

**Horae**

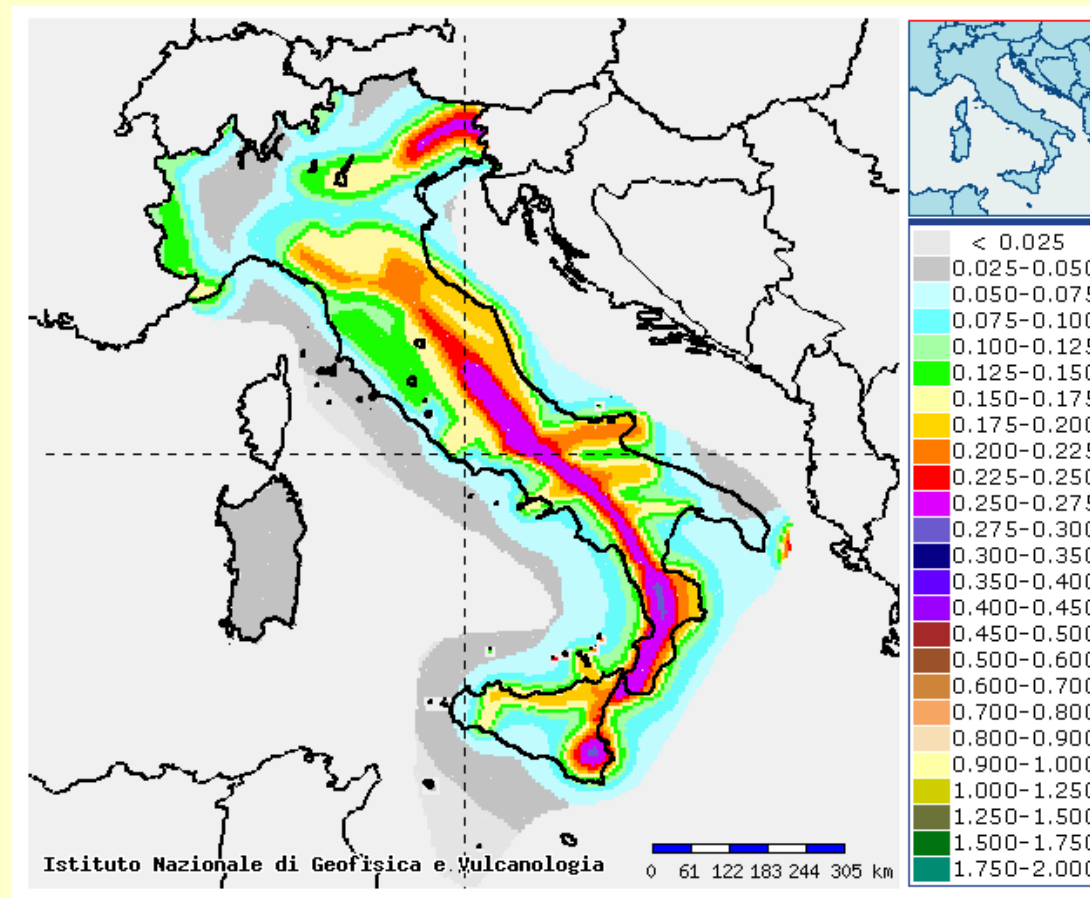
via C. Colombo, 19/p6 - 06127 - Perugia  
tel.075/5003198 - Fax 075/5004095



**STS s.r.l.**  
**Software Tecnico Scientifico**



# ***VULNERABILITÀ SISMICA***



## ***Costruzioni esistenti***

Gli edifici esistenti presentano problemi legati al degrado e alla vetustà (carbonatazione del calcestruzzo, ossidazione delle armature, ...)

La qualità del costruito è tale da presentare una vita utile pari all'incirca a 50 anni e quindi già raggiunta da gran parte dell'edificato

Gli edifici esistenti sono stati progettati secondo pratiche progettuali ben distanti dalle odierne concezioni strutturali

Ai fini della prevenzione sismica risulta dunque importante conoscere il livello di sicurezza di queste strutture, per poter pianificare eventuali interventi di adeguamento o miglioramento sismico

# ***Costruzioni esistenti***

## **8 COSTRUZIONI ESISTENTI**

### **8.1 OGGETTO**

Il presente capitolo definisce i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti.

È definita costruzione esistente quella che abbia, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento, la struttura completamente realizzata.

# *Costruzioni esistenti*

## **C8. COSTRUZIONI ESISTENTI**

Il problema della sicurezza delle costruzioni esistenti è di fondamentale importanza in Italia, da un lato per l'elevata vulnerabilità, soprattutto rispetto alle azioni sismiche, dall'altro per il valore storico-architettonico-artistico-ambientale di gran parte del patrimonio edilizio esistente. A ciò si aggiunge la notevole varietà di tipologie e sub-tipologie strutturali, quali, ad esempio nell'ambito delle strutture murarie, quelle che scaturiscono dalle diversificazioni delle caratteristiche dell'apparecchio murario e degli orizzontamenti, e dalla presenza di catene, tiranti ed altri dispositivi di collegamento.

## ***Rischio sismico***

Il rischio sismico gravante su un territorio è il risultato di tre fattori:

- **pericolosità sismica**: probabilità che in un certo luogo ed in un preciso intervallo di tempo possa avvenire un terremoto di caratteristiche ben definite
- **vulnerabilità sismica**: predisposizione delle strutture a subire un danneggiamento più o meno elevato a seguito di un evento sismico
- **esposizione**: dislocazione sul territorio di beni di valore, di aree densamente popolate e di attività produttive che possono essere influenzate da un evento sismico

## *Rischio sismico*

Il rischio sismico gravante su un territorio è il risultato di tre fattori:

- pericolosità sismica
- vulnerabilità sismica
- esposizione

La **pericolosità sismica** del territorio è una componente non modificabile del rischio sismico, così come la modifica dell'esposizione è una operazione di difficile attuazione poiché comporterebbe un trasferimento di attività, persone e beni di difficilissima od impossibile attuazione se non in rarissimi casi

La possibilità di mitigare il rischio sismico trova il suo strumento più diretto e di immediato impatto nella riduzione della **vulnerabilità**

## ***Rischio sismico***

Il rischio sismico gravante su un territorio è il risultato di tre fattori:

- pericolosità sismica
- vulnerabilità sismica
- esposizione

La misura della vulnerabilità sismica ha lo scopo di valutare la sicurezza di un edificio esistente nei riguardi dell'azione sismica

## ***Valutazione della sicurezza***

Per valutazione della sicurezza si intende un procedimento quantitativo volto a:

- stabilire se una struttura esistente è in grado o meno di resistere alle combinazioni delle azioni di progetto contenute nelle N.T.C.

oppure

- determinare l'entità massima delle azioni, considerate nelle combinazioni di progetto previste, che la struttura è capace di sostenere con i margini di sicurezza richiesti dalle N.T.C.

La valutazione della sicurezza potrà essere eseguita con riferimento ai soli Stati Limite Ultimi, SLV o in alternativa SLC



# Valutazione della sicurezza

Le N.T.C. individuano le situazioni nelle quali è obbligatorio effettuare la verifica di sicurezza

## 8.3 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguiti con riferimento ai soli SLU; nel caso in cui si effettui la verifica anche nei confronti degli SLE i relativi livelli di prestazione possono essere stabiliti dal Progettista di concerto con il Committente.

Le Verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC).

Le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza quando ricorra anche una delle seguenti situazioni:

- riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta ad azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni), situazioni di funzionamento ed uso anomalo, deformazioni significative imposte da cedimenti del terreno di fondazione;
- provati gravi errori di progetto o di costruzione;
- cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o della classe d'uso della costruzione;
- interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e, in modo consistente, ne riducano la capacità o ne modifichino la rigidità.

## ***Valutazione della sicurezza***

Le N.T.C. individuano le situazioni nelle quali è obbligatorio effettuare la verifica di sicurezza

tali situazioni possono essere raggruppate in due famiglie, entrambe riconducibili ad un significativo peggioramento delle condizioni di sicurezza iniziali o di progetto secondo la normativa dell'epoca della costruzione:

- variazioni indipendenti dalla volontà dell'uomo (terremoto, degrado ...);
- variazioni dovute all'intervento dell'uomo (aumento dei carichi, interventi non dichiaratamente strutturali, ...)

Le modalità di verifica dipendono dal modo in cui tali variazioni si riflettono sul comportamento della struttura

# *Valutazione della sicurezza*

## Interventi sugli edifici

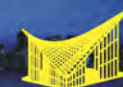
Gli interventi sulla struttura possono essere suddivise in due tipologie:

Variazioni relative a porzioni limitate della struttura:

la verifica potrà concernere solamente le porzioni interessate dalle variazioni apportate

Variazioni che implicano sostanziali differenze di comportamento globale della struttura:

la verifica sarà necessariamente finalizzata a determinare l'effettivo comportamento della struttura nella nuova configurazione



# Valutazione della sicurezza

## Interventi sugli edifici

Gli esiti delle verifiche dovranno permettere di stabilire i provvedimenti da adottare affinché la struttura sia conforme ai criteri di sicurezza delle N.T.C.

### 8.4 CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI

Si individuano le seguenti categorie di intervento:

- interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle presenti norme;
- interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle presenti norme;
- riparazioni o interventi locali che interessino elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

# *Valutazione della sicurezza*

## Interventi sugli edifici

### Intervento di adeguamento:

la valutazione della sicurezza è finalizzata a stabilire se la struttura, a seguito dell'intervento, è in grado di resistere alle combinazioni delle azioni di progetto contenute nelle N.T.C., con il grado di sicurezza richiesto dalle stesse

### Intervento di miglioramento:

la valutazione della sicurezza è finalizzata a determinare l'entità massima delle azioni, considerate nelle combinazioni di progetto previste, cui la struttura può resistere con il grado di sicurezza richiesto

# ***Valutazione della sicurezza***

## **Procedure per la valutazione della sicurezza**

Vengono definiti alcuni passaggi fondamentali delle procedure per la valutazione della sicurezza:

- analisi storico-critica
- rilievo geometrico-strutturale
- caratterizzazione meccanica dei materiali
- definizione dei livelli di conoscenza e dei conseguenti fattori di confidenza
- definizione delle azioni
- analisi strutturale

# ***Valutazione della sicurezza***

## **Analisi storico-critica**

Consiste nella ricostruzione della storia progettuale e costruttiva dell'edificio ed eventualmente dello sviluppo storico del quartiere in cui questo è situato

Consentirà anche di verificare quanti e quali terremoti l'edificio abbia subito in passato e quindi di valutarne il funzionamento

Sulla base dei dati raccolti nella fase di ricerca storica, si possono trarre conclusioni di tipo operativo per la modellazione meccanica globale dell'edificio



# *Valutazione della sicurezza*

## Rilievo

Consiste in un insieme di procedure relazionate e mirate alla conoscenza della geometria esterna delle strutture e dei dettagli costruttivi

Rappresenta un passo fondamentale nell'acquisizione dei dati necessari a mettere a punto un modello di calcolo accurato di un edificio

Mentre per gli altri due aspetti che determinano il livello di conoscenza (dettagli costruttivi e proprietà dei materiali) si accettano crescenti livelli di approfondimento dell'indagine, per la geometria esterna, si richiede che il rilievo sia compiuto in maniera quanto più completa e dettagliata possibile



# ***Valutazione della sicurezza***

## **Caratterizzazione meccanica dei materiali**

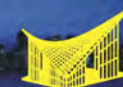
Nella definizione delle caratteristiche meccaniche dei materiali si può fare uso dalle classi discretizzate previste nelle N.T.C.

Nel caso in cui vengano effettuate prove sulla struttura, attendibili ed in numero statisticamente significativo, i valori delle resistenze meccaniche dei materiali vengono desunti da queste e prescindono dalle classi discretizzate

# *Valutazione della sicurezza*

## Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Ai fini della scelta dei valori dei **fattori di confidenza** e del **tipo di analisi** si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:



## *Valutazione della sicurezza*

### Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Ai fini della scelta dei valori dei fattori di confidenza e del tipo di analisi si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:

#### **- Livello di conoscenza limitato            LC1**

si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ limitate sui dettagli costruttivi ed indagini in situ limitate sulle proprietà dei materiali;

il corrispondente fattore di confidenza è  $FC = 1.35$



## *Valutazione della sicurezza*

### Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:

- **Livello di conoscenza limitato**      **LC1** : (FC = 1.35)
- **Livello di conoscenza adeguato**      **LC2**

si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi ed indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali;

il corrispondente fattore di confidenza è  $FC = 1.2$

## *Valutazione della sicurezza*

### Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:

- **Livello di conoscenza limitato**      **LC1** : (FC = 1.35)
- **Livello di conoscenza adeguato**      **LC2** : (FC = 1.2)
- **Livello di conoscenza accurato**      **LC3**

si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi, indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali;

il corrispondente fattore di confidenza è  $FC = 1.0$

## **Valutazione della sicurezza**

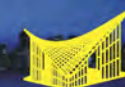
### **Livelli di conoscenza e fattori di confidenza**

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:

- Livello di conoscenza limitato**                      **LC1** : (FC = 1.35)
- Livello di conoscenza adeguato**                      **LC2** : (FC = 1.2)
- Livello di conoscenza accurato**                      **LC3** : (FC = 1.0)

I fattori di confidenza (FC), strettamente legati al livello di conoscenza conseguito nelle indagini conoscitive, vanno a ridurre i valori medi di resistenza dei materiali per ricavare i valori da adottare nella verifica

$$\bar{f}_m = \frac{f_m}{FC} \quad ; \quad \bar{\tau}_n = \frac{\tau_n}{FC}$$



# Valutazione della sicurezza

## Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

edifici in muratura

Tabella C8A.1.1 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti valori dei fattori di confidenza per edifici in muratura

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	Tutti	1.35
LC2		verifiche in situ estese ed esauritive	Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3			-caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1  -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).  -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).		1.00

# Valutazione della sicurezza

## Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

Tabella C8A.1.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell’informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell’epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell’epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1.00





# ***Strutture in muratura***

## **Proprietà meccaniche del materiale**

La determinazione della resistenza caratteristica a compressione e taglio dovrà essere effettuata per via sperimentale su campioni di muro.

In considerazione della difficoltà ed onerosità di questo tipo di prove, la norma ammette la possibilità di ricavare i valori delle resistenze a compressione e a taglio utilizzando apposite tabelle.



