

INAIL – CONSULENZA TECNICA PER L'EDILIZIA  
XIV CONVEGNO  
Tivoli, 11 dicembre 2009

## **LA SICUREZZA ANTISISMICA IN EDILIZIA**

Francesco Pugi

# **LA METODOLOGIA DELLE VERIFICHE STRUTTURALI SUGLI EDIFICI**

Gli edifici in muratura

**ESECUZIONE DELLE VERIFICHE**  
nel rispetto della nuova Normativa tecnica:  
D.M.14.1.2008 e Circolare applicativa n.617 del 2.2.2009

## EDIFICI NUOVI / EDIFICI ESISTENTI

### Aspetti comuni:

→ Creazione del **modello matematico** dell'edificio

→ **Metodologia di analisi** strutturale:

analisi statica non sismica

analisi sismica lineare (statica o dinamica modale)

analisi sismica statica non lineare

→ **Esecuzione delle verifiche strutturali**, nel rispetto del D.M.14.1.2008 e Circolare n.617 del 2.2.2009, e di altre istruzioni applicative correlate (es.: OPCM per la Ricostruzione)

## **Aspetti distinti:**

riguardano l'obiettivo della progettazione

### **→ per gli edifici nuovi:**

rispettare la richiesta sismica per l'edificio relativa al sito di ubicazione.

Se le verifiche non sono soddisfatte, occorre modificare il progetto strutturale e rieseguire il percorso di analisi e verifica

### **→ per gli edifici esistenti:**

l'obiettivo può essere quello di fotografare la capacità antisismica dell'edificio allo Stato Attuale (nel caso di edifici lesionati dal sisma, si fa riferimento allo Stato precedente l'evento): in tal caso, si esegue una

**Analisi di Vulnerabilità Sismica**, che consentirà di conoscere la sicurezza sismica dell'edificio

→ oppure si deve percorrere un **processo di progettazione degli interventi di consolidamento**: in tal caso la metodologia di verifica si distingue a seconda del tipo di intervento

→ **Intervento di miglioramento sismico**: occorre dimostrare che allo Stato di Progetto (cioè dopo l'esecuzione degli interventi di consolidamento) l'edificio presenta una capacità antisismica migliore rispetto allo Stato Attuale (nel caso di edifici lesionati dal sisma, si fa riferimento allo Stato precedente l'evento), ma può non soddisfare i requisiti normativi relativi ai nuovi edifici; in altre parole può sostenere un'accelerazione inferiore a quella prevista dalla Norma per i nuovi edifici

→ **Intervento di adeguamento sismico:** l'edificio deve sostenere un'accelerazione sismica non inferiore a quella di progetto secondo Norma e inoltre prevede l'utilizzo di una ulteriore particolare analisi, di fondamentale importanza:

**analisi cinematica, o: analisi dei meccanismi di collasso**

*Osservazione:* nel modello matematico, **eseguire gli interventi significa attribuire alle pareti parametri modificati** (ad esempio sulle resistenze, sulle geometrie, sui moduli di elasticità, sulla capacità deformativa, sulla rigidezza) che determineranno ovviamente una modifica nel risultato finale del calcolo

## ANALISI CINEMATICA: MECCANISMI DI COLLASSO

- Sono **meccanismi di corpo rigido**, che consistono nella verifica di stabilità degli elementi murari, compresi i ribaltamenti fuori dal piano delle pareti
- Consentono di cautelarsi nei confronti dei **distacchi di porzioni della struttura** che possono crollare rigidamente, senza chiamare in causa la resistenza dei materiali
- E' in questo ambito che si valuta l'effetto di **spinte da coperture o da volte**, e si dimensionano **catene**, rafforzamento degli spessori, fasciature in fibre, e più in generale i presidi che svolgono azione stabilizzante e consentono all'edificio il comportamento d'insieme, cioè la formazione di una '**scatola strutturale**'

→ Senza il presupposto dello studio dei meccanismi di collasso, ogni analisi e verifica condotta con modelli 3D elastici e ultra-elastici ha **valore puramente ideale** e non corrisponde all'effettivo comportamento sismico dell'edificio esistente

## Come si esegue la verifica?

Dati la geometria, ed i carichi agenti, si determina per via analitica il **moltiplicatore di collasso**, cioè il rapporto tra la forza sismica ed il carico verticale, che viene direttamente correlato all'accelerazione al suolo (PGA) sostenibile: si tratta dell'accelerazione al di sopra della quale la parete non è più stabile, con formazione del cinematismo di collasso, cioè di un numero di sconnessioni (cerniere) tali da far crollare la parete.

Il meccanismo è rigido-fragile: e quindi passa improvvisamente dalla stabilità all'instabilità.

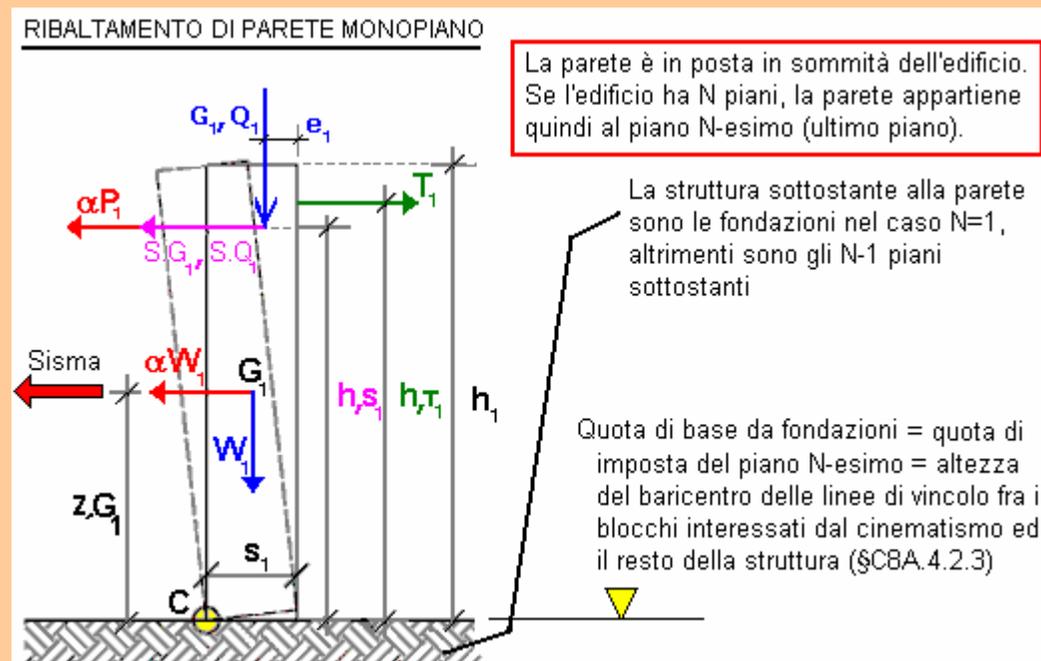


Figura 1. Meccanismi di collasso fuori piano evidenziati negli edifici non consolidati: a) crollo della facciata; b) espulsione del paramento; c) crollo dell'angolata.

