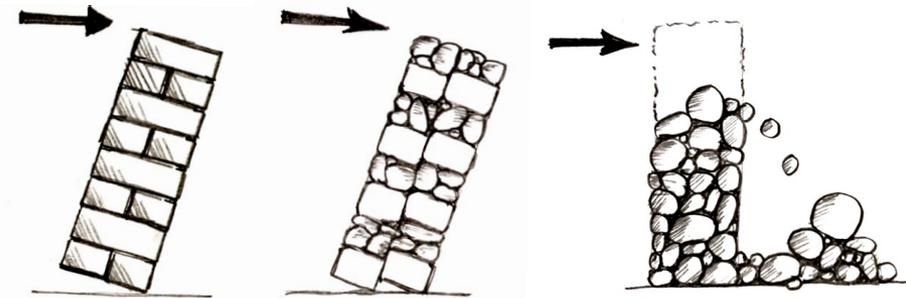
L'Aquila_2009



L'Aquila_2009

Parte prima – Murature storiche e sisma

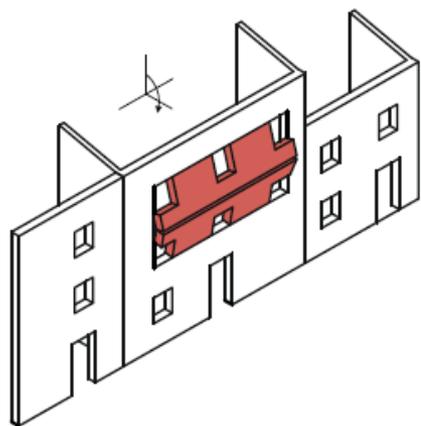
- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno



FLESSIONE VERTICALE

Il meccanismo è influenzato da:

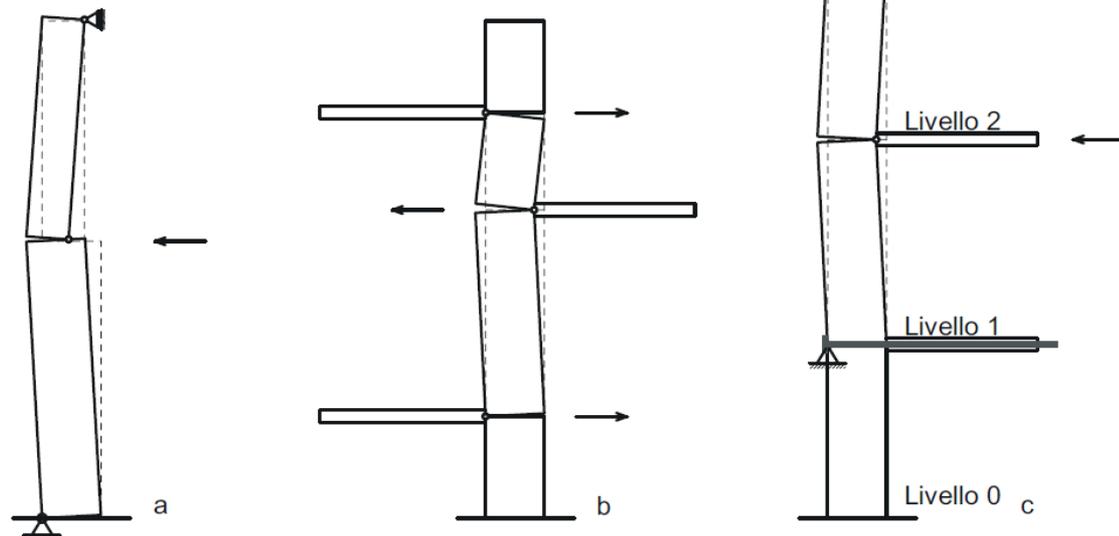
- presenza di vincoli sommitali (ad esempio cordolature perimetrali);
- assenza di collegamento tra parete e solaio di interpiano.