# Strutture in muratura

## Proprietà meccaniche del materiale

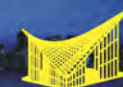
Tipologia di muratura	$f_m$	$\tau_0$	$E$	$G$	$w$
	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100	2,0	620	230	19
	180	3,2	1050	350	
Muratura a conci sbalzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200	3,5	1020	340	20
	300	5,1	1440	480	
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260	5,6	1500	500	21
	380	7,4	1980	660	
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140	2,8	900	300	16
	240	4,2	1260	420	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600	9,0	2400	780	22
	800	12,0	3200	940	
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240	6,0	1200	400	18
	400	9,2	1800	600	
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$ )	500	24	3500	875	15
	800	32	5600	1400	
Muratura in blocchi laterizi semipieni: (perc. foratura $< 45\%$ )	400	30,0	3600	1080	12
	600	40,0	5400	1620	
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura $< 45\%$ )	300	10,0	2700	810	11
	400	13,0	3600	1080	
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150	9,5	1200	300	12
	200	12,5	1600	400	
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura $< 45\%$ )	300	18,0	2400	600	14
	440	24,0	3520	880	

## Strutture in muratura

### Proprietà meccaniche del materiale

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinato (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbalzati, con paramento di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufa, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

\* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. >70 cm).



## *Valutazione della sicurezza*

### Analisi strutturale: edifici in muratura

Per la valutazione della sicurezza degli edifici esistenti, oltre all'**analisi sismica globale**, da effettuarsi con i metodi previsti dalle norme di progetto per le nuove costruzioni, è da considerarsi anche l'**analisi dei meccanismi locali**



## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi sismica globale può essere condotta secondo procedure differenti:

- Analisi statica lineare
- Analisi dinamica modale lineare
- Analisi statica non lineare (Push-Over)
- Analisi dinamica non lineare

## ***Valutazione della sicurezza***

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

### **- Analisi statica o dinamica lineare**

Per la verifica di edifici con analisi lineare ed impiego del fattore  $q$ , il valore da utilizzare è:

- $q = 2.0 \alpha_u / \alpha_1$  per edifici regolari in elevazione
- $q = 1.5 \alpha_u / \alpha_1$  negli altri casi

Le analisi lineari, statiche o dinamiche, non sono poco adatte a problemi di verifica ma possono funzionare esclusivamente per problemi di progetto



# Strutture in muratura

## Fattore di struttura

$$q = q_0 \cdot K_R$$

$q_0$  = parametro funzione della tipologia strutturale e della classe di duttilità

Tipologia Strutturale	$q_0$
Costruzioni in muratura ordinaria	$2.0 \alpha_u / \alpha_1$
Costruzioni in muratura armata	$2.5 \alpha_u / \alpha_1$
Costruzioni in muratura armata progettati secondo GR	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$

Tipologia Edificio	$\alpha_u / \alpha_1$
Costruzioni in muratura ordinaria ad un piano	1.4
Costruzioni in muratura ordinaria a due o più piani	1.8
Costruzioni in muratura armata ad un piano	1.3
Costruzioni in muratura armata a due o più piani	1.5
Costruzioni in muratura armata progettate secondo GR	1.3

$q = q_0 \cdot K_R$  par 7.3.1

$q_0 =$  muratura ordinaria =  $2.0 / \alpha_u / \alpha_1$  par 7.8.1.3

$\alpha_u / \alpha_1 = 1.8$  muratura a più piani par 7.8.1.3 per strutture regolari in pianta

per la non regolarità in pianta  $\alpha_u / \alpha_1$  si fa media tra 1 e 1.8 = 1.4

per cui si ha  $q = 2 \cdot 1.4 \cdot 1.8 = 2.24$   
questo è valido per strutture nuove

**Horae srl -**

nel caso di strutture esistenti non regolari in altezza  $q = 1.5 \alpha_u / \alpha_1$  [www.horae.it](http://www.horae.it)



# Strutture in muratura

## Fattore di struttura

$$q = q_0 \cdot K_R$$

$K_R$  = parametro funzione della regolarità dell'edificio

$K_R$	Tipologia Strutturale
1.0	Edifici Regolari in Altezza
0.8	Edifici Non Regolari in Altezza



# Strutture in muratura

## Fattore di struttura

### C8.7.1.2 Azione sismica

Per lo Stato limite di salvaguardia della vita e lo Stato limite di esercizio l'azione sismica è definita al § 3.2 delle NTC, tenuto conto del periodo di riferimento definito al § 2.4 delle NTC.

Per la verifica di edifici con analisi lineare ed impiego del fattore  $q$ , il valore da utilizzare per quest'ultimo è pari a:

- $q = 2,0 \alpha_w / \alpha_1$  per edifici regolari in elevazione
- $q = 1,5 \alpha_w / \alpha_1$  negli altri casi

in cui  $\alpha_w$  e  $\alpha_1$  sono definiti al § 7.8.1.3 delle NTC. In assenza di più precise valutazioni, potrà essere assunto un rapporto  $\alpha_w / \alpha_1$  pari a 1,5. La definizione di regolarità per un edificio esistente in muratura è quella indicata al § 7.2.2 delle NTC, in cui il requisito d) è sostituito da: i solai sono ben collegati alle pareti e dotati di una sufficiente rigidezza e resistenza nel loro piano.



# **Strutture in muratura**

## **Fattore di struttura per edifici esistenti**

$q = q_0 \cdot K_r$  par 7.3.1

$q_0 =$  muratura ordinaria =  $2.0 / \alpha_{fau} / \alpha_{fa1}$  par 7.8.1.3

$\alpha_{fau} / \alpha_{fa1} = 1.8$  muratura a piu piani par 7.8.1.3 per strutture regolari in pianta

per la non regolarità in pianta  $\alpha_{fau} / \alpha_{fa1}$  si fa media tra 1 e 1.8 = 1.4

per cui si ha  $q = 2 \cdot 1.4 \cdot .8 = 2.24$

questo è valido per strutture nuove

nel caso di strutture esistenti non regolari in altezza  $q = 1.5 \alpha_{fau} / \alpha_{fa1}$   
con  $\alpha_{fau} / \alpha_{fa1} = 1.4 =$  media tra 1 ed 1.8

si ha  $q = 1.5 \cdot 1.4 = 2.1$  par. C8.7.1.2

## *Valutazione della sicurezza*

### Analisi strutturale: edifici in muratura

#### **- Analisi statica non lineari**

Sono le analisi più efficienti in ambito tecnico-professionale in quanto sono abbastanza raffinate da modellare la capacità sismica degli edifici tenendo in conto della risposta anelastica e nel contempo robuste dal punto di vista numerico. Hanno inoltre il vantaggio di modellare la domanda in termini di spettri dello spostamento.

#### **- Analisi dinamica non lineari**

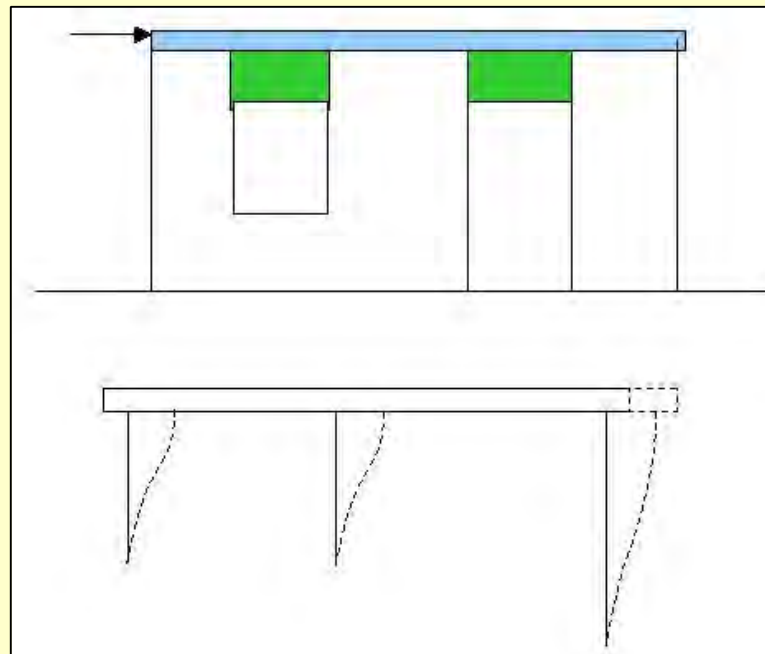
In teoria sono le analisi più corrette ma nella pratica presentano ancora varie difficoltà applicative tra cui: modelli numerici molto complessi, difficoltà di reperire modelli efficienti e realistici per la muratura, modellazione della domanda sismica legata alla scelta degli accelerogrammi. Tali analisi vanno condotte da specialisti.

# Valutazione della sicurezza

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Metodo POR

La verifica sotto le azioni orizzontali è effettuata piano per piano, previa la definizione del legame taglio-spostamento del singolo maschio murario.



## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Metodo POR

La verifica sotto le azioni orizzontali è effettuata piano per piano, previa la definizione del legame taglio-spostamento del singolo maschio murario.

- Limitato campo di applicazione (solai e fasce di piano rigidi)
- Sovrastima della resistenza sismica dell'edificio
- Sottostima notevole della duttilità strutturale

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Consiste nell'applicare un sistema di forze orizzontali monotonicamente crescenti ad un modello non lineare del sistema fino al raggiungimento di una condizione di crisi

Il metodo richiede la definizione di un **modello non lineare** del sistema che risulti nel contempo sufficientemente accurato e non proibitivo da un punto di vista computazionale

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

La modellazione della muratura è un problema estremamente complesso che deve essere affrontato per ottenere risultati realistici con analisi in campo non lineare

Gli approcci più comunemente utilizzati sono:

- Modello agli elementi finiti (FEM)
- Modello a macro-elementi
- Modello a telaio equivalente (SAM)

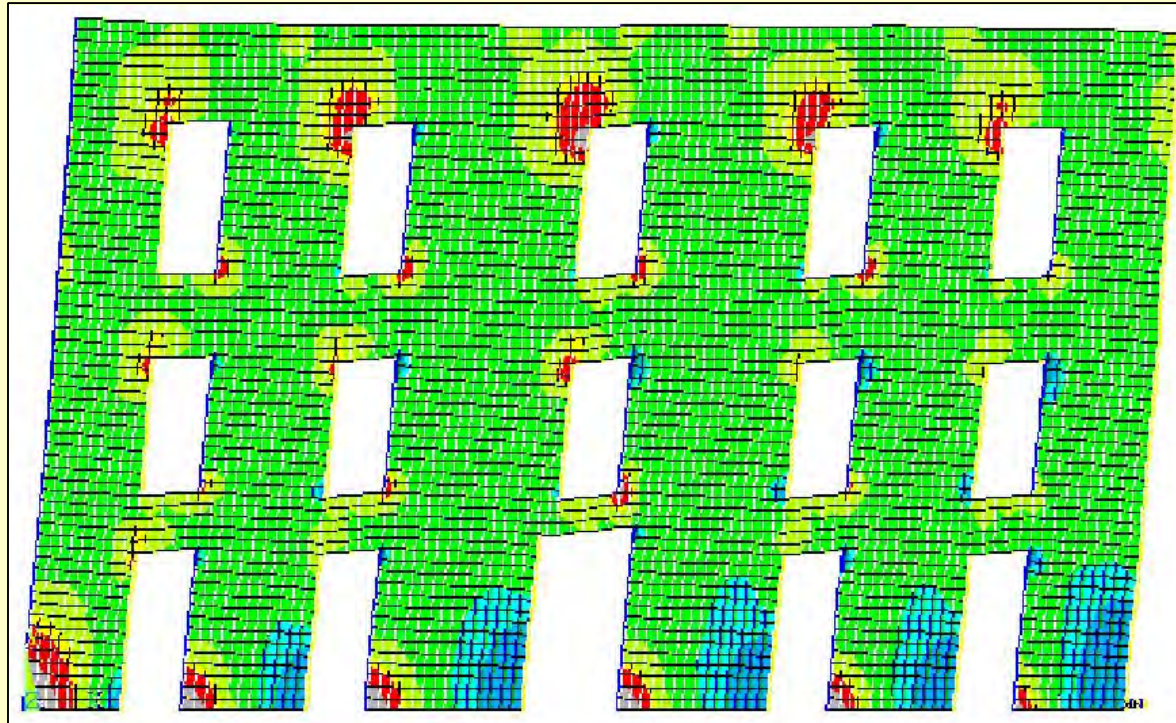


# *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Il modello ad elementi finiti consiste nel suddividere i maschi murari in elementi elementari connessi fra loro nei nodi



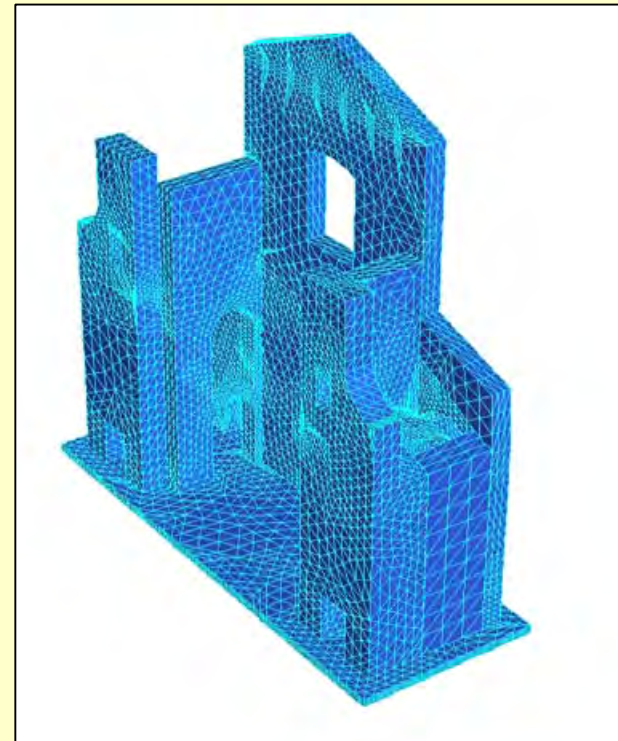
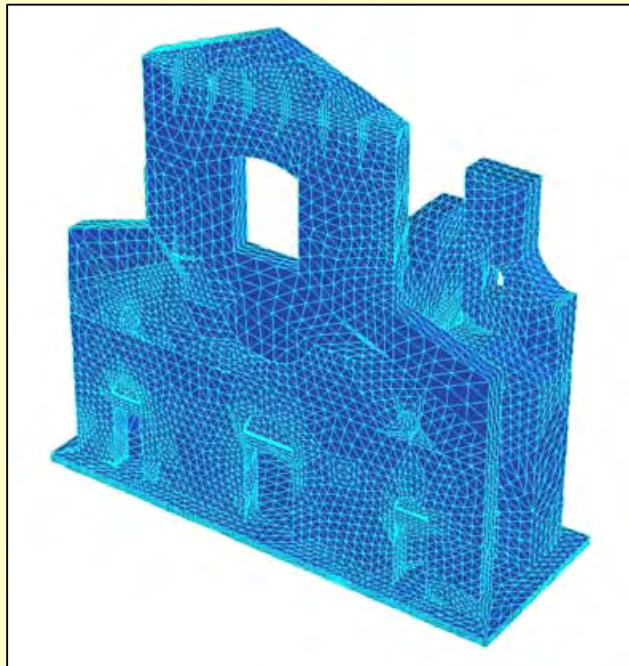


## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Il modello ad elementi finiti consiste nel suddividere i maschi murari in elementi elementari connessi fra loro nei nodi



## **Valutazione della sicurezza**

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

**Analisi statica non lineare:** Analisi Push-Over

Il modello ad elementi finiti consiste nel suddividere i maschi murari in elementi elementari connessi fra loro nei nodi

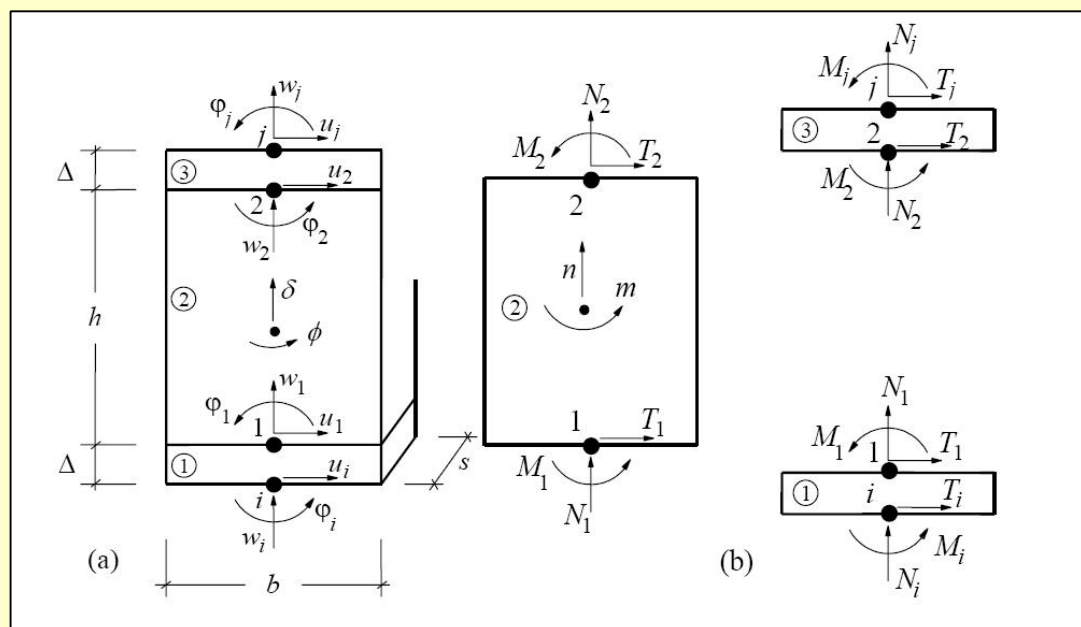
- Richiede un numero di g.d.l. estremamente elevato (proibitivo per edifici di dimensioni notevoli)
- Può fornire risultati privi di significato fisico se applicato in campo elastico (tensioni di trazione nel materiale muratura)
- Richiede la definizione puntuale delle leggi costitutive non lineari del materiale (di difficile reperimento)
- Le norme non contengono tutti i parametri necessari a definire il comportamento non lineare

# Valutazione della sicurezza

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Il modello a macroelementi consiste nel modellare i singoli maschi murari e le fasce di piano tramite macro-elementi a pochi g.d.l. che ne simulano i diversi comportamenti

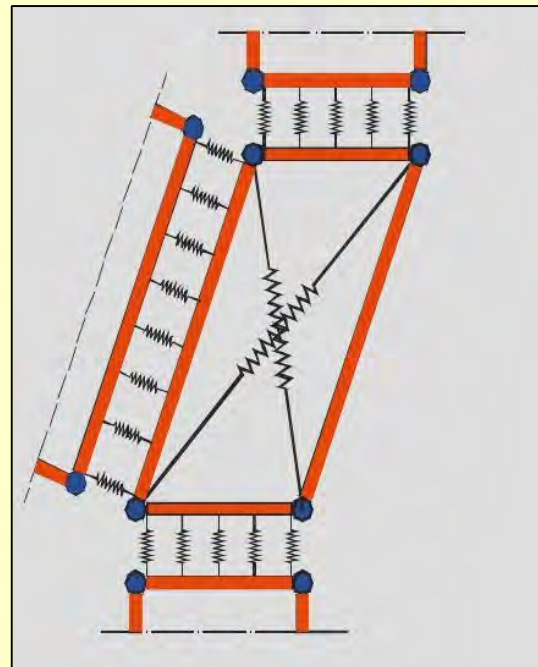


# Valutazione della sicurezza

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Il modello a macroelementi consiste nel modellare i singoli maschi murari e le fasce di piano tramite macro-elementi a pochi g.d.l. che ne simulano i diversi comportamenti



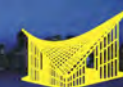
## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

**Analisi statica non lineare:** Analisi Push-Over

Il modello a macroelementi consiste nel modellare i singoli maschi murari e le fasce di piano tramite macro-elementi a pochi g.d.l. che ne simulano i diversi comportamenti

- Riduce drasticamente le dimensioni del problema rispetto all'approccio ad Elementi Finiti
- La decomposizione del sistema in macro-elementi risulta fortemente influenzata dalla distribuzioni delle aperture
- I differenti macro-elementi formulati in letteratura sono spesso di difficile calibrazione e riescono a tenere in conto solo alcuni dei comportamenti peculiari dei maschi murari



## Valutazione della sicurezza

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Il modello a telaio equivalente (SAM) prevede di schematizzare una parete forata usando elementi asta non lineari a plasticità concentrata deformabili sia a flessione che a taglio [Magenes e Calvi – 1996]

Questo modello ha immediato e costante riscontro nell'ordinanza 3274 e successive modifiche

*8.1.5.2 ..... In presenza di elementi di accoppiamento l'analisi potrà essere effettuata utilizzando modelli a telaio, in cui le parti di intersezione tra elementi verticali e orizzontali potranno essere considerate infinitamente rigide.*



## ***Valutazione della sicurezza***

**Analisi strutturale: edifici in muratura**

**Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over**

Il modello a telaio equivalente (SAM) prevede di schematizzare una parete forata usando elementi asta non lineari a plasticità concentrata deformabili sia a flessione che a taglio [Magenes e Calvi – 1996]

Lo schema statico del telaio dipende dalle geometria del sistema strutturale

In particolare è legato a:

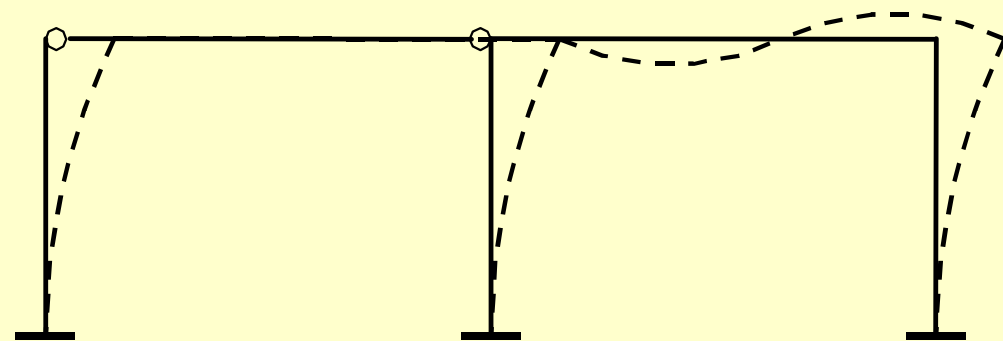
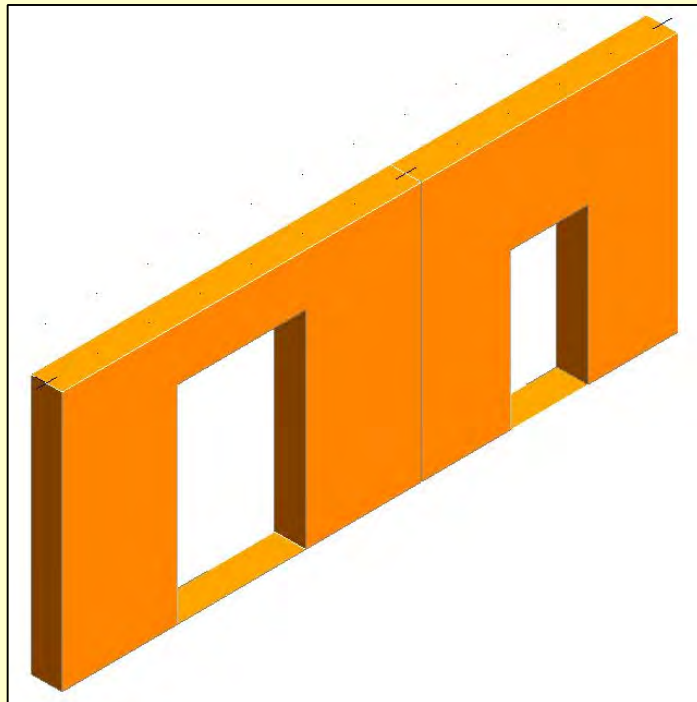
- Dimensioni e caratteristiche delle fasce di piano
- Disposizione delle aperture nei maschi murari

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)



Fasce di piano deformabili

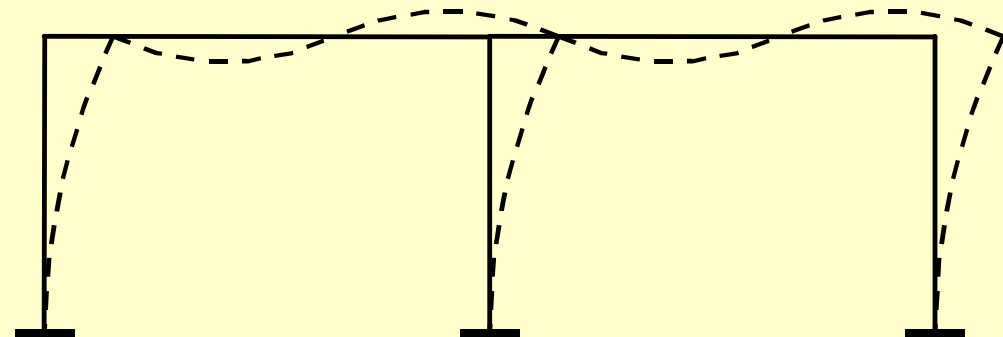
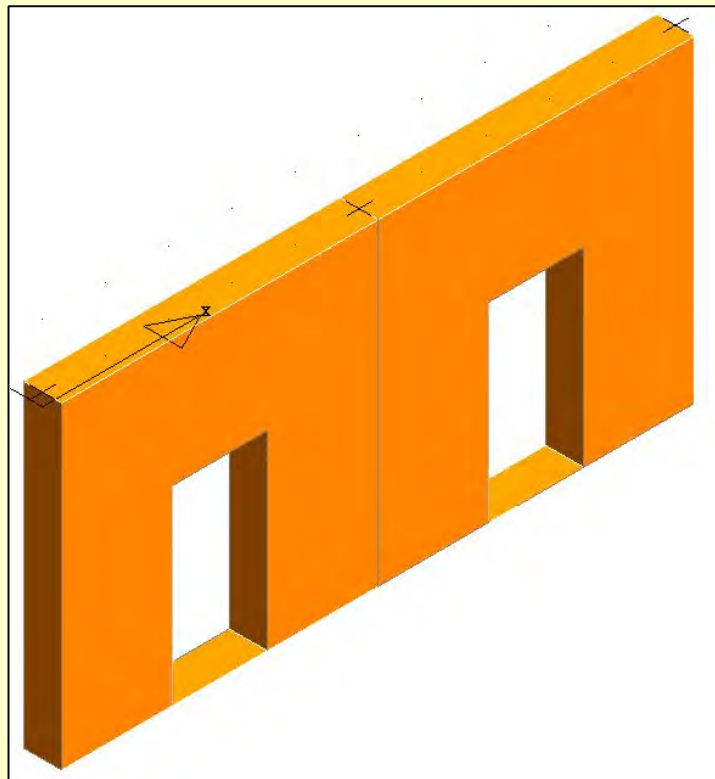


## **Valutazione della sicurezza**

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)



Fasce di piano rigide

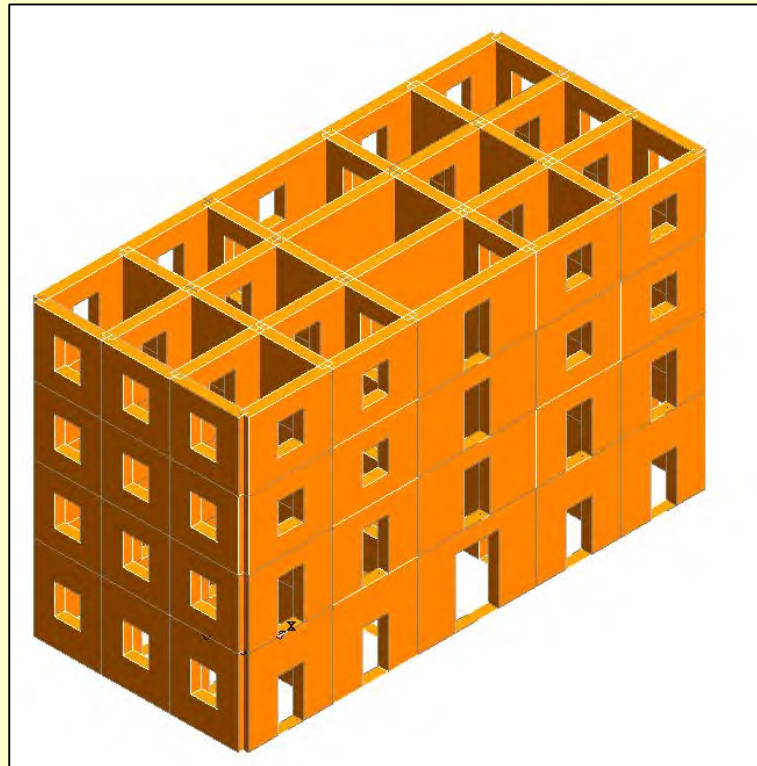
## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture ben allineate