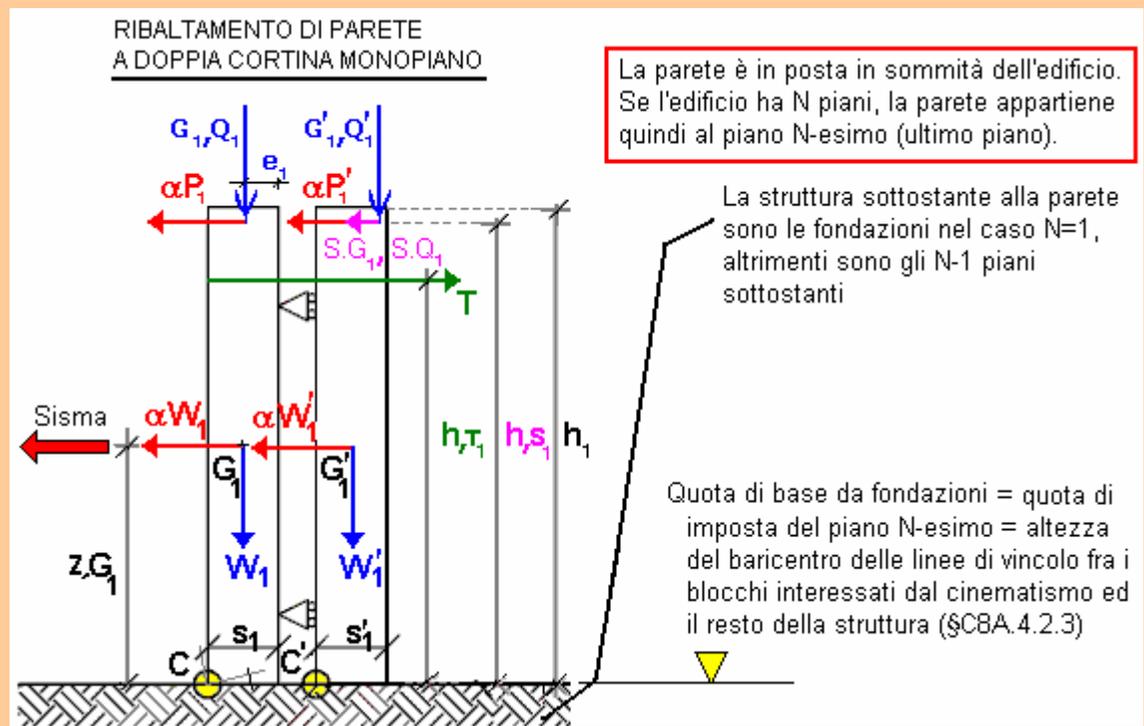
**Fig. 4.** *Meccanismi di collasso fuori piano (primo modo) [3].*

Nelle figure seguenti sono rappresentati alcuni casi di meccanismi di collasso semplici ma di grande importanza:

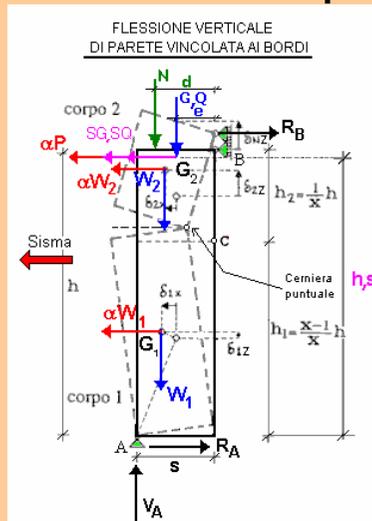
**Ribaltamento di una parete:** fondamentale per il dimensionamento dei **tiranti** che stabilizzano le pareti nei confronti del ribaltamento:



Molto importante è seguire la reale natura della parete:  
 una **muratura a sacco** deve essere studiata come parete  
 a doppia cortina, avente capacità antisismica ovviamente inferiore  
 rispetto a quella di una parete monolitica in tutto il suo spessore



# Flessione verticale di parete vincolata ai bordi. Nel caso di impalcati su piani sfalsati consente la valutazione del punzonamento del solaio che tende a dividere la parete di 'confine' fra due blocchi rigidi



La struttura è posta nella sommità dell'edificio, e può interessare la copertura (sommità della parete) e un solaio intermedio. In ogni caso, la Quota di base dalle fondazioni è la quota del vincolo A; N è il numero di piani dell'edificio.

In assenza del solaio intermedio (nel caso cioè in cui non vi sia carico da solaio), la parete è da considerarsi posta all'ultimo piano (piano N-esimo)

La sommità coincide con la copertura.

## Carico da solaio:

Componente verticale che genera azione sismica:  $P = G + \psi_2 Q$   
 Componente orizzontale (spinta) di origine statica:  $S_{tot} = SG + \psi_2 SQ$   
 Il punto di applicazione è definito da:  $h_s = \text{quota}$ ,  $e = \text{eccentricità}$

## Moltiplicatori di collasso:

si individua la posizione della cerniera C utilizzando il parametro adimensionale  $x$  definito dalle seguenti relazioni:

$$h_1 = \frac{(x-1)h}{x}, \quad h_2 = h/x, \quad h_1 + h_2 = h, \quad x = h/h_2$$

L'espressione del moltiplicatore di collasso viene ricavata nei due distinti casi in cui il carico da solaio sia sopra o sotto la cerniera. Variando la posizione della cerniera, cioè considerando valori di  $h_1$  compresi fra la base (0) e la sommità ( $h$ ), è così possibile definire la posizione cui corrisponde il moltiplicatore minimo.