in pareti con indebolimento della sezione muraria

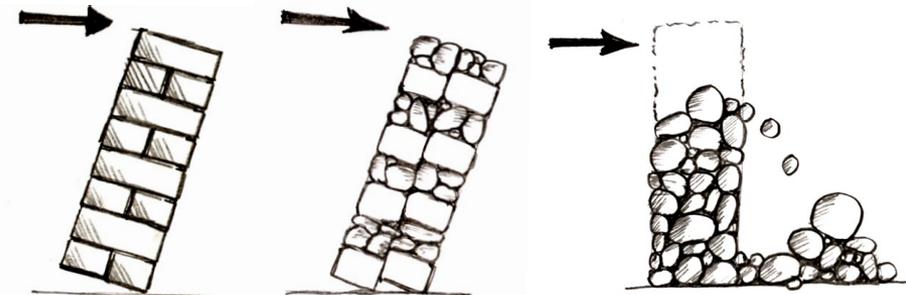
in corrispondenza di solai sfalsati (oscillazione in controfase dei solai)

cinematismo coinvolgente due livelli su tre dell'edificio



Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

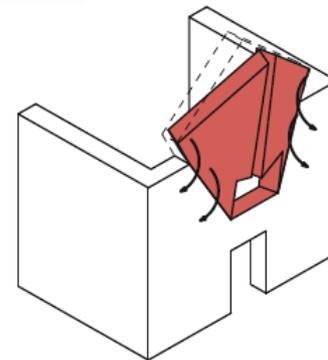


FLESSIONE ORIZZONTALE

Il meccanismo è influenzato da:

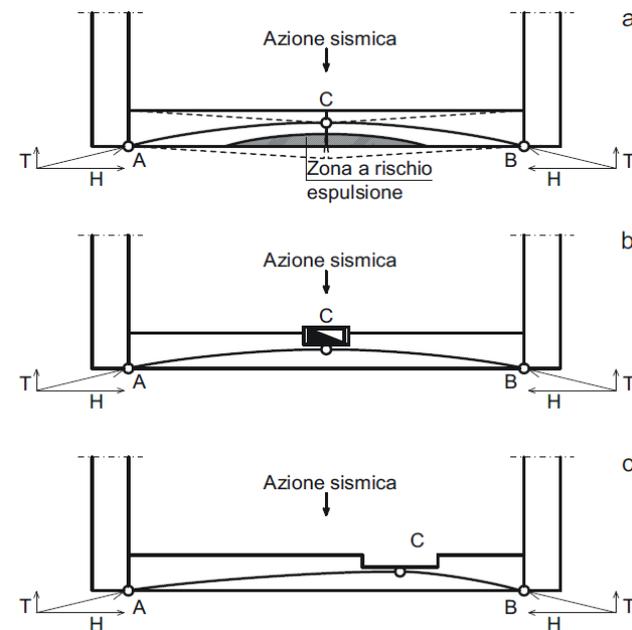
- parete libera in sommità;
- elevata distanza tra le pareti ortogonali;
- presenza di aperture, anche tamponate, nella parte centrale della facciata (indebolimenti).

Il meccanismo di danno si presenta con due lesioni verticali o oblique che tendono a convergere nella parte inferiore (nel caso di una finestrata) o superiore (nel caso del portone di ingresso) delle aperture.



Non confinata

- Assenza di vincolo efficace in sommità
- Presenza di presidi / buon collegamento con le pareti di spina
- Elevata luce tra le pareti di spina



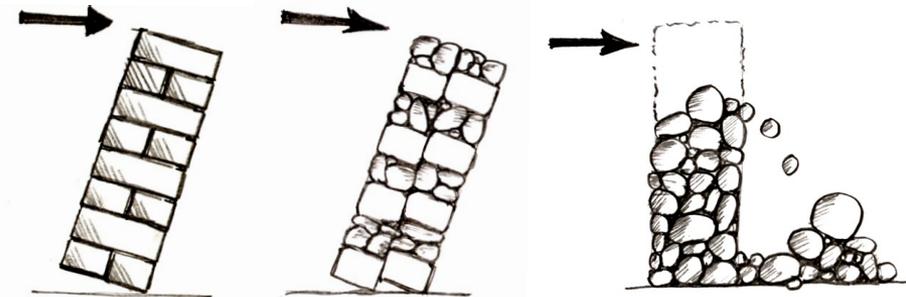
Novi di Modena (MO)_ 2012



Paganica (AQ)_ 2009

Parte prima – Murature storiche e sisma

- Introduzione
- Il percorso della conoscenza
- Macroelementi e meccanismi di danno