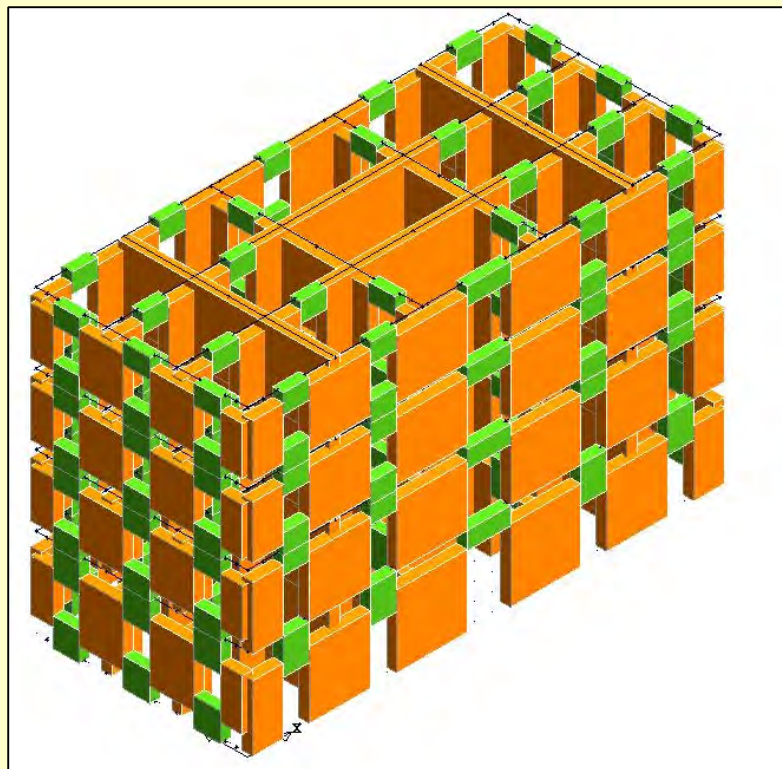
## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture ben allineate



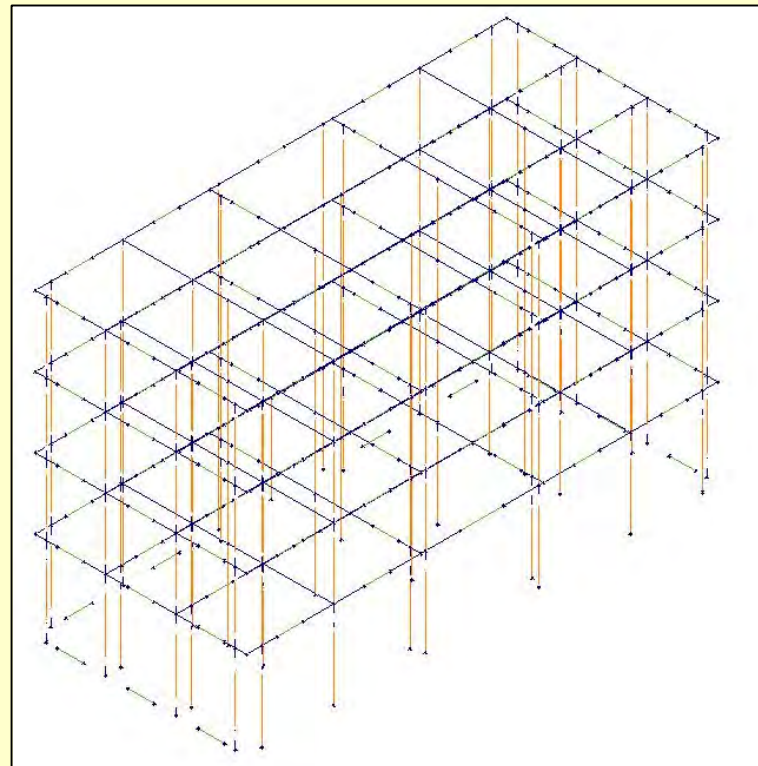
# *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture ben allineate





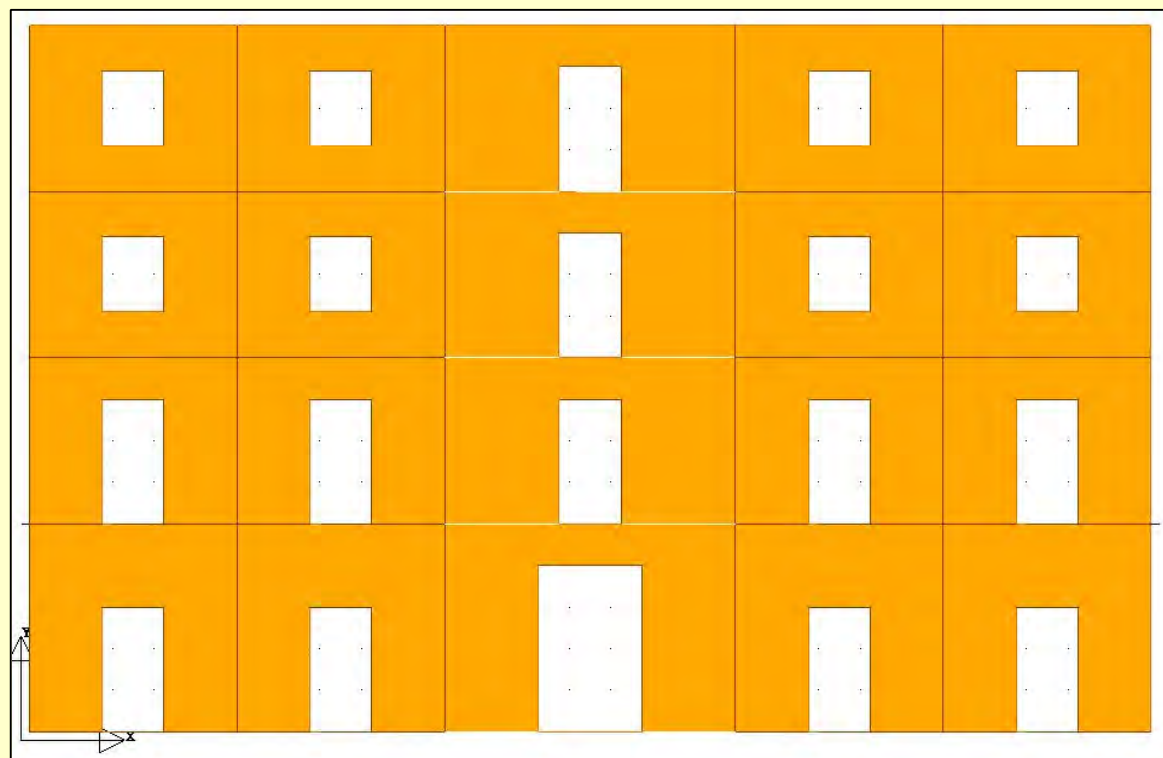
## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture ben allineate







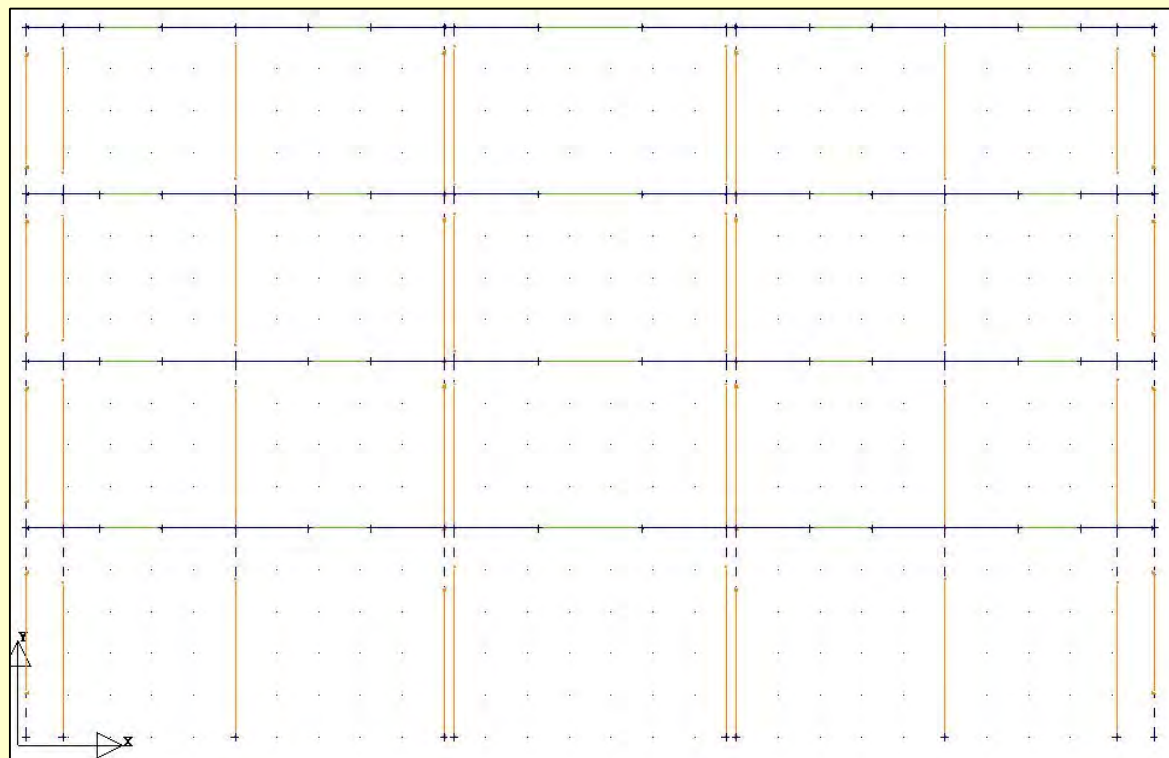
# Valutazione della sicurezza

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture ben allineate



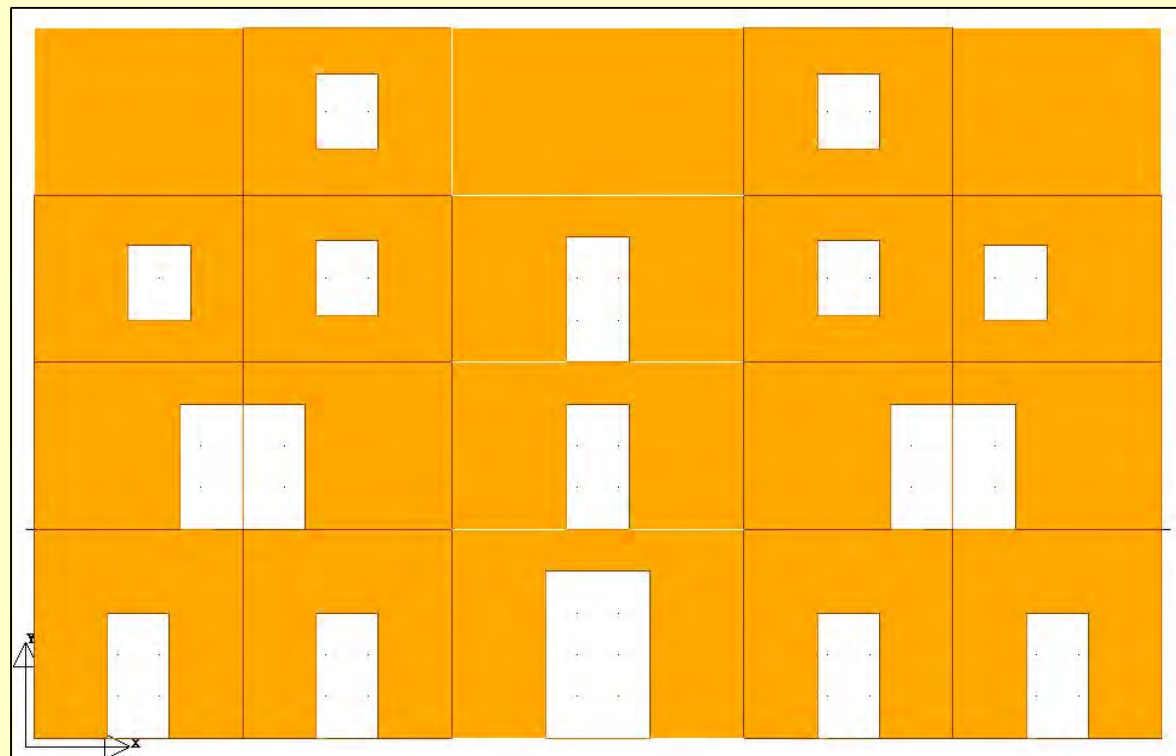
# *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture non allineate



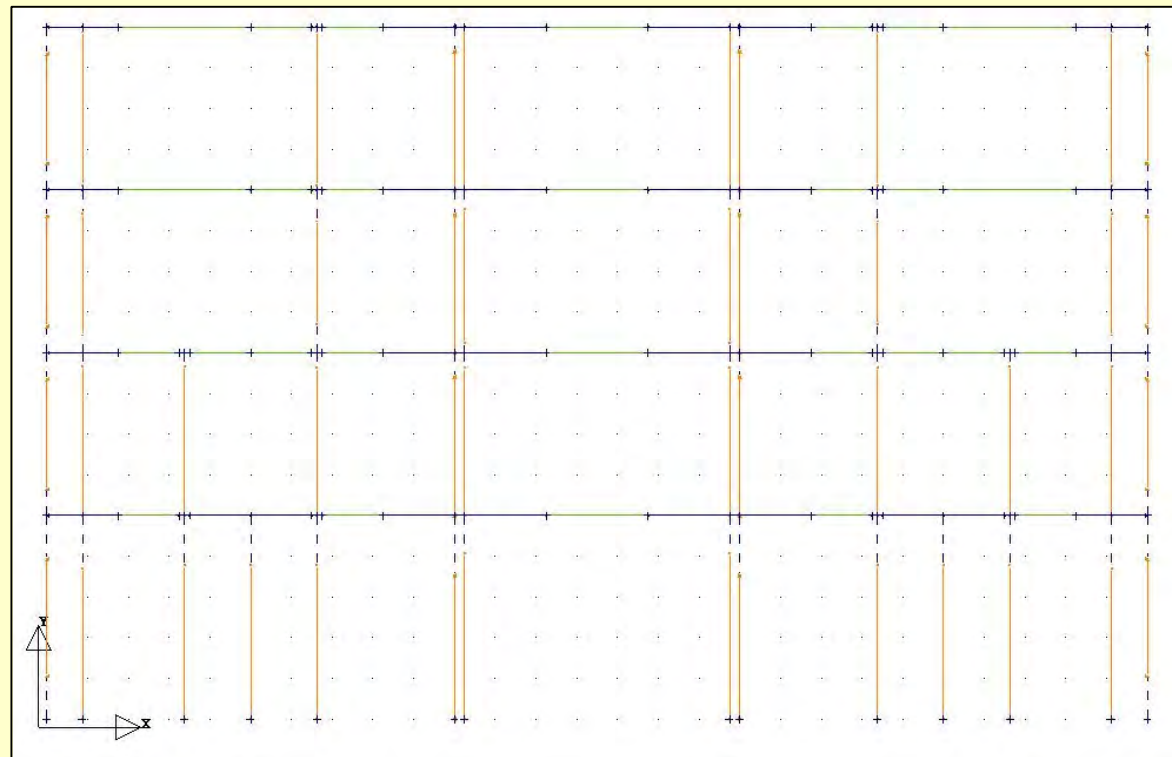
# *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture non allineate