**Caso  $h_s > h_1$ :**  $h' = h - h_s$

$$\alpha_0 (= \lambda) = \frac{2(x-1)(Nd + Pe - S_{tot}h') + 2s(W + N + P)}{(x-1)\left(\frac{Wh}{x} + 2Ph'\right)}$$

$$M^* = (\sum P_i d_i)^2 / \sum (P_i d_i)^2, \text{ con } P_i d_i \text{ dati da: } P h', W_2 h_1/2, W_1 h_1/2$$

**Caso  $h_s \leq h_1$ :**  $h' = h_s$

$$\alpha_0 (= \lambda) = \frac{2(x-1)(Nd) + 2s(W + N + P) + 2(Pe - S_{tot}h')}{(x-1)\left(\frac{Wh}{x} + 2Ph'\right)}$$

$$M^* = \frac{(\sum P_i d_i)^2}{g \sum (P_i d_i)^2}, \text{ con } P_i d_i \text{ dati da: } P h', W_2 h_1/2, W_1 h_1/2$$

Nel caso in cui non vi sia carico da solaio (è presente solo N, carico in sommità), le relazioni si semplificano, e si può calcolare direttamente il valore di  $x$ :

$$x = 1 + \sqrt{\frac{s(W+N)}{Nd}}$$

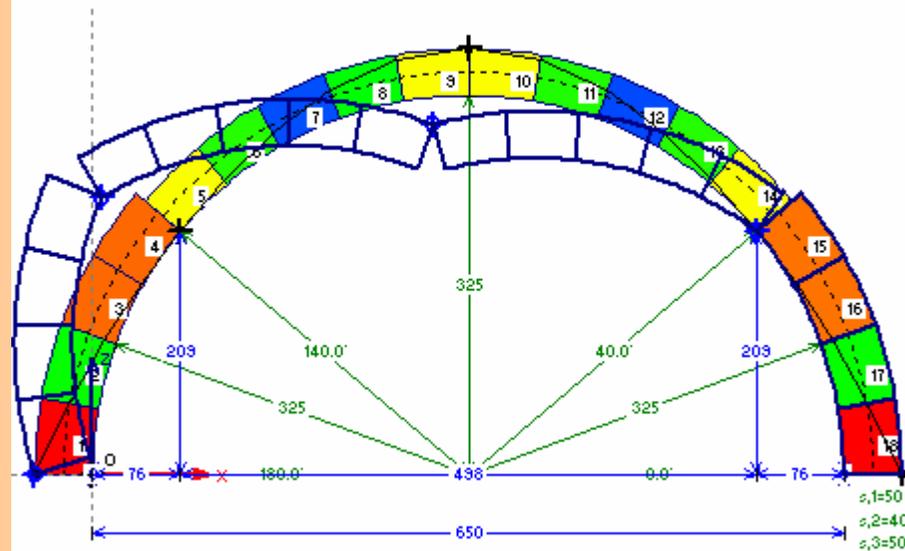
In ogni caso, le reazioni vincolari sono le seguenti:

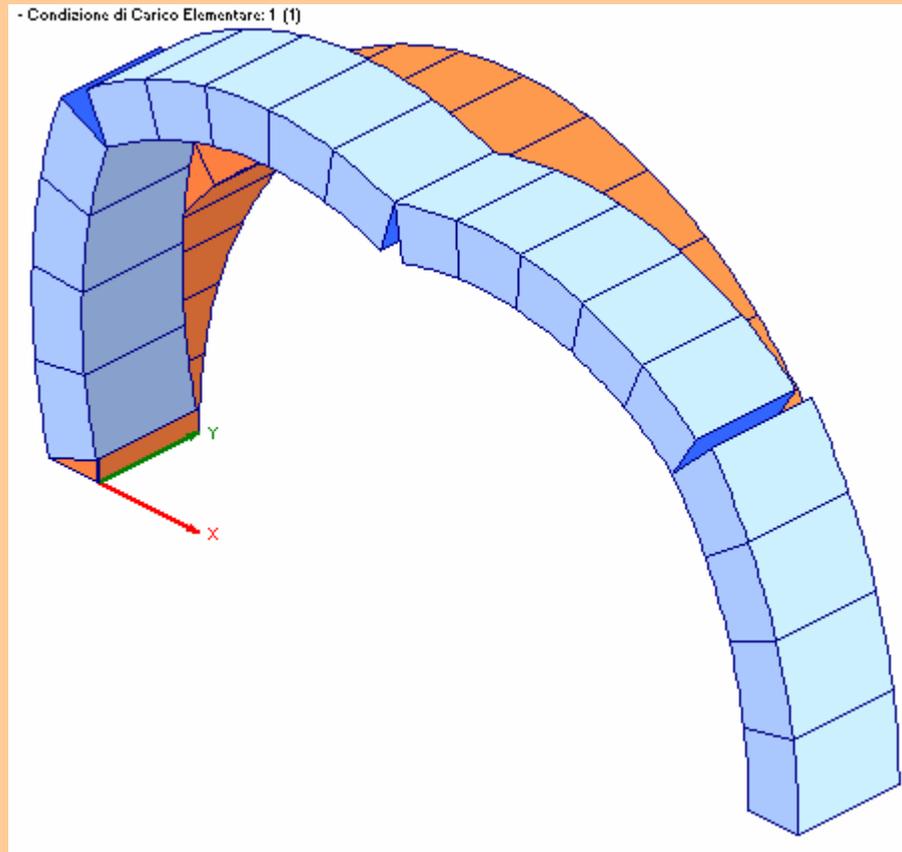
$$R_B = \lambda \left( \frac{W}{2} + P \frac{h_s}{h} \right) - \frac{[N(s-d) + Ws/2 + P(s-e) - S_{TOT}h_s]}{h}$$

$$R_A = \lambda(W+P) + S_{TOT}h_s - R_B, \quad V_A = W + N + P$$



- Curva delle Pressioni
- Combinazione di Condizioni di Carico (al Collasso): 1 (1); molt.coll.: 37.495
- Passo di iterazione: 6 (6)
- Trazione max mur. (kgf) = -44.254 (interf.: 19)





→ Anche in questo caso, si applicano **forze orizzontali progressivamente crescenti**. Nell'arco, a un certo livello di forze, si formano 3 cerniere, che segnano l'isostaticità dell'arco, e alla successiva quarta cerniera, che provoca il cinematismo: si individua così la PGA sostenibile.