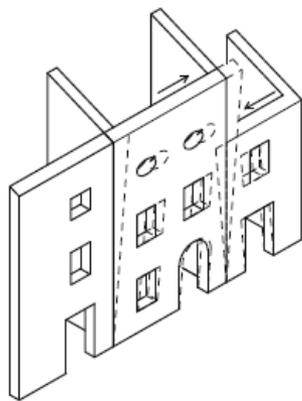
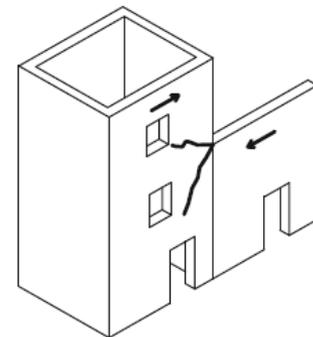


MECCANISMI NEL PIANO: LESIONI PER DISCONTINUITÀ ALTIMETRICA

Il meccanismo è influenzato dalla presenza di corpi adiacenti di diversa altezza. Il meccanismo di danno si presenta con una lesione inclinata (biella compressa) e una zona disgregata causata dal martellamento reciproco dei due corpi.



L'Aquila_ 2009



Paganica (AQ)_ 2009



L'Aquila_ 2009

Parte seconda – Metodi di conoscenza e verifica. Progettazione degli interventi a contrasto dei meccanismi di danno

- Valutazione della sicurezza di edifici esistenti in muratura
- La progettazione degli interventi
- Strutture particolari: archi e volte

→ **Analisi cinematica lineare**

Calcolo del **moltiplicatore orizzontale dei carichi α_0**

$$\alpha_0 \sum_{i=1}^n P_i u_i + \alpha_0 \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j u_j + \sum_{i=1}^n P_i v_i + \sum_{k=1}^o F_{ko} u_k + \sum_{k=1}^o F_{kv} v_k = 0$$

L'azione verticale P_{C3} "scarica" sulla parte stabile della struttura (cioè su quella non interessata dal meccanismo)

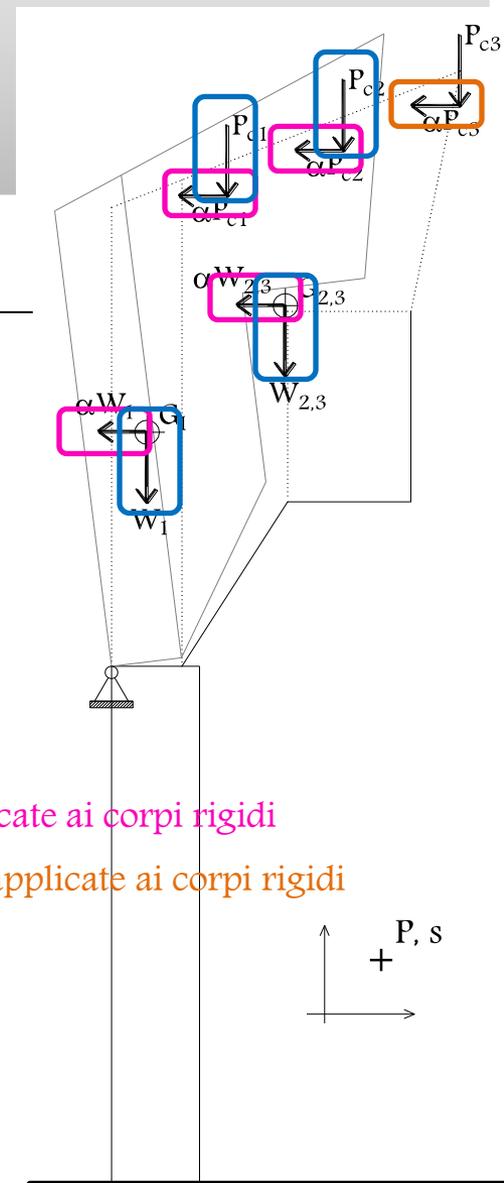
Lavoro svolto dalle azioni orizzontali dovute al sisma, relative alle masse direttamente applicate ai corpi rigidi