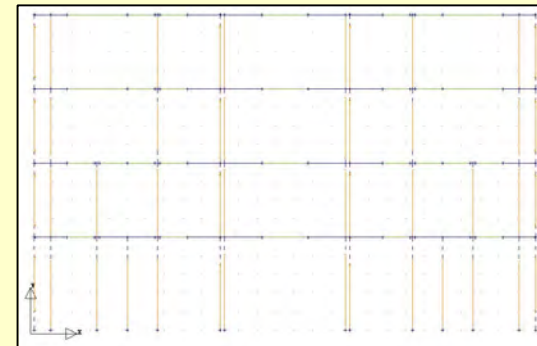
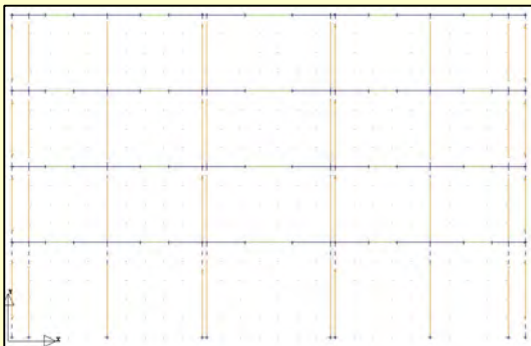
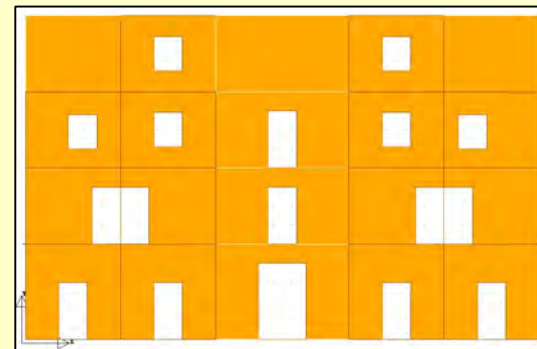
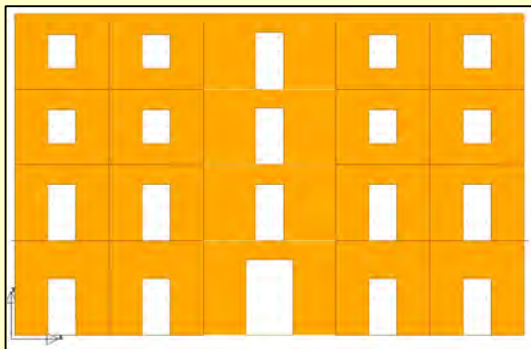


# *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)





# ***Analisi sismica di strutture in muratura***

## **Modello a telaio equivalente (SAM)**

### **Aperture non allineate**

#### **7.8.2.1 Criteri di progetto**

Oltre ai criteri definiti al § 4.5.4.1 e al § 7.8.1.4, le costruzioni in muratura ordinaria debbono avere le aperture praticate nei muri verticalmente allineate. Se così non fosse, deve essere prestata particolare attenzione sia alla definizione di un adeguato modello strutturale sia nelle verifiche, in quanto il disallineamento delle aperture comporta discontinuità ed irregolarità nella trasmissione delle azioni interne. In assenza di valutazioni più accurate, si prendono in considerazione nel

290

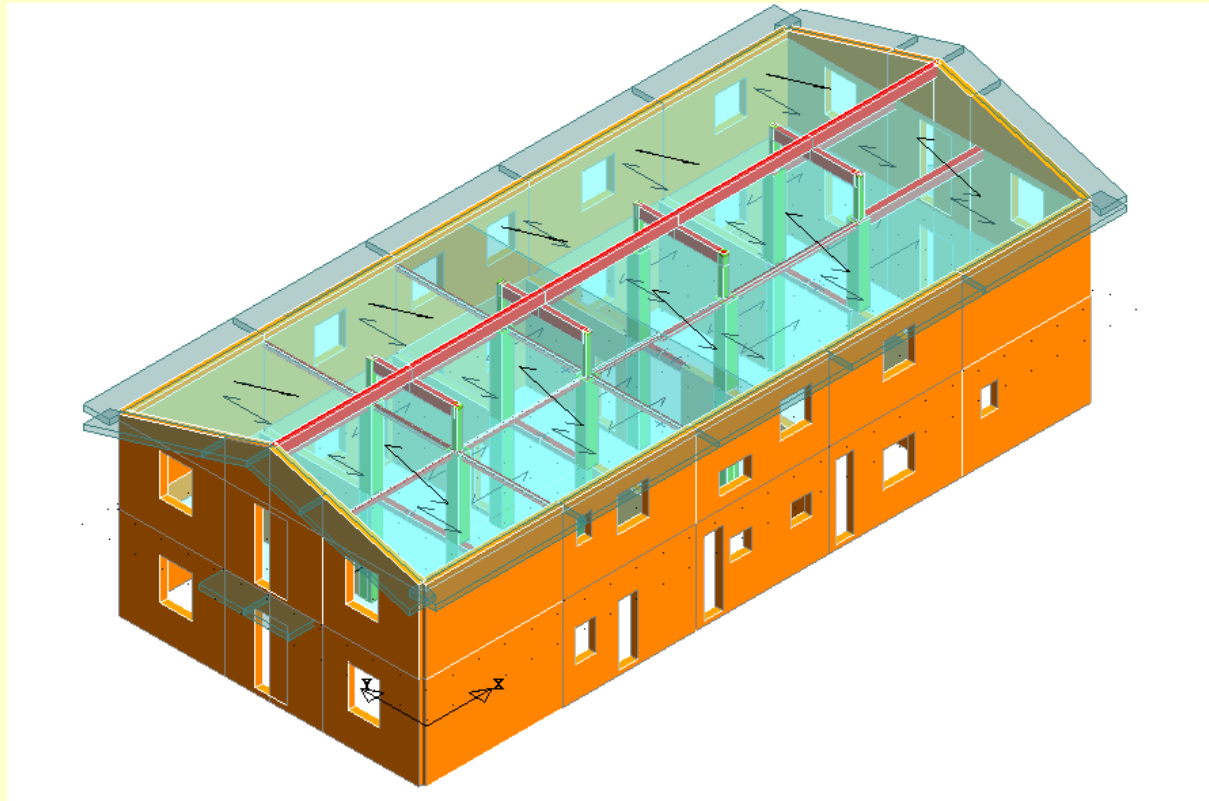
---

modello strutturale e nelle verifiche esclusivamente le porzioni di muro che presentino continuità verticale dal piano oggetto di verifica fino alle fondazioni.

# *Analisi sismica di strutture in muratura*

Modello a telaio equivalente (SAM)

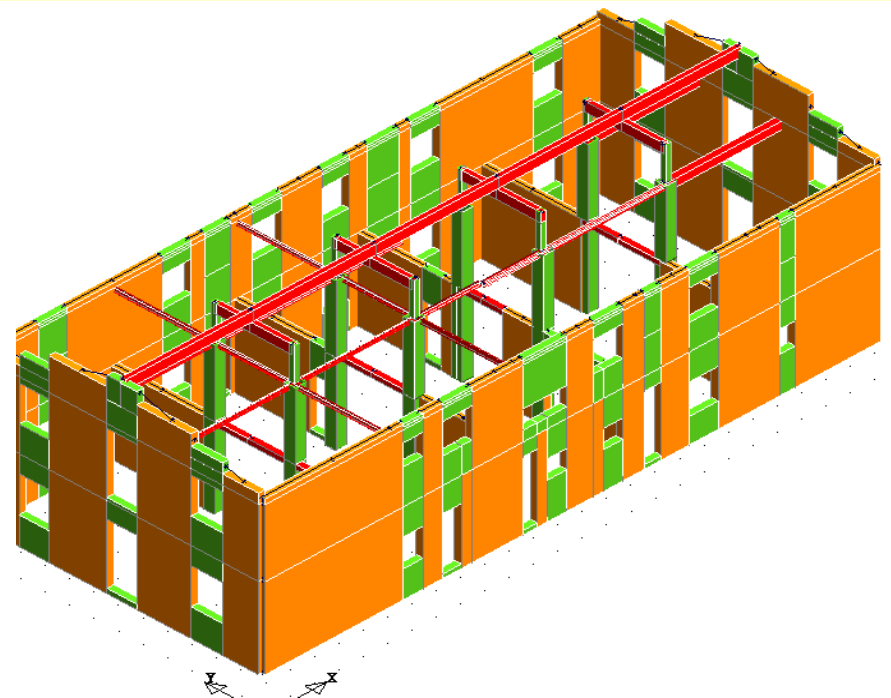
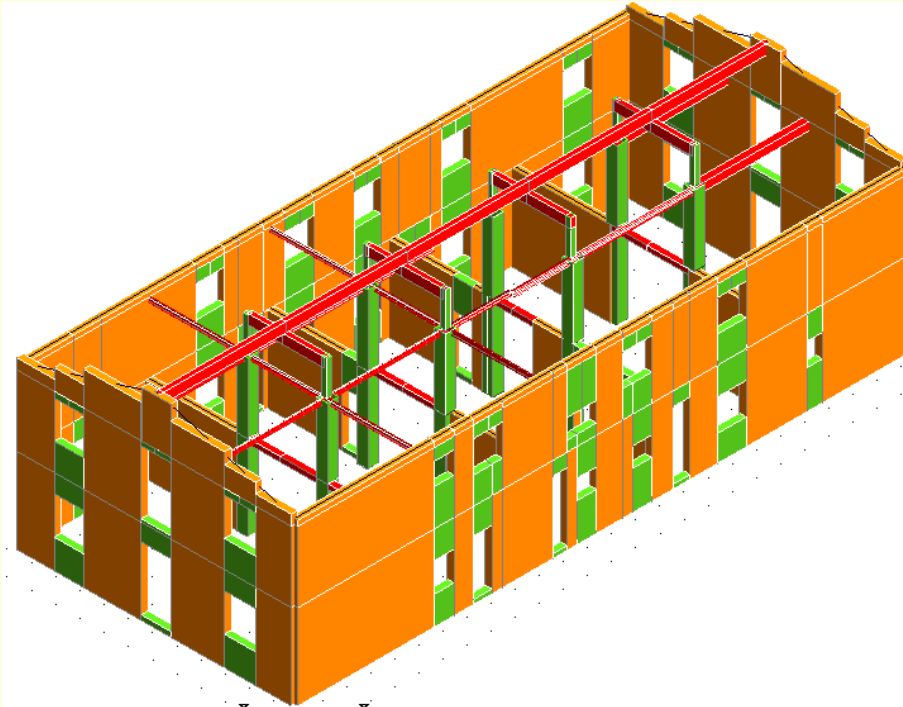
Aperture non allineate



# *Analisi sismica di strutture in muratura*

Modello a telaio equivalente (SAM)

Aperture non allineate



**Horae**

via C. Colombo, 19/p6 - 06127 - Perugia  
tel. 075/5003198 - Fax 075/5004095



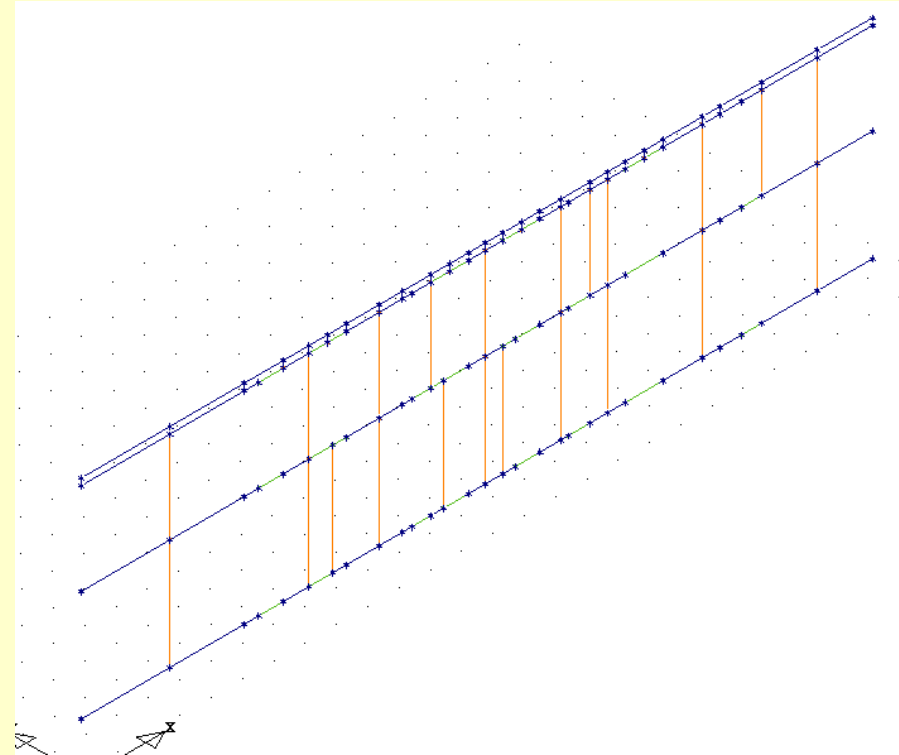
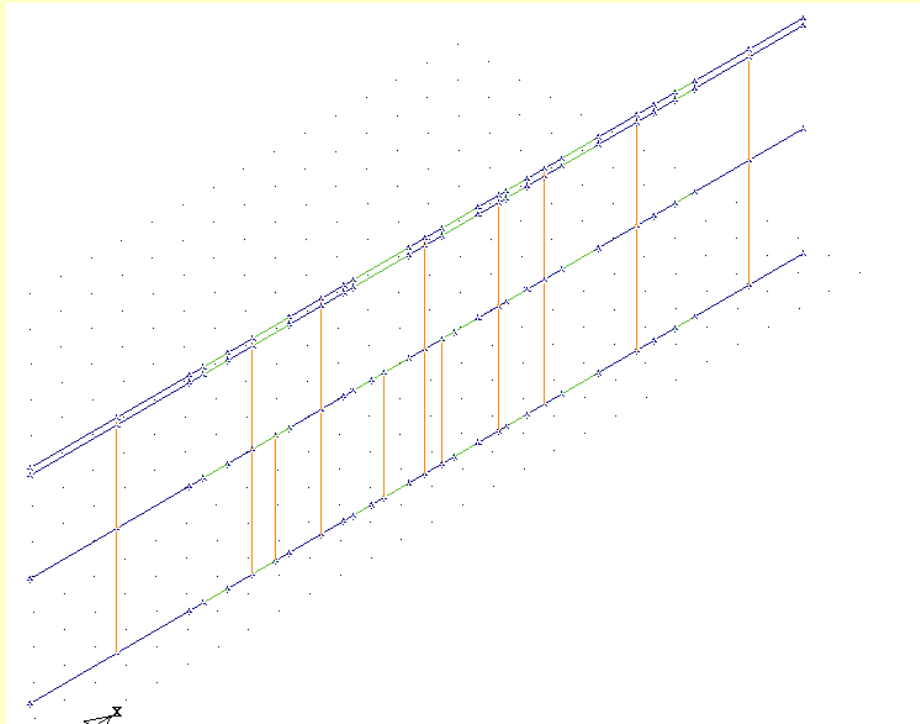
**S.T.S. s.r.l.**