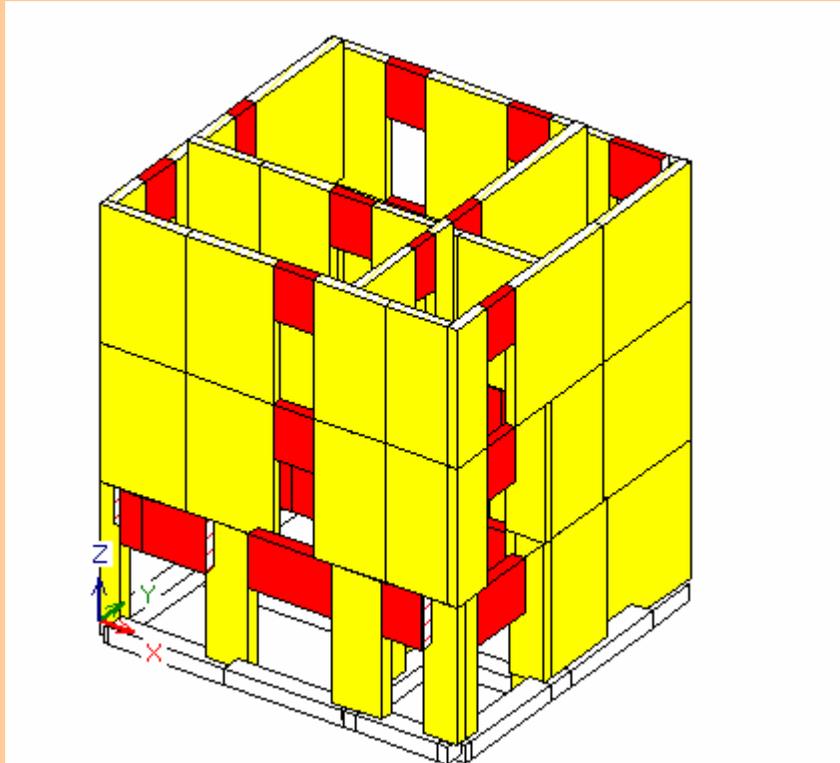
- In Analisi Cinematica è possibile anche tenere conto della **resistenza a compressione della muratura**, arretrando nel ribaltamento la cerniera rispetto allo spigolo esterno: questo consente l'uso di LC2, altrimenti occorre fare riferimento al livello di conoscenza LC1.
- Focalizziamo un concetto fondamentale: nella verifica dei meccanismi di collasso **non sono chiamati in causa moduli di elasticità e resistenze a taglio dei materiali**, cioè tutti quei parametri affetti necessariamente da un certo grado di approssimazione.

Per tale motivo, le **verifiche di stabilità** così condotte sono da ritenersi **molto attendibili**, cioè i risultati numerici fotografano in modo nitido la situazione reale.

## ANALISI GLOBALI

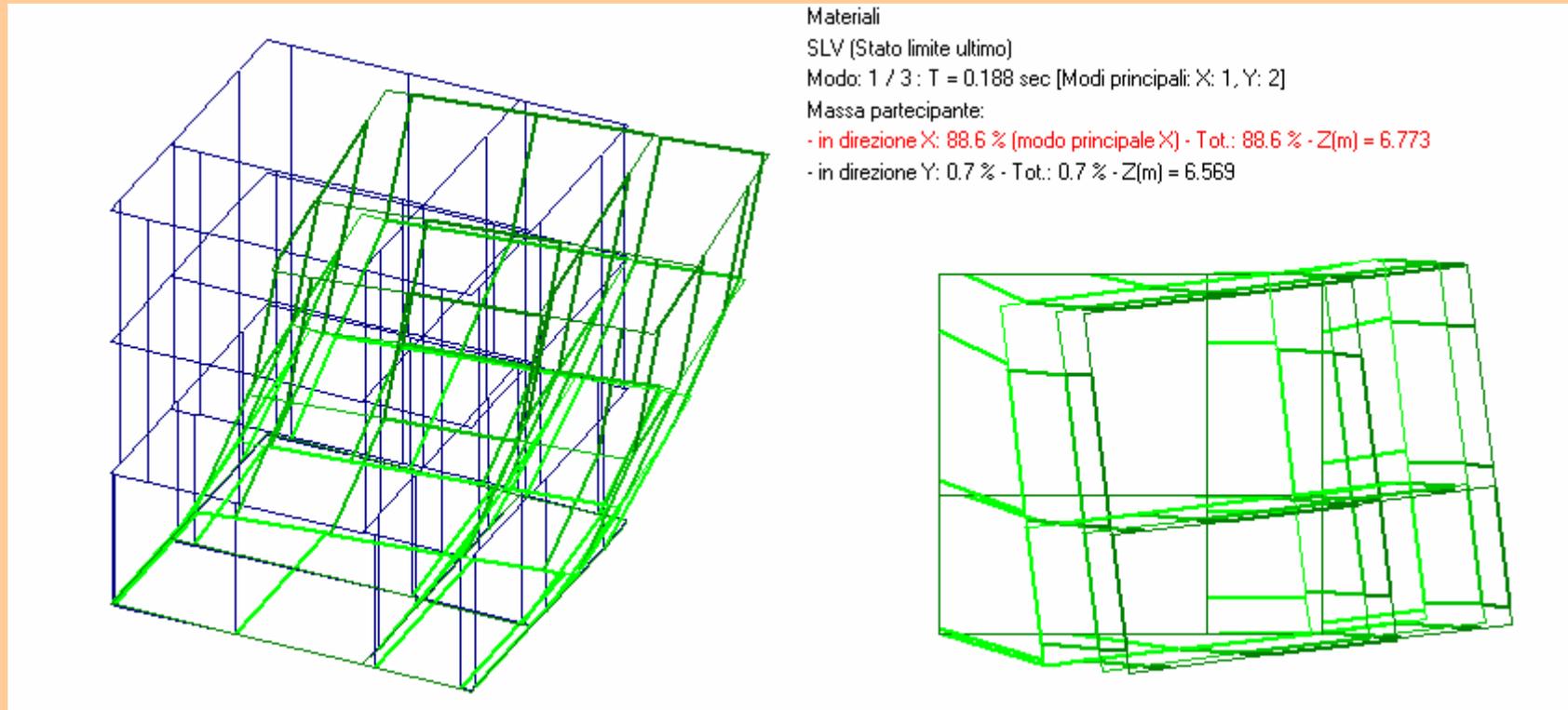
Meno nitida è la fotografia che si può scattare con le analisi globali, più complesse e fondate su molti parametri progettuali, alcuni dei quali possono essere solo ipotizzati.