Lavoro svolto dalle azioni orizzontali dovute al sisma, relative alle masse non direttamente applicate ai corpi rigidi

Lavoro svolto dalle azioni verticali, relative alle masse direttamente applicate ai corpi rigidi

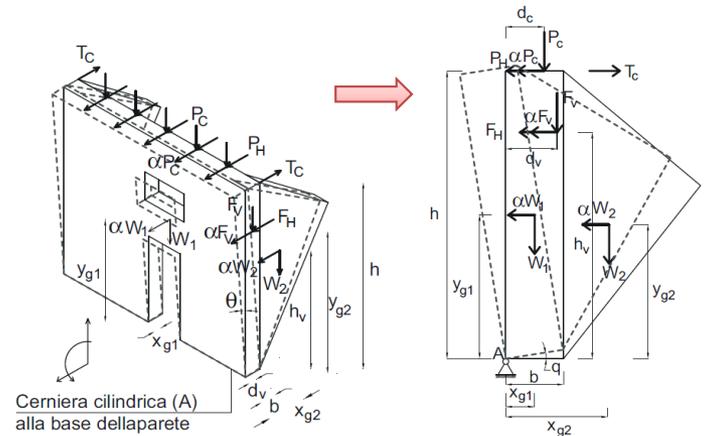
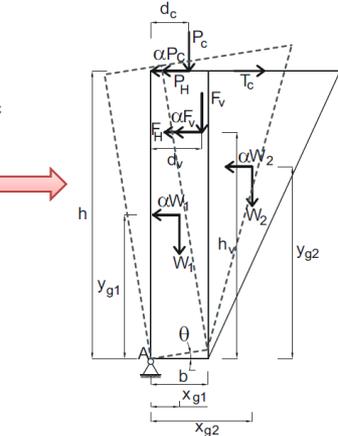
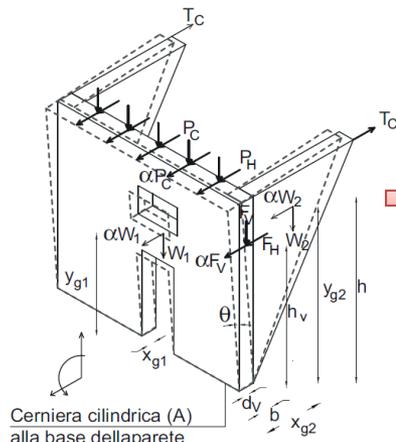
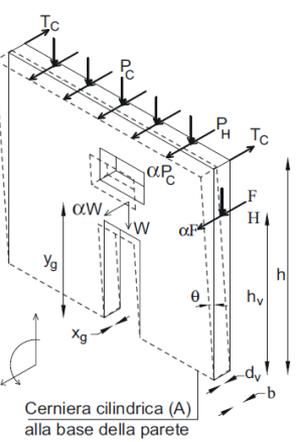
Lavoro svolto dalle azioni orizzontali dovute alle spinte statiche

Lavoro svolto dalle azioni verticali dovute, ad esempio, a cavi pretesi o post-tesi