**Software Tecnico Scientifico**

# ***Analisi sismica di strutture in muratura***

**Modello a telaio equivalente (SAM)**

**Aperture non allineate**



**Modello ad aste**  
Horae srl -  
www.horae.it

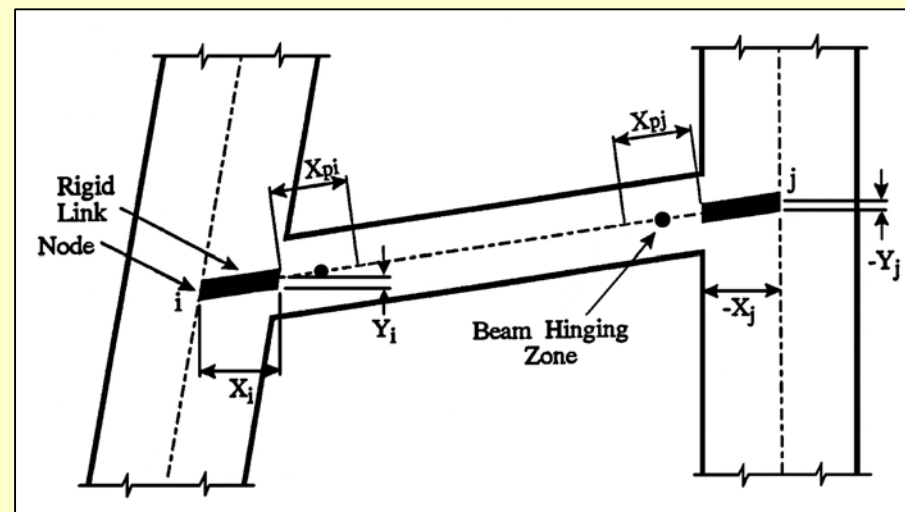
## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Il modello delle aste utilizzato è del tipo a plasticità concentrata con cerniere flessionali ed a taglio a duttilità limitata.



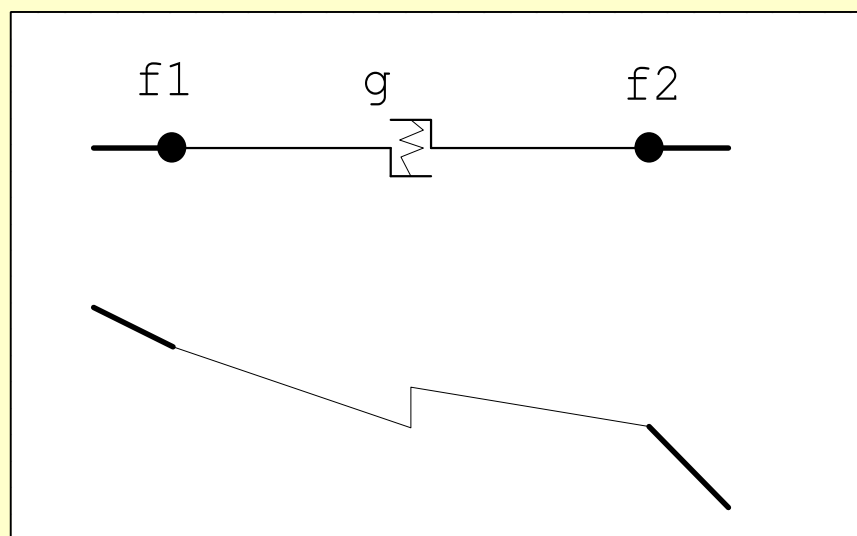
## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

Analisi statica non lineare: Analisi Push-Over

Modello a telaio equivalente (SAM)

Il modello delle aste utilizzato è del tipo a plasticità concentrata con cerniere flessionali ed a taglio a duttilità limitata.



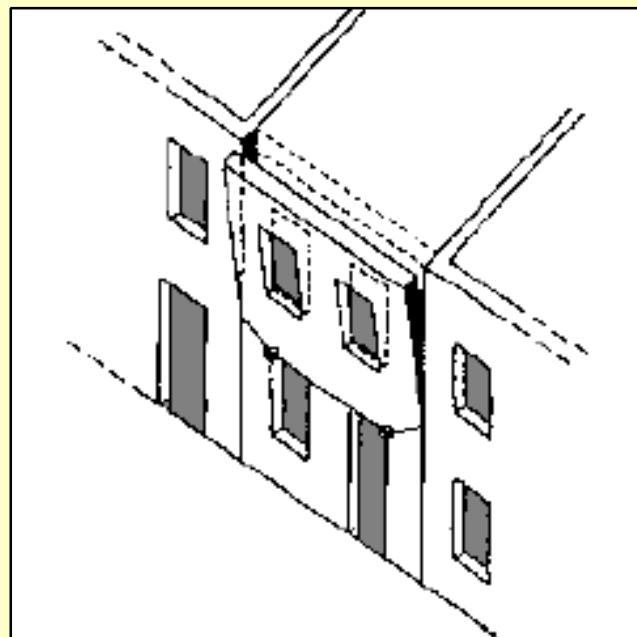


## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale: edifici in muratura**

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



Ribaltamento fuori piano verso l'esterno, rotazione per tutta l'estensione

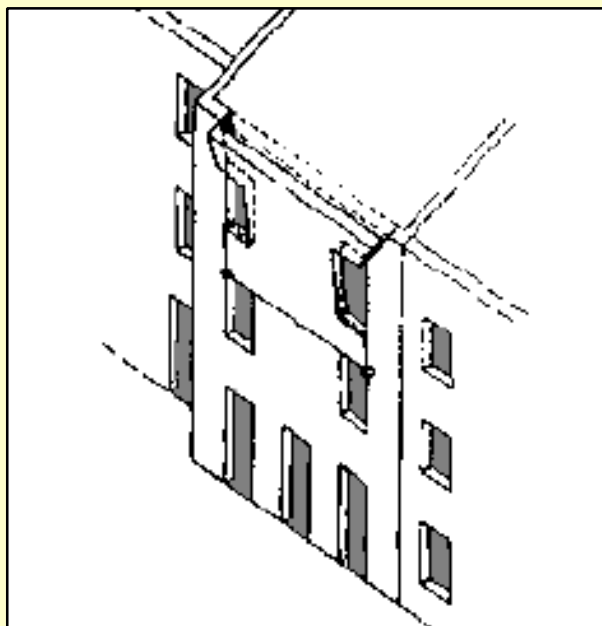


## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



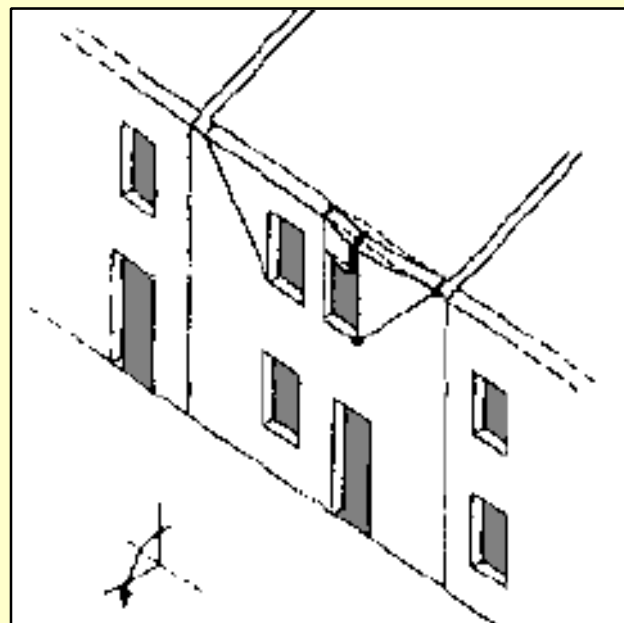
Ribaltamento fuori piano verso l'esterno, rotazione parziale (zona centrale)

## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



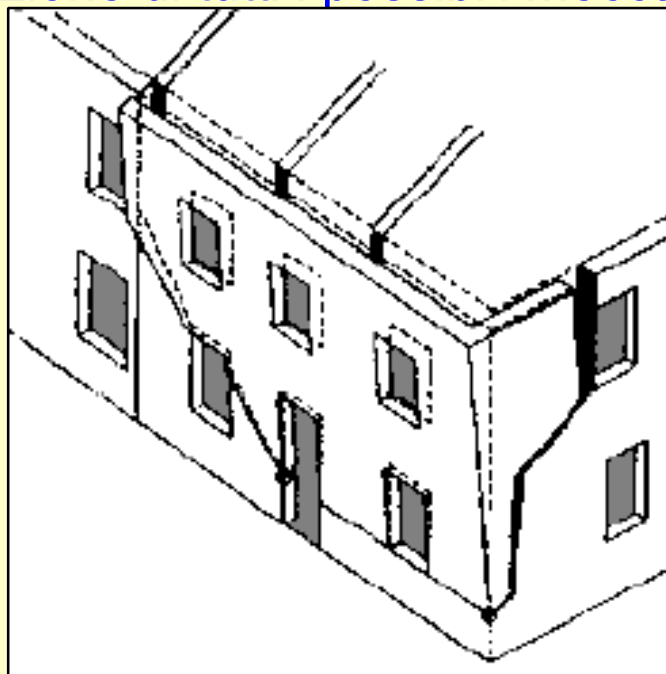
Ribaltamento fuori piano verso l'esterno, rotazione parziale (zona alta)

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



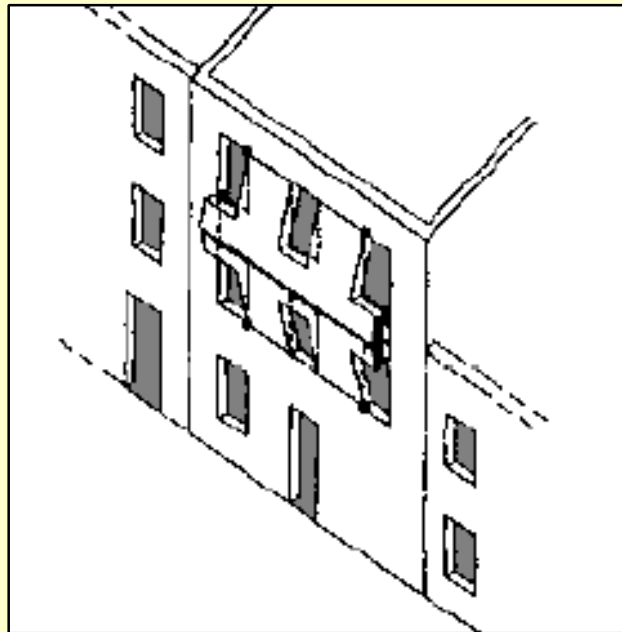
Ribaltamento fuori piano verso l'esterno, con interessamento dell'angolata

## **Valutazione della sicurezza**

**Analisi strutturale: edifici in muratura**

**L'analisi dei meccanismi locali** può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

**Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso**



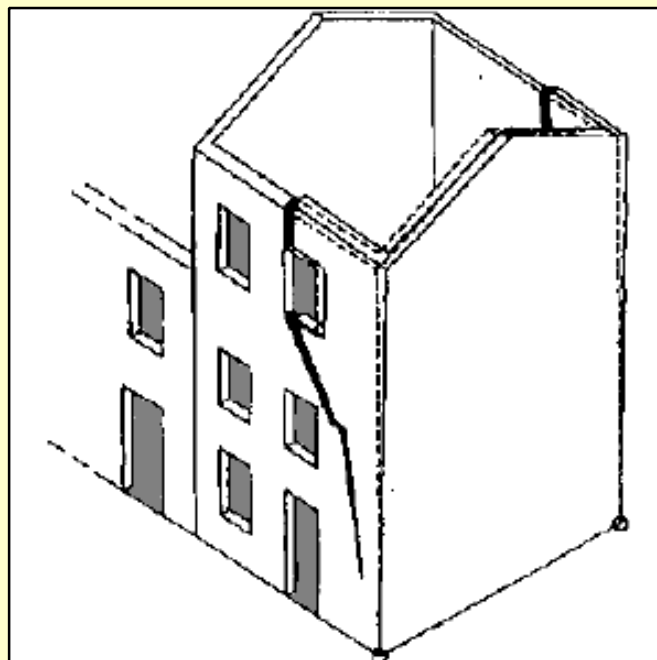
**Ribaltamento fuori piano verso l'esterno, in presenza di vincolo in sommità**

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



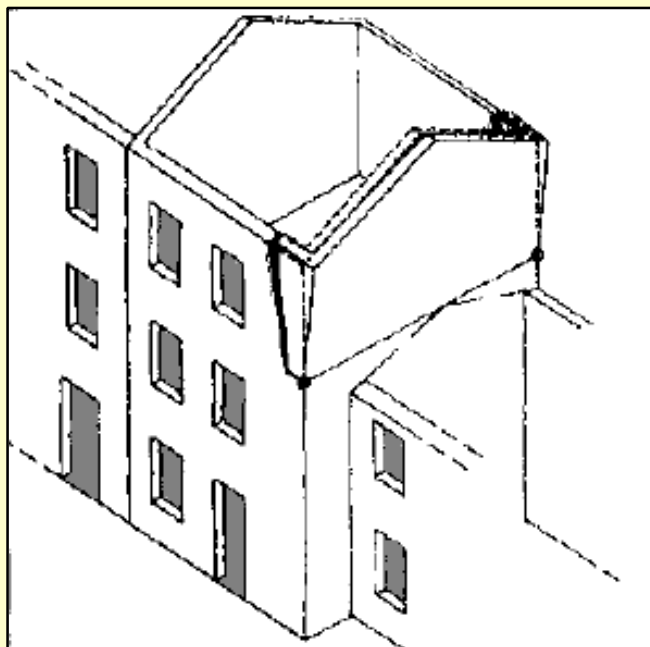
Rotazione globale fuori piano verso l'esterno