Si faccia riferimento ad un edificio standard, in muratura esistente:



## → Piani Rigidi o Deformabili?

in figura, la differenza dei modi di vibrare di una struttura muraria nelle due ipotesi



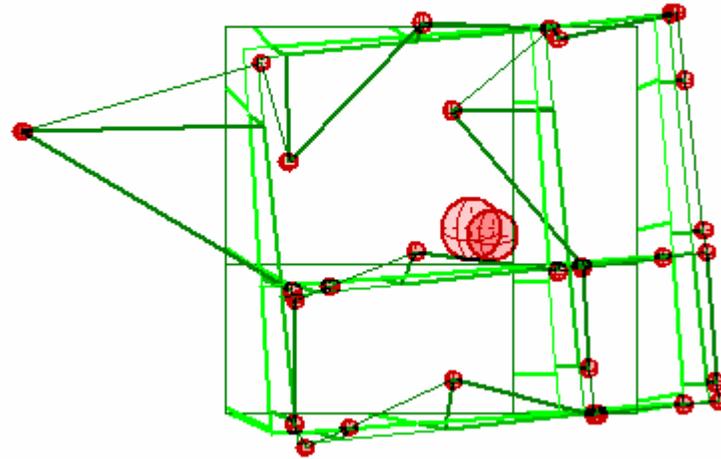
Si consideri un **piano deformabile in copertura**:  
all'ultimo piano si innescano modi locali, che coinvolgono solo alcune masse; il periodo principale in direzione X non cambia sostanzialmente (da 0.188 sec a 0.180) ma cambia la massa partecipante: 53% anziché 88%. In analisi dinamica modale si dovranno considerare più modi di vibrare, oltre a quello principale, per movimentare una percentuale significativa di massa.

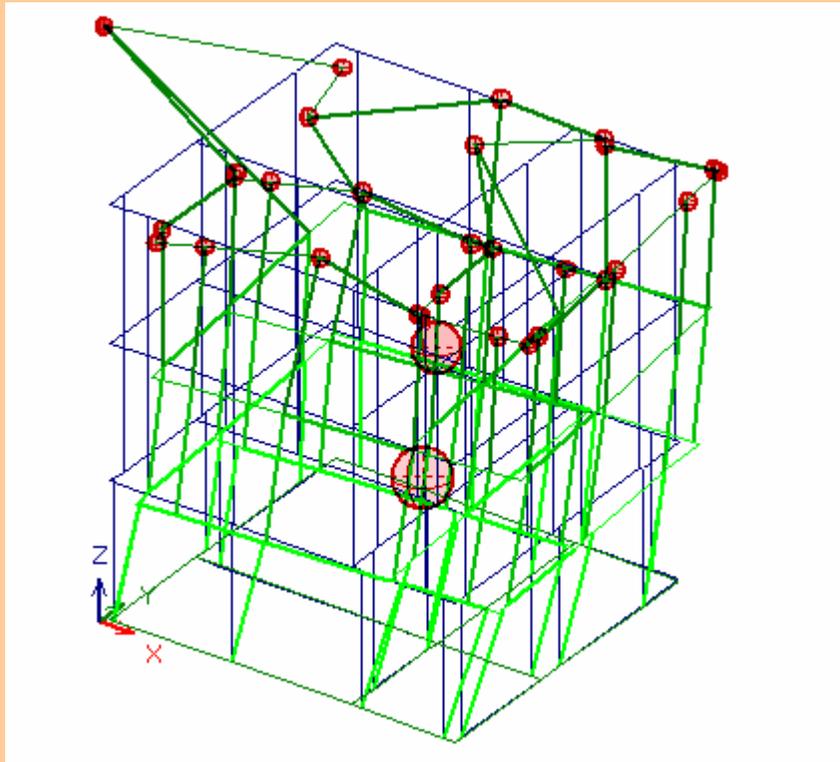
Modo: 6 / 7 : T = 0.180 sec [Modi principali: X: 6, Y: 7]

Massa partecipante:

- in direzione X: 53.1 % (modo principale X) - Tot.: 87.1 % - Z(m) = 6.810

- in direzione Y: 1.8 % - Tot.: 13.6 % - Z(m) = 7.292





Gli impalcati possono anche essere **parzialmente deformabili**: alcune campate di solaio possono essere rigide, altre no.

➔ **Parametri caratteristici della muratura:** pur eseguendo indagini, è possibile che siano noti solo approssimativamente o con riferimento a porzioni della struttura (e non alla sua globalità):

PC-E: Esempio\_Edificio\_Esistente\_Def (11/12/2009 - 7.10.00)

File Opzioni Finestra ?

Parametri di riferimento per Muratura Esistente

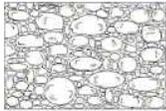
| N° | Tipo | Col. | Descrizione<br>[parametri meccanici in: kgf/cm <sup>2</sup> ]                      | f.m<br>min | f.m<br>med | f.m<br>ma |
|----|------|------|--|------------|------------|-----------|
| 1  | 1    |      | Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)         | 10.0       | 14.0       | 18        |
| 2  | 2    |      | Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno     | 20.0       | 25.0       | 30        |
| 3  | 3    |      | Muratura in pietre a spacco con buona tessitura                                    | 26.0       | 32.0       | 38        |
| 4  | 6    |      | Muratura in mattoni pieni e malta di calce   | 24.0       | 32.0       | 40        |
| 5  | 7    |      | Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es. doppio UNI foratura)       | 50.0       | 65.0       | 80        |
| 6  | 8    |      | Muratura in blocchi laterizi semipieni (%forat.<45%)                               | 40.0       | 50.0       | 60        |
| 7  | 9    |      | Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (%forat.<45%) | 30.0       | 35.0       | 40        |
| 8  | 10   |      | Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (45%<%forat.<65%)            | 15.0       | 17.5       | 20        |
| 9  | 11   |      | Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (forat.<45%)                         | 30.0       | 37.0       | 44        |
| 10 | 10   |      | Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (45%<%forat.<65%)            | 15.0       | 17.5       | 20        |
| 11 | 11   |      | Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (forat.<45%)                         | 30.0       | 37.0       | 44        |

Tipologie di Muratura Esistente

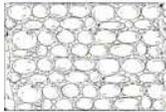
**TIPOLOGIE DI MURATURA**

**Muratura irregolare, in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)**  
Costituita prevalentemente da elementi con superficie liscia e forma arrotondata, o da ciottoli di fiume di piccoli e medie dimensioni; si presenta tanto con tessitura disordinata quanto ordinata.