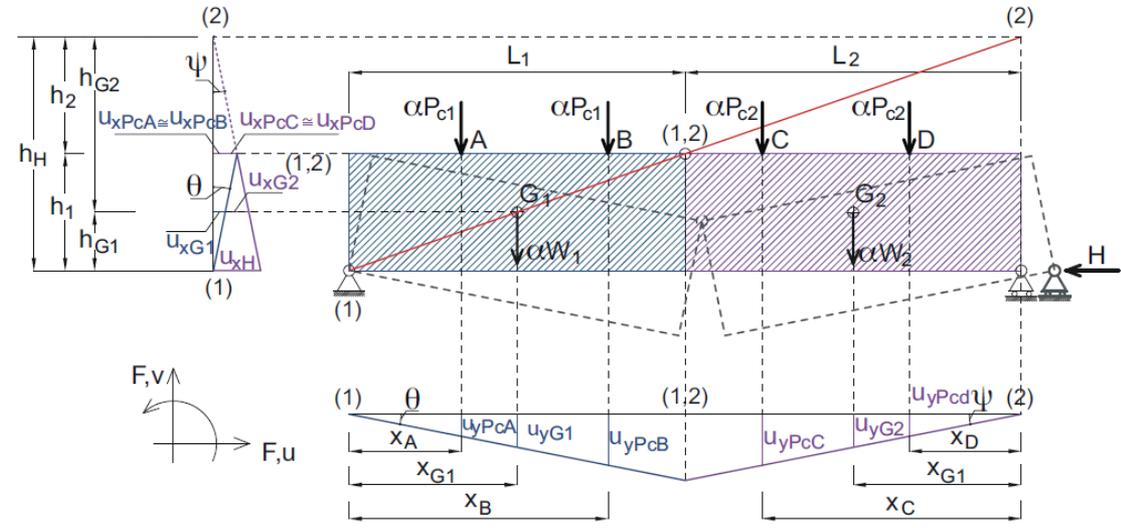
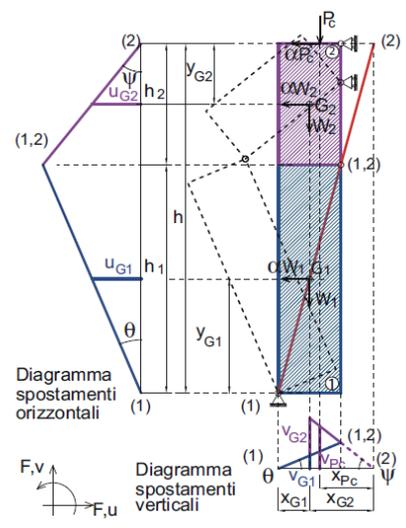


Parte seconda – Metodi di conoscenza e verifica. Progettazione degli interventi a contrasto dei meccanismi di danno

- Valutazione della sicurezza di edifici esistenti in muratura
- La progettazione degli interventi
- Strutture particolari: archi e volte

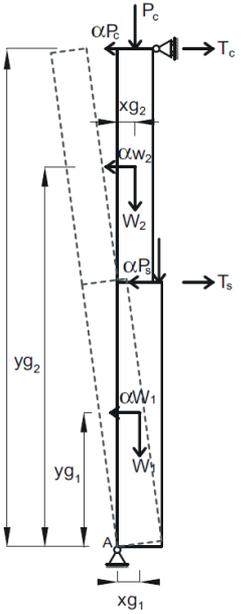
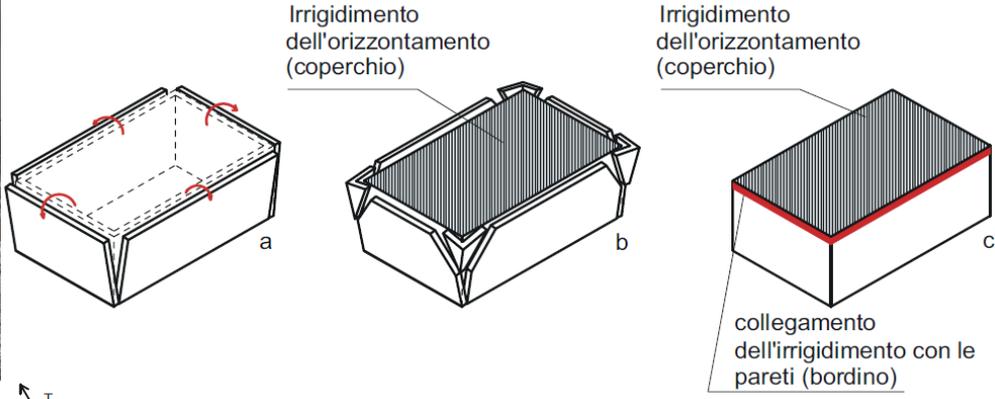