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



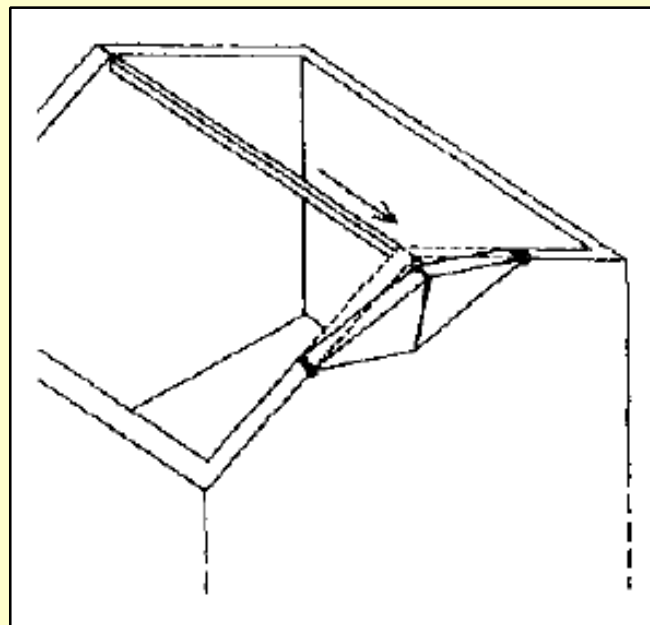
Rotazione parziale fuori piano verso l'esterno

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



Sfondamento del timpano

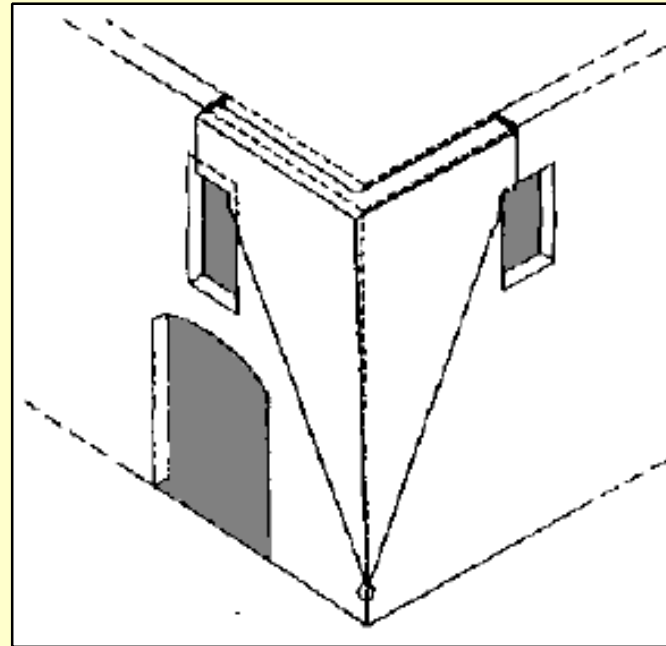


## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



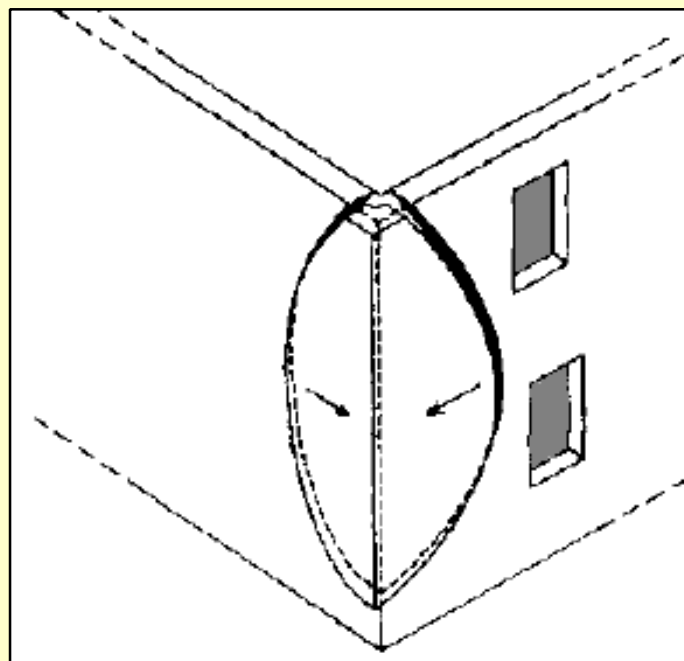
Rotazione angolare verso l'esterno

## **Valutazione della sicurezza**

**Analisi strutturale: edifici in muratura**

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



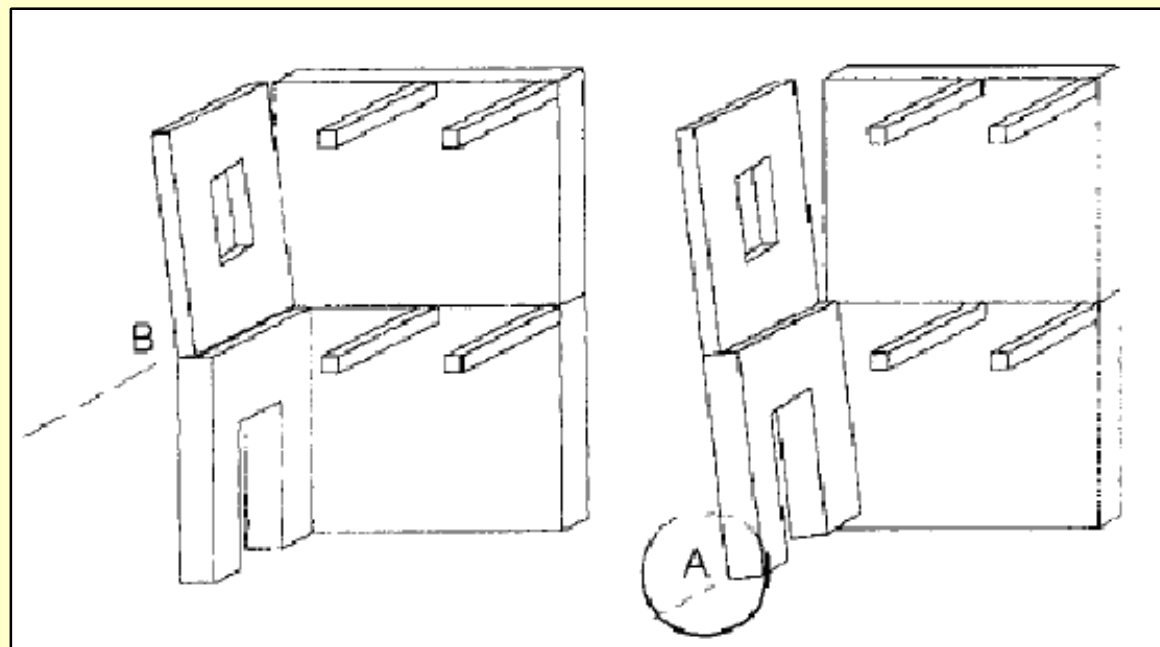
Espulsione con formazione dell'effetto "arco"

## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Richiede l'individuazione di tutti i possibili meccanismi di collasso



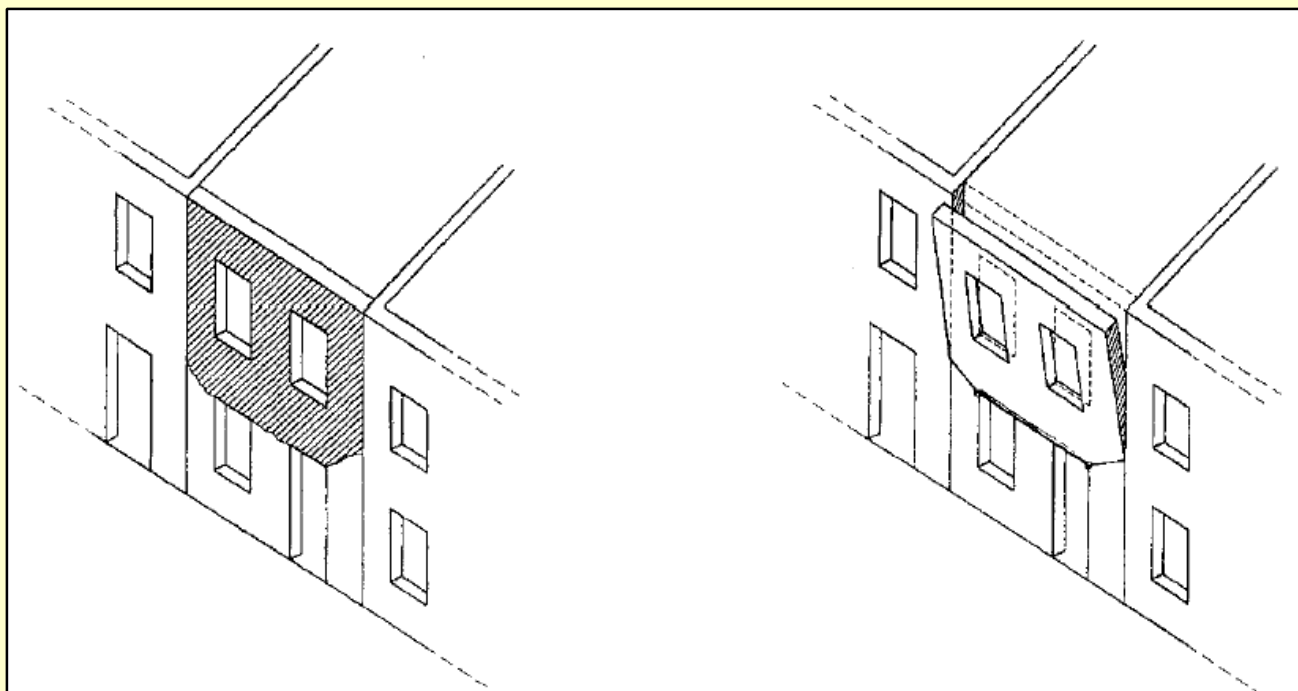
Ribaltamento della parete fuori piano

## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Il meccanismo di collasso è legato allo stato di danno

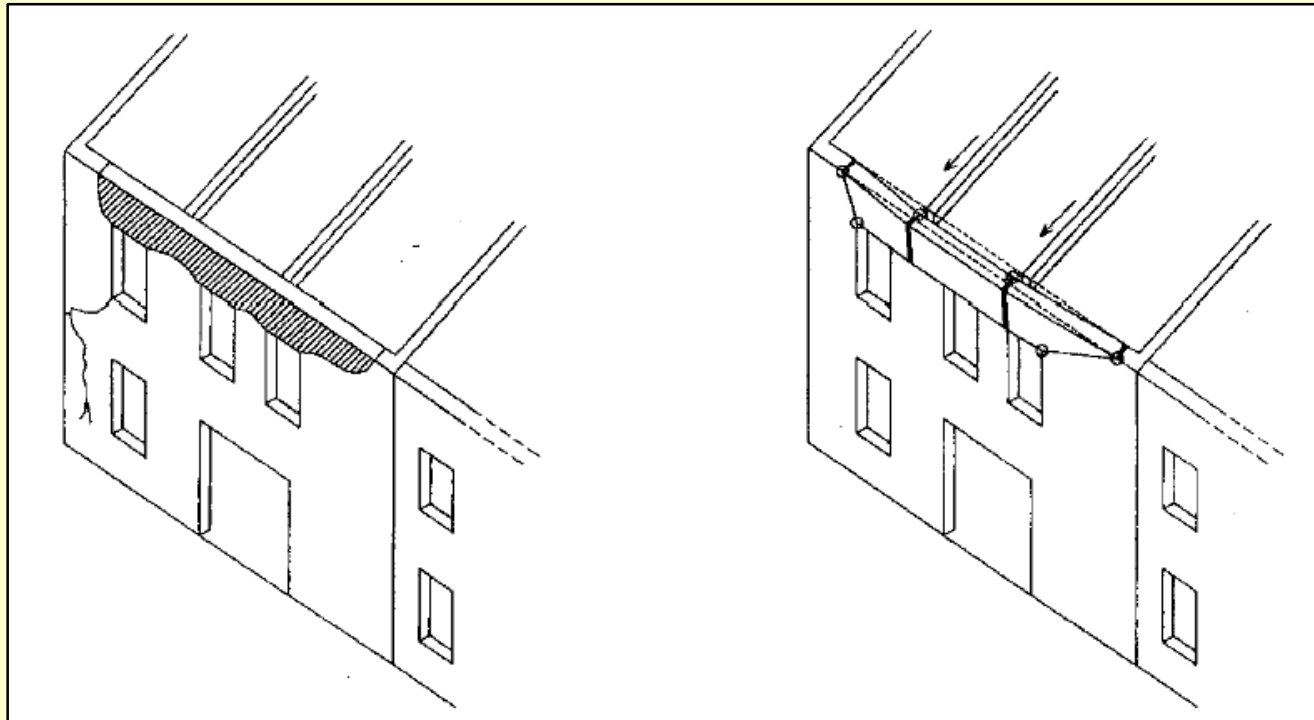


## *Valutazione della sicurezza*

Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Il meccanismo di collasso è legato allo stato di danno