Senza ricorsi

1.  2. 

Ciottoli con tessitura disordinata [Senise (PZ)]

3.  4. 

Ciottoli di varia natura con tessitura ordinata [Assisi]

Con ricorsi

5.  6. 

Ciottoli e mattoni [Sassuolo (MO)]

Versione 2010.01.2 Professionale Completa

- **Geometria della struttura:** il rilievo avrà evidenziato tutte le parti realmente strutturali? Possono esservi nicchie, vecchie aperture poi tamponate, zone della struttura inesplorabili...  
Il modello geometrico potrebbe non essere pienamente concorde con la realtà.
- Il modello matematico richiede **ipotesi sui vincolamenti** degli elementi strutturali, esterni e interni:



Non tutti gli elementi strutturali possono essere considerati uguali: alcune **pareti molto snelle** possono essere considerate non collaborative nei confronti dell'azione sismica e vengono degradate a bielle (portano carichi verticali e non orizzontali); se l'edificio è inserito in un **aggregato**, si pone il problema delle interazioni con le strutture adiacenti (non solo a livello di vincoli, ma anche di carichi); inoltre le **fondazioni** spesso nel calcolo vengono separate dalla sovrastruttura, ma esistono ed è possibile che offrano alla base della struttura vincoli diversi dall'incastro puro.

→ Anche le **incertezze sui carichi** possono comportare incertezze sulle masse sismiche e di conseguenza sulle sollecitazioni negli elementi e quindi sulla loro verifica strutturale.

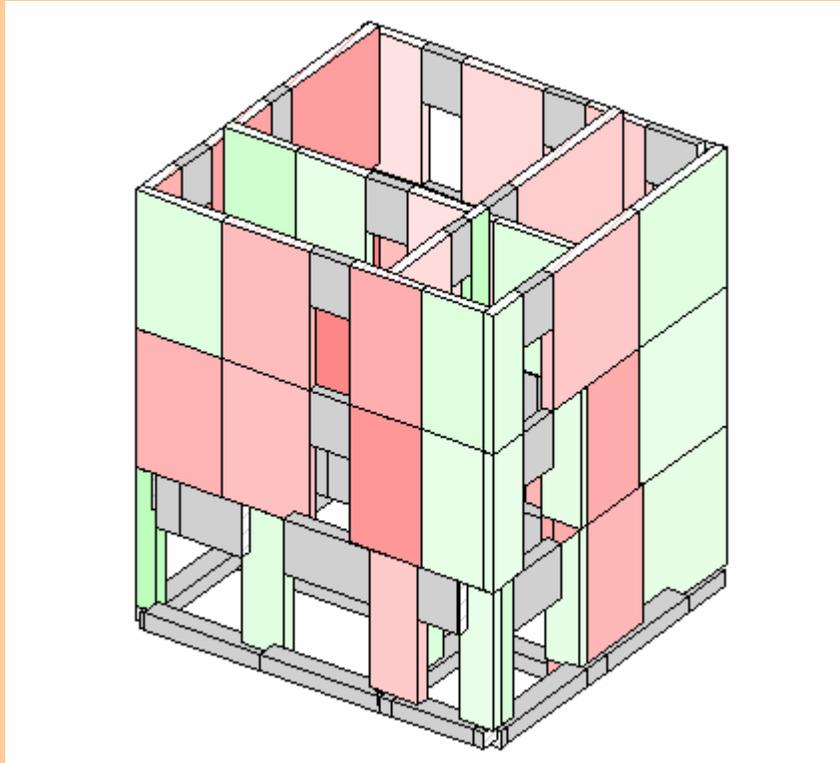
→ Tutte queste incertezze devono essere conosciute dal progettista, che saprà calibrare il modello e valutare l'attendibilità dei risultati, utilizzando ovviamente anche i parametri resi disponibili dalla Norma, ad esempio sui **livelli di conoscenza** e relativi **fattori di confidenza**, nonché sulla scelta del percorso di analisi appropriato.

## DIFFERENZE FRA ANALISI LINEARE E NON LINEARE

- **L'analisi lineare** (con fattore di struttura 'q') risolve in un sol passo la struttura e conduce subito alle verifiche dei singoli elementi strutturali, ognuno sottoposto alle sollecitazioni che gli competono.
- **Aspetti positivi:** lo svolgimento dei calcoli è abbastanza semplice, ed è possibile valutare in modo immediato l'effetto delle modifiche sui singoli elementi. Gli interventi di consolidamento possono calibrarsi direttamente sugli elementi non verificati.

→ **Aspetti negativi:** non vi è alcuna redistribuzione delle azioni quando gli elementi più deboli non possono incassare incrementi di azione sismica. Identificando la capacità antisismica dell'edificio con la resistenza del suo più debole elemento strutturale, i coefficienti di sicurezza (PGA sostenibile) possono essere molto bassi e condurre a sovrastime dei consolidamenti necessari per migliorare o adeguare l'edificio.

In figura seguente, un esempio di **verifica a taglio in analisi lineare**.



ed i relativi risultati in termini di PGA sostenibile:

**D.M. 14.1.2008**

**Analisi Sismica Statica Lineare [§7.8.1.5.2]**  
**Verifiche di sicurezza per Edifici in Muratura**

---

**Stato Limite Ultimo: Verifiche di Resistenza**  
 [§7.8.2.2]

|  |              |
|--|--------------|
| PressoFlessione Complanare [§7.8.2.2.1]    | <b>0.105</b> |
| Taglio per Scorrimento [§7.8.2.2.2]        | <b>0.445</b> |
| Taglio per Fessuraz. Diagonale [§C8.7.1.5] |              |
| PressoFlessione Ortagonale (da modello 3D) | <b>1.072</b> |
| PressoFlessione Ortagonale [§7.2.3]        | <b>0.857</b> |