Valutazione dei cinematismi di collasso effettuata con l'ausilio delle catene cinematiche

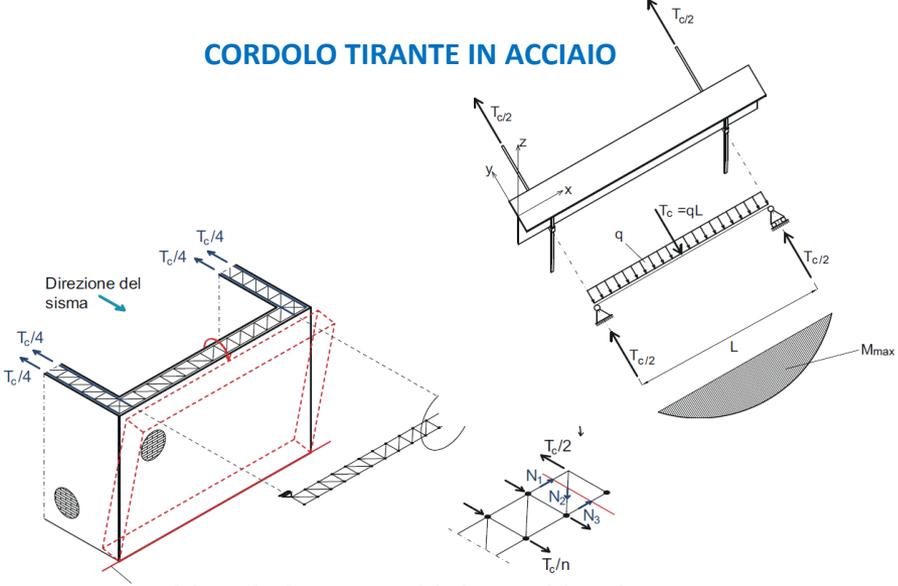


Parte seconda – Metodi di conoscenza e verifica. Progettazione degli interventi a contrasto dei meccanismi di danno

- Valutazione della sicurezza di edifici esistenti in muratura
- La progettazione degli interventi
- Strutture particolari: archi e volte