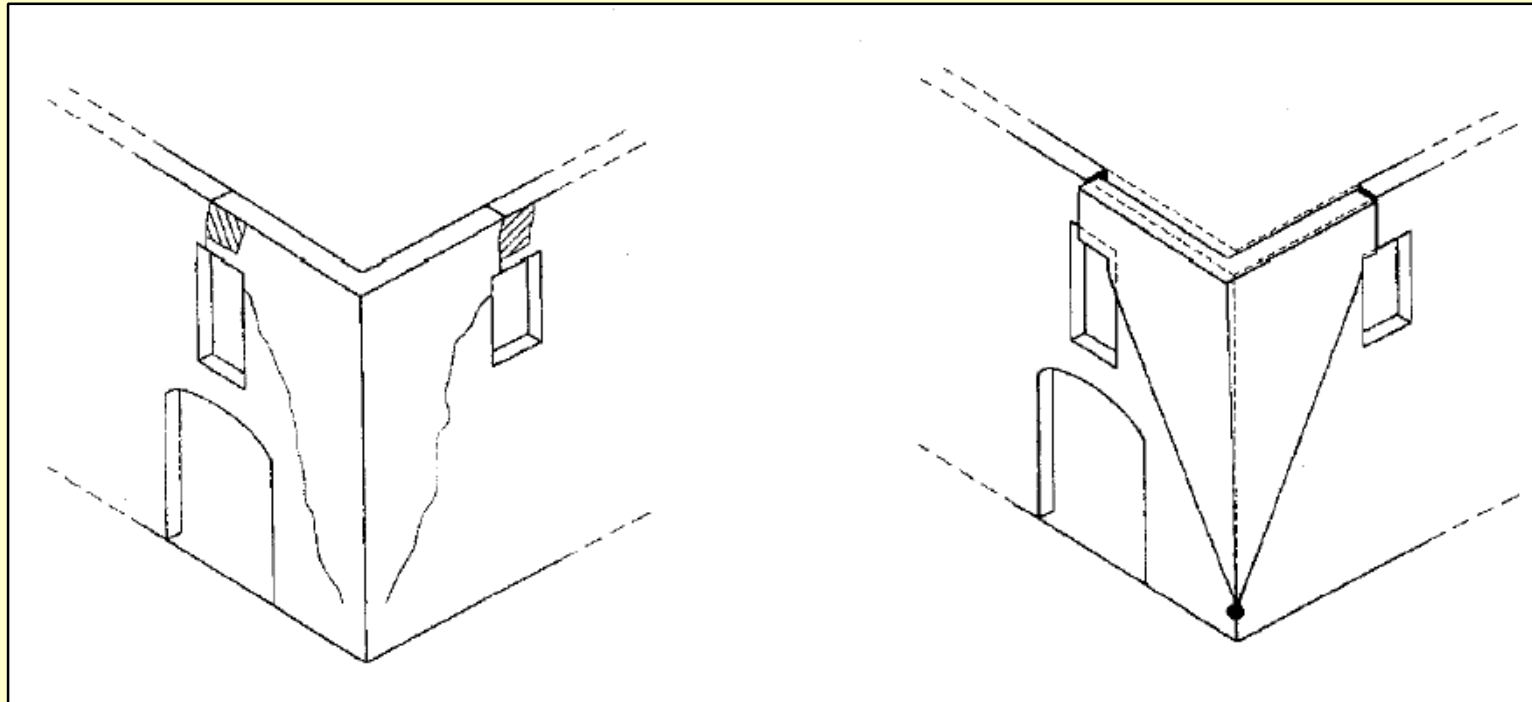


## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Il meccanismo di collasso è legato allo stato di danno

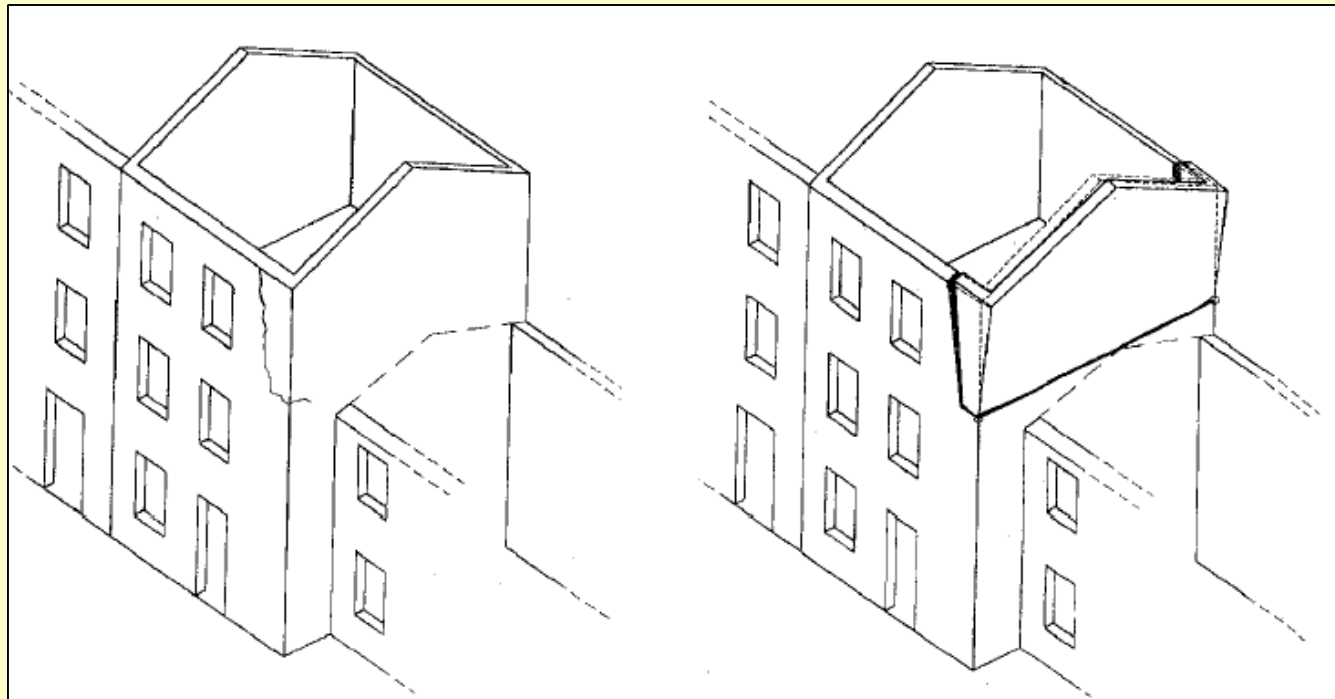


## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale: edifici in muratura**

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

Il meccanismo di collasso è legato allo stato di danno





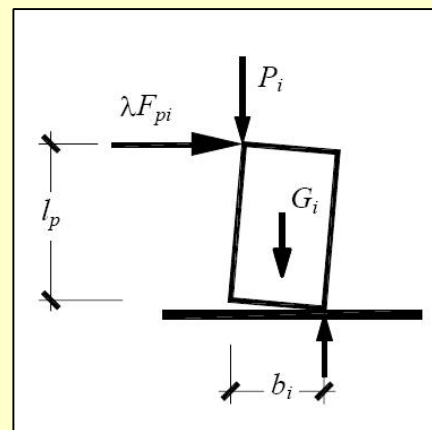
# Valutazione della sicurezza

## Analisi strutturale: edifici in muratura

L'analisi dei meccanismi locali può essere condotta tramite dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie

La soluzione, in termini di massima accelerazione sismica che può essere equilibrata dal sistema, si determina basandosi esclusivamente su considerazioni di equilibrio

$$\lambda_u = \frac{P_i b_i + G_i \frac{b_i}{2}}{F_{pi} l_p}$$





## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in cemento armato o acciaio

La risposta sismica globale può essere valutata tramite:

- Analisi statica lineare
- Analisi dinamica modale lineare
- Analisi statica non lineare (Push-Over)
- Analisi dinamica non lineare

Ai fini delle verifiche di sicurezza, gli elementi strutturali vengono distinti in duttili e fragili

## *Valutazione della sicurezza*

**Analisi strutturale:** edifici in cemento armato o acciaio

Analisi statica lineare : può essere effettuata secondo due differenti modalità:

- Con spettro elastico
- Con fattore di struttura

Analisi statica lineare con spettro elastico

- La verifica degli elementi duttili viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di deformazioni con i rispettivi limiti di deformazione
- La verifica degli elementi fragili viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di forze con le rispettive resistenze

## ***Valutazione della sicurezza***

**Analisi strutturale:** edifici in cemento armato o acciaio

Analisi statica lineare : può essere effettuata secondo due differenti modalità:

- Con spettro elastico
- Con fattore di struttura

Analisi statica lineare con fattore di struttura

- Tutti gli elementi strutturali devono soddisfare la condizione che la sollecitazione indotta dall'azione sismica ridotta sia inferiore o uguale alla corrispondente resistenza
- Gli elementi fragili devono soddisfare la condizione che la sollecitazione indotta dall'azione sismica ridotta per  $q = 1.5$  sia inferiore o uguale alla corrispondente resistenza

## ***Valutazione della sicurezza***

**Analisi strutturale:** edifici in cemento armato o acciaio

Analisi dinamica modale lineare : può essere effettuata secondo due differenti modalità:

- Con spettro elastico
- Con fattore di struttura

valgono le precisazioni già riportate per l'analisi statica lineare

## ***Valutazione della sicurezza***

**Analisi strutturale:** edifici in cemento armato o acciaio

Analisi statica non lineare (Push-Over)

- La verifica degli elementi duttili viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di deformazioni con i rispettivi limiti di deformazione
- La verifica degli elementi fragili viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di forze con le rispettive resistenze

## ***Valutazione della sicurezza***

**Analisi strutturale:** edifici in cemento armato o acciaio

Analisi dinamica non lineare

Si applica secondo le medesime condizioni dell'analisi statica non lineare

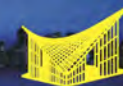


## ***Valutazione della sicurezza***

### **Schede di vulnerabilità sismica**

I dati raccolti ed i risultati ottenuti dall'analisi sono sintetizzati nelle schede di vulnerabilità sismica

Le schede di vulnerabilità rappresentano lo stato dell'edificio e costituiscono la base per successive indagini e per la progettazione di eventuali interventi



# *Valutazione della sicurezza*

## Schede di vulnerabilità sismica

Le schede di vulnerabilità devono contenere:

- Descrizione dell'edificio;
- Rilievo fotografico
- Storia tecnica
- Caratteristiche dei materiali
- Metodo di analisi
- Modello adottato
- Valutazione della vulnerabilità
- Giudizio qualitativo



## *Valutazione della sicurezza*

### Schede di vulnerabilità sismica

Le schede di vulnerabilità devono contenere:

- Descrizione dell'edificio;
- Rilievo fotografico
- Storia tecnica
- Caratteristiche dei materiali
- Metodo di analisi
- Modello adottato
- **Valutazione della vulnerabilità**
- Giudizio qualitativo

# *Valutazione della sicurezza*

## Schede di vulnerabilità sismica

La valutazione della vulnerabilità è fatta attraverso l'indicazione dei valori dell'accelerazione al suolo (PGA Pick Ground Acceleration) che provoca nella struttura il raggiungimento di uno Stato Limite

### Accelerazioni che portano allo S.L. (capacità)

$PGA_{DLO}$  - stima accelerazione che porta allo S.L.O.

$PGA_{DSD}$  - stima accelerazione che porta allo S.L.D.

$PGA_{DLV}$  - stima accelerazione che porta allo S.L.V.

$PGA_{DLC}$  - stima accelerazione che porta allo S.L.C.

# Valutazione della sicurezza

## Schede di vulnerabilità sismica

Le PGA vanno rapportate con quelle aventi fissata probabilità di superamento nel periodo di riferimento

Stato Limite		PVR - Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$
Stati Limite di Esercizio	S.L.O.	81%
	S.L.D.	63%
Stati Limite Ultimi	S.L.V.	10%
	S.L.C.	5%

## **Valutazione della sicurezza**

### Schede di vulnerabilità sismica

Dalle PGA è definita una prima famiglia di indicatori di rischi per i diversi stati limite

$$\alpha_{SLO} = \frac{PGA_{DLO}}{PGA_{81\%}}$$

$$\alpha_{SLD} = \frac{PGA_{DLD}}{PGA_{63\%}}$$

$$\alpha_{SLV} = \frac{PGA_{DLV}}{PGA_{10\%}}$$

$$\alpha_{SLC} = \frac{PGA_{DLC}}{PGA_{5\%}}$$

## **Valutazione della sicurezza**

### Schede di vulnerabilità sismica

Per i sismi definiti dalle PGA così valutate possono essere determinati i corrispondenti periodi di ritorno

Da questi è definita una seconda famiglia di indicatori di rischi per i diversi stati limite

$$\beta_{SLO} = \left( \frac{T_{RLO}}{T_{81\%}} \right)^a$$

$$\beta_{SLD} = \left( \frac{T_{RLD}}{T_{63\%}} \right)^a$$

$$\beta_{SLV} = \left( \frac{T_{RLV}}{T_{10\%}} \right)^a$$

$$\beta_{SLC} = \left( \frac{T_{RLC}}{T_{5\%}} \right)^a$$



# Valutazione della sicurezza

## Schede di vulnerabilità sismica

La valutazione della vulnerabilità è fatta attraverso l'indicazione dei valori dell'accelerazione al suolo (PGA Pick Ground Acceleration) che provoca nella struttura il raggiungimento di uno Stato Limite, dei corrispondenti periodi di ritorno, e degli indicatori di rischio

31) Domanda: valori di riferimento delle accelerazioni e dei periodi di ritorno dell'azione sismica			
Stato limite		Accelerazione (g)	T <sub>RD</sub> (anni)
A	Stato limite di collasso (SLC)	PGA <sub>DLC</sub>  _ . _ _ _	T <sub>RDLC</sub>  _ _ _ _
B	Stato limite di salvaguardia (SLV)	PGA <sub>DLV</sub>  _ . _ _ _	T <sub>RDLV</sub>  _ _ _ _
C	Stato limite di danno (SLD)	PGA <sub>DLD</sub>  _ . _ _ _	T <sub>RDLD</sub>  _ _ _ _
D	Stato limite di operatività (SLO)	PGA <sub>DLO</sub>  _ . _ _ _	T <sub>RDLO</sub>  _ _ _ _

32) Indicatori di rischio			
Stato limite		Rapporto fra le accelerazioni	Rapporto fra i periodi di ritorno elevato ad a
A	di collasso ( $\alpha_{uc}$ )	_ . _ _ _  = (PGA <sub>CLC</sub> /PGA <sub>DLC</sub> )	_ . _ _ _  = (TR <sub>CLC</sub> /TR <sub>DLC</sub> ) <sup>a</sup>
B	per la vita ( $\alpha_{uv}$ )	_ . _ _ _  = (PGA <sub>CLV</sub> /PGA <sub>DLV</sub> )	_ . _ _ _  = (TR <sub>CLV</sub> /TR <sub>DLV</sub> ) <sup>a</sup>
C	di inagibilità ( $\alpha_{ed}$ )	_ . _ _ _  = (PGA <sub>CLD</sub> /PGA <sub>DLD</sub> )	_ . _ _ _  = (TR <sub>CLD</sub> /TR <sub>DLD</sub> ) <sup>a</sup>
D	per l'operatività ( $\alpha_{eo}$ )	_ . _ _ _  = (PGA <sub>CLO</sub> /PGA <sub>DLO</sub> )	_ . _ _ _  = (TR <sub>CLO</sub> /TR <sub>DLO</sub> ) <sup>a</sup>

*Horae*

via C. Colombo,19/p6 - 06127 - Perugia  
tel.075/5003198 - Fax 075/5004095



**STS s.r.l.**  
**Software Tecnico Scientifico**



## ***APPLICAZIONI PRATICHE***

**Modalità di input, calcolo  
strutturale ed output dei  
risultati del software**

***C.D.S. Win***