SLU di tipo geotecnico (GEO): Capacità portante del terreno e Scorrimento sul piano di posa [§6.4.2.1, §7.2.5] **2.160**

---

**Stato Limite di Danno: Verifica degli Spostamenti**  
 [§7.3.7.2]

$(d_r / h)_{max}$  ('per mille': deve essere:  $< 3$ ) = **0.451**

Coefficiente di sicurezza  $(= 3 / (d_r / h)_{max})$  = **6.652**

---

**Confronto fra Capacità e Domanda - Indicatori di rischio**  
 PGA,DLV = 0.188 g - TR,DLV = 475 anni - P,VR, DLV = 10 %  
 Indicatori di rischio (alfa),V

| PGA,CLV (g)  | TR,CLV (anni) | FVR,CLV (%) | PGA,CLV / PGA,DLV | TR,CLV / TR,DLV |
|--|---------------|-------------|-------------------|-----------------|
| Resistenza e Deformazione nel piano :                |               |             |                   |                 |
| 0.062  | $\leq 30$     | 81.1        | 0.330             | 0.063           |
| Resistenza fuori piano :                             |               |             |                   |                 |
| 0.161  | 302           | 15.256      | 0.856             | 0.636           |
| Capacità limite del terreno :                        |               |             |                   |                 |
| 0.309  | $\geq 2475$   | 2           | 1.644             | 5.211           |
| Valori minimi degli Indicatori di rischio (alfa),V = |               |             | 0.330             | 0.063           |

---

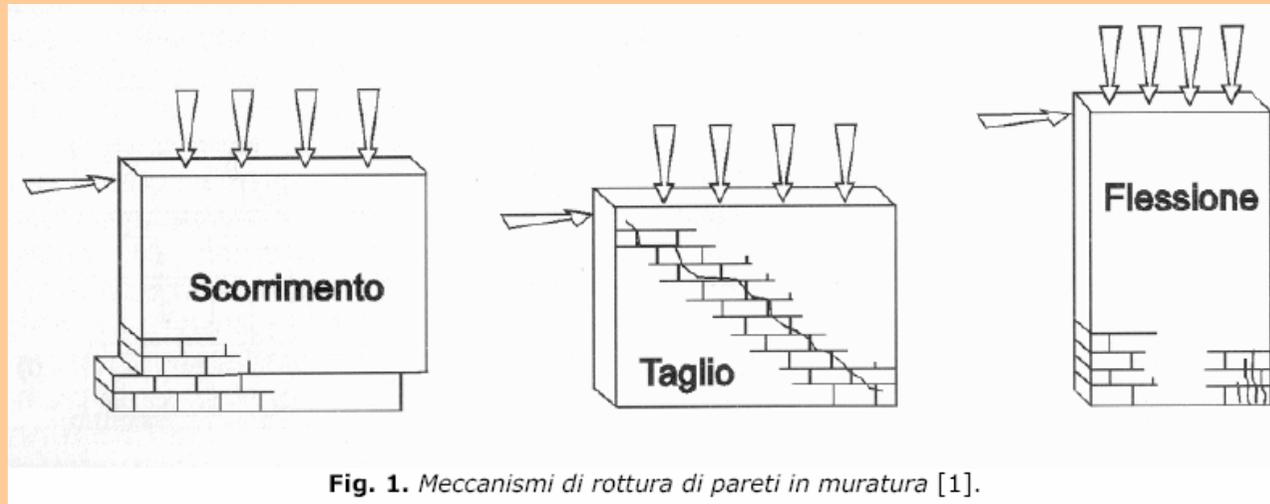
PGA,DLD = 0.077 g - TR,DLD = 50 anni - P,VR, DLD = 63 %  
 Indicatori di rischio (alfa),D

| PGA,CLD (g)             | TR,CLD (anni) | FVR,CLD (%) | PGA,CLD / PGA,DLD | TR,CLD / TR,DLD |
|-------------------------|---------------|-------------|-------------------|-----------------|
| Deformazione di danno : |               |             |                   |                 |
| 0.309                   | $\geq 2475$   | 2           | 4.013             | 49.500          |

Rapporto sulle verifiche di sicurezza...      Grafici PVR - (alfa)V ...