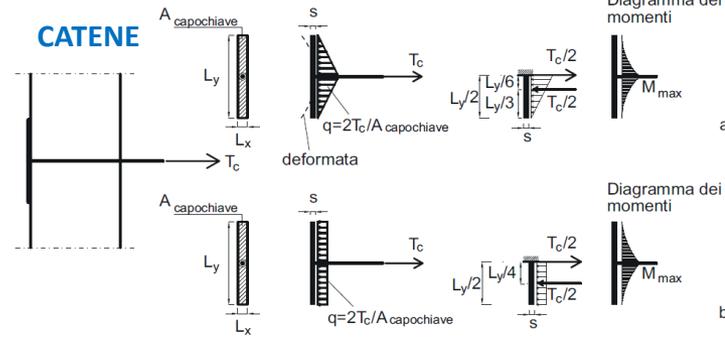
CORDOLO TIRANTE IN ACCIAIO



CORDOLO A TRALICCIO IN ACCIAIO

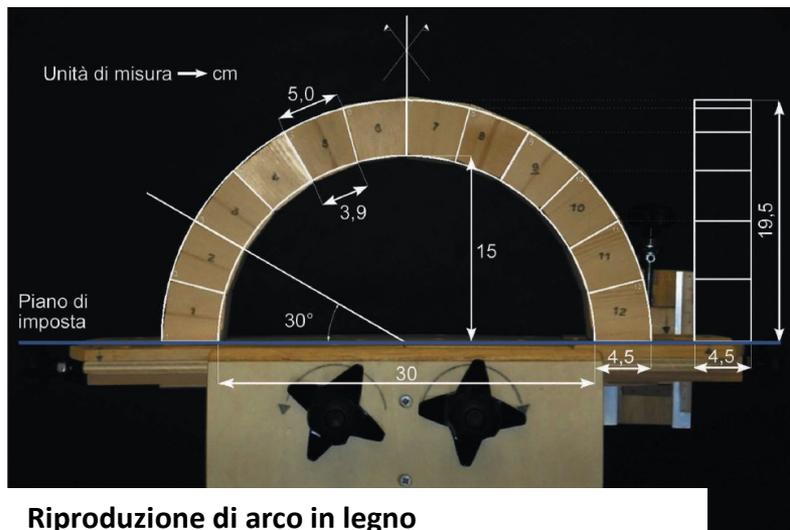
cerniera cilindrica

CATENE

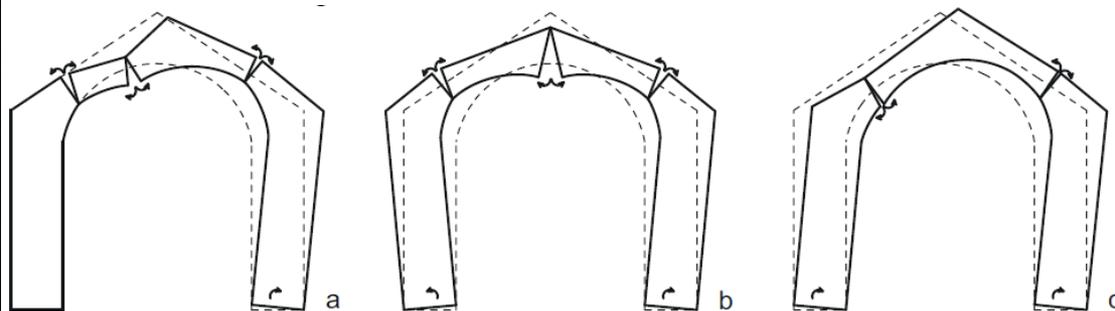


Parte seconda – Metodi di conoscenza e verifica. Progettazione degli interventi a contrasto dei meccanismi di danno

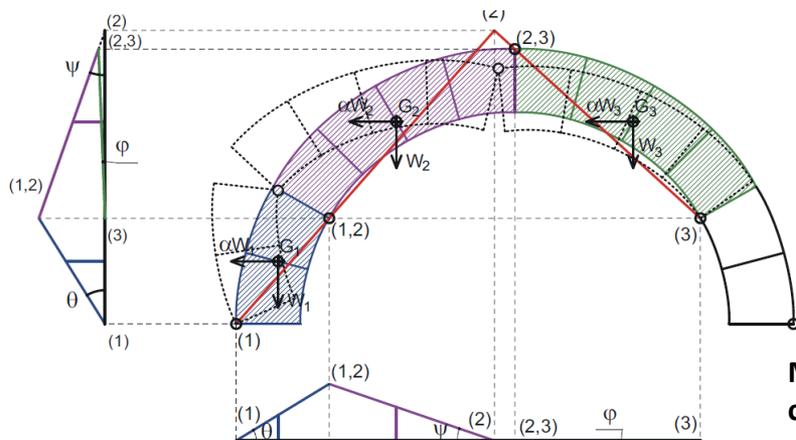
- Valutazione della sicurezza di edifici esistenti in muratura
- La progettazione degli interventi
- Strutture particolari: archi e volte



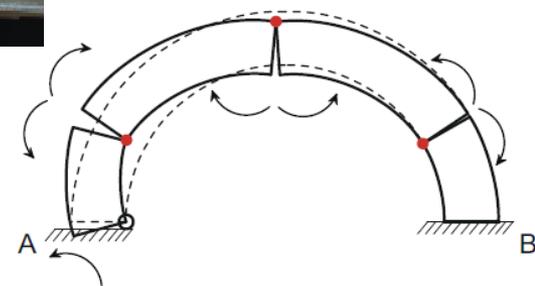
Riproduzione di arco in legno per individuare la posizione delle cerniere



Riproduzione meccanismo



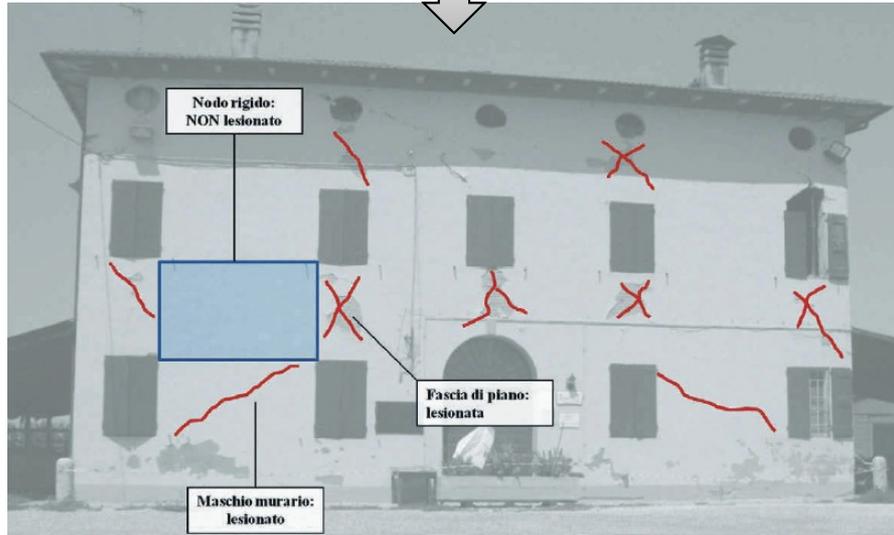
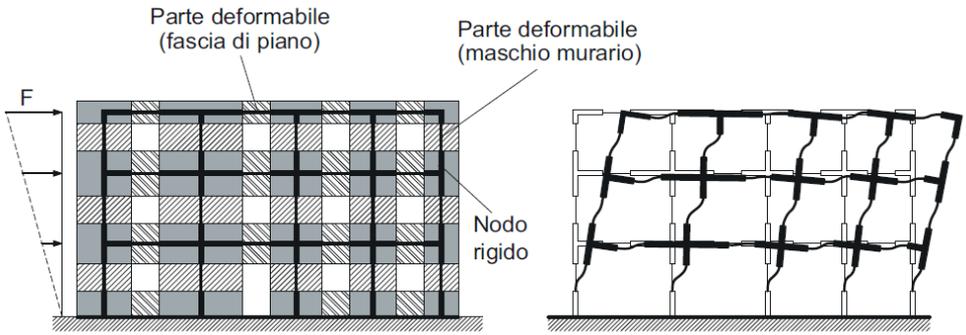
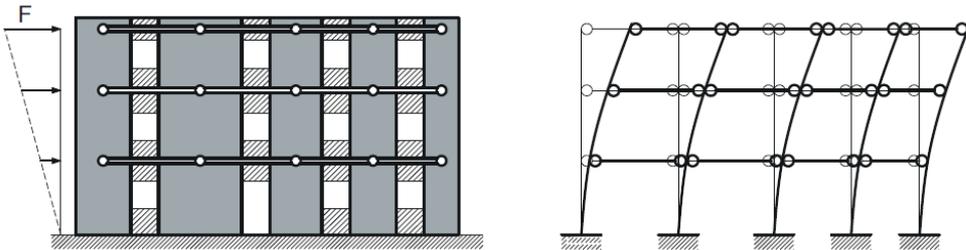
Modellazione per analisi cinematica



Schematizzazione

Parte terza – Analisi sismica globale

→ Introduzione all'analisi



Parte quarta – Esempi applicativi

- Caso di studio 1: edificio in località San Felice sul Panaro (MO)
- Caso di studio 2: edificio in località Cento (FE)
- Caso di studio 3: edificio in località Cento (FE)
- Altri esempi di meccanismi di primo modo
- Altri esempi di dimensionamento interventi