Chiudi

## Significato fisico delle verifiche da svolgere:

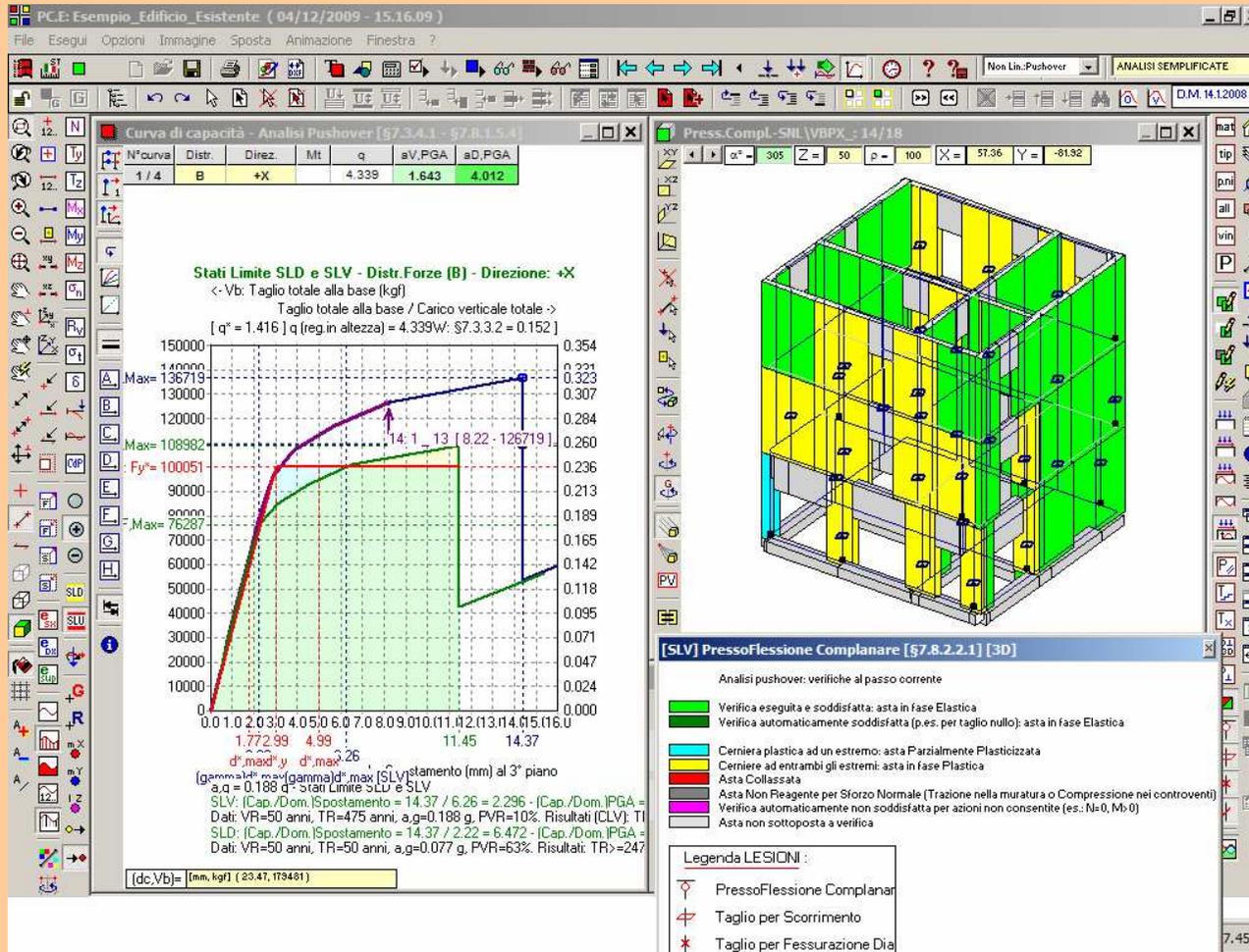




**Fig. 2.** *Rotture a Taglio per fessurazione diagonale [2].*

→ In **analisi non lineare** (o pushover, analisi di spinta), le forze orizzontali vengono progressivamente incrementate, in modo da simulare le forze di inerzia prodotte dal sisma).

→ **Aspetti positivi:** l'analisi non lineare (erede dei metodi tipo POR) permette di considerare correttamente la **collaborazione fra le pareti** in fase ultra-elastica, e conduce ad una descrizione molto più esaustiva del comportamento strutturale rispetto all'analisi lineare. Consente la **calibrazione degli interventi strettamente necessari**, evitando sovradimensionamenti.



→ **Aspetti critici**: complessità della modellazione, **delicatezza dell'analisi** (errori di modellazione contenuti possono generare forti variazioni nei risultati). E' necessario padroneggiare bene sia i contenuti sia le metodologie, e conoscere bene i programmi di calcolo applicati, non solo nel loro funzionamento ma anche (e soprattutto) nella loro impostazione teorico-applicativa.

→ Un'importante osservazione operativa, qualunque sia l'analisi eseguita.

**In tutti i casi incerti**, o comunque laddove non si può stabilire con sufficiente sicurezza quale sia il modello più appropriato, occorre **ripetere il calcolo strutturale sotto varie ipotesi**, per giungere al corretto inquadramento del comportamento strutturale e alla conseguente scelta degli interventi più appropriati.

## REQUISITI FONDAMENTALI DEL CALCOLO STRUTTURALE PER LA CORRETTA ESECUZIONE DELLE VERIFICHE alla luce della necessità di utilizzo di software specifici

Le **verifiche strutturali** determinano la qualifica delle capacità antisismiche dell'edificio e comportano la scelta dei tipi di intervento: **da esse dipende la spesa necessaria per la messa in sicurezza delle strutture esistenti.** Anche se devono possibilmente essere sempre commisurate a calcoli semplici anche manuali, le verifiche di fatto dipendono dagli ambienti di calcolo utilizzati (software): pertanto, un corretto progetto di consolidamento si basa anche su alcuni requisiti che devono essere rispettati dal software.

## **1) TOTALE CONTROLLO SUI DATI E SUI PARAMETRI DI CALCOLO**

Nessuna esigenza di 'semplificazione' di procedure 'troppo complesse' può giustificare l'uso interno di parametri di default che di fatto non sono trasparenti per l'Utente, al quale contemporaneamente si rimanda la piena assunzione di responsabilità!

## **2) CHIAREZZA SUI LIMITI DI VALIDITA' DELLE IPOTESI DI CALCOLO**

Ogni Dato e ogni Parametro di Calcolo deve essere commisurato alla sua effettiva influenza sul risultato.

Si devono chiarire i limiti della modellazione, che soprattutto in analisi globale di edifici esistenti è sempre una fotografia sfocata della realtà.

### **3) COMPrensione DEI RISULTATI**

Si devono chiaramente comprendere, tramite mappe e risultati testuali, tutti i principali aspetti relativi alla resistenza e alla deformazione delle strutture.

#### **4) RIPERCORRIBILITA' DEI RISULTATI**

Si deve comprendere come i metodi di analisi giungono passo dopo passo, ai risultati, in particolare per le analisi non lineari

#### **5) RIPRODUCIBILITA' DEI RISULTATI**

L'analisi dovrebbe poter essere riprodotta, almeno potenzialmente, anche in assenza del software commerciale specifico. In analisi globale degli edifici in muratura, questo aspetto è soddisfatto p.es. dal metodo a telaio equivalente, peraltro suggerito dalle Norme. Se l'algoritmo non è riproducibile a causa della difficoltà matematica (p.es. FEM con leggi costitutive evolute), si devono fornire comparazioni con esempi semplici riproducibili con tecniche alternative: il risultato ottenuto per tali esempi deve essere riottenibile, almeno come ordine di grandezza, con procedure semplificate.

- RIPERCORRIBILITA' DEI RISULTATI**
- RIPRODUCIBILITA' DEI RISULTATI**

Queste due condizioni consentono inoltre un efficace controllo da parte degli Enti pubblici preposti e una realistica comparazione fra progetti studiati in sedi diverse (p.es. per una classifica di accesso a finanziamenti).

## 6) VALORIZZAZIONE DELLA BASE DI CONOSCENZA PROFESSIONALE nei confronti di nuove tecniche di analisi.

Ripensando ad esempio al metodo POR diffusamente applicato in passato per l'analisi degli edifici in muratura, si deve sostenere non una 'rottura' col passato, ma un miglioramento nel solco della continuità col passato. I **nuovi metodi**, a tutti gli effetti, possono essere resi disponibili come **evoluzione dei metodi precedenti**.