Corso di Riabilitazione Strutturale

POTENZA, a.a. 2010 – 2011

Strutture in muratura soggette ad azioni sismica. Analisi della sicurezza (1)

Dott. Marco VONA

DiSGG, Università di Basilicata

marco.vona@unibas.it

http://www.unibas.it/utenti/vona/

Analisi della sicurezza

Verifica relativa agli Stati Limite Ultimi (SLU) e di Esercizio (SLE)

Per quanto non diversamente specificato nel presente capitolo, le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della presente norma costituiscono il riferimento anche per le costruzioni esistenti (§ 8.2 NTC 2008)

La valutazione della sicurezza degli costruzioni esistenti in muratura richiede la verifica degli stati limite definiti al § 3.2.1 delle NTC, con le precisazioni riportate al § 8.3 delle NTC …….. (Circolare 2 febbraio 2009, n. 617)

Analisi della sicurezza

7 PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

7.1 REQUISITI NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE

7.2 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E MODELLAZIONE

7.2.1 Criteri generali di progettazione

7.2.2 Caratteristiche generali delle costruzioni

7.2.3 Criteri di progettazione di elementi strutturali "secondari" ed elementi non strutturali

7.2.4 Criteri di progettazione degli impianti

7.2.5 Requisiti strutturali degli elementi di fondazione

7.2.6 Criteri di modellazione della struttura e azione sismica

7.3 METODI DI ANALISI E CRITERI DI VERIFICA

7.3.1 Analisi lineare o non lineare

7.3.2 Analisi statica o dinamica

7.3.3 Analisi lineare dinamica o statica

7.3.4 Analisi non lineare statica o dinamica

7.3.5 Risposta alle diverse componenti dell'azione sismica ed alla variabilità spaziale del moto

7.3.6 Criteri di verifica agli stati limite ultimi

7.3.7 Criteri di verifica agli stati limite di esercizio

7.4 COSTRUZIONI DI CALCESTRUZZO

7.4.1 Generalità

7.4.2 Caratteristiche dei materiali

7.4.3 Tipologie strutturali e fattori di struttura

7.4.4 Dimensionamento e verifica degli elementi strutturali

7.4.5 Costruzioni con struttura prefabbricata

7.4.6 Dettagli costruttivi

.....

7.8 COSTRUZIONI DI MURATURA

7.8.1 Regole generali

7.8.2 Costruzioni in muratura ordinaria

7.8.3 Costruzioni in muratura armata

7.8.4 Strutture miste con pareti in muratura ordinaria o armata

7.8.5 Regole di dettaglio

Analisi della sicurezza

QUANDO DEVE ESSERE CONDOTTA LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA???

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;*

(§ 8.3 NTC 2008)

Analisi della sicurezza

QUANDO DEVE ESSERE CONDOTTA LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA???

- *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 rigidezza*

(§ 8.3 NTC 2008)

Analisi della sicurezza

Sicurezza nei confronti della stabilità (SLU)

*Per la valutazione 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***

Quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi, la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento ……

In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali, purché la totalità delle forze sismiche sia coerentemente ripartita sui meccanismi locali considerati e si tenga correttamente conto delle forze scambiate tra i sottosistemi strutturali considerati

(Circolare 2 febbraio 2009, n. 617)

Analisi della sicurezza

MODELLI DI CAPACITÀ: Pareti murarie

Per le analisi elastiche con il fattore q, i valori di calcolo delle resistenze sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza e per il coefficiente parziale di sicurezza dei materiali

Nel caso di analisi non lineare, i valori di calcolo delle resistenze da utilizzare sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza

Per gli edifici esistenti in muratura la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura potrà essere calcolata con un criterio di rottura per fessurazione diagonale o con un criterio di scorrimento, facendo eventualmente ricorso a formulazioni alternative rispetto a quelle adottate per opere nuove, purché di comprovata validità

MODELLI DI CAPACITÀ: Pareti murarie

Nel caso di muratura irregolare o caratterizzata da blocchi non particolarmente resistenti, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura potrà essere calcolata con la relazione seguente

$$V_t = l \cdot t \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} = l \cdot t \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$

dove: **l** è la lunghezza del pannello, **t** è lo spessore del pannello, $\boldsymbol{\sigma_0}$ è la tensione normale media, $\mathbf{f_{td}}$ e $\mathbf{t_{0d}}$ sono, rispettivamente, i valori di calcolo della resistenza a trazione per fessurazione diagonale e della corrispondente resistenza a taglio di riferimento della muratura, **b** è un coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione, dipendente dalla snellezza della parete (**b = h/l**, non superiore a 1.5 e non inferiore a 1)

Analisi della sicurezza

Sicurezza nei confronti della stabilità (SLU)

Sotto l'effetto della azione sismica di progetto le strutture degli edifici pur subendo danni di grave entità agli elementi strutturali e non strutturali, devono mantenere una residua resistenza e rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali e l'**INTERA CAPACITÀ PORTANTE NEI CONFRONTI DEI CARICHI VERTICALI**

VERIFICA PARETI

VERIFICA ORIZZONTAMENTI

Analisi e verifica per carichi verticali

L'analisi della sicurezza parte dalla verifica per i carichi verticali (SLU)

PARETI

SCHEMA A TELAIO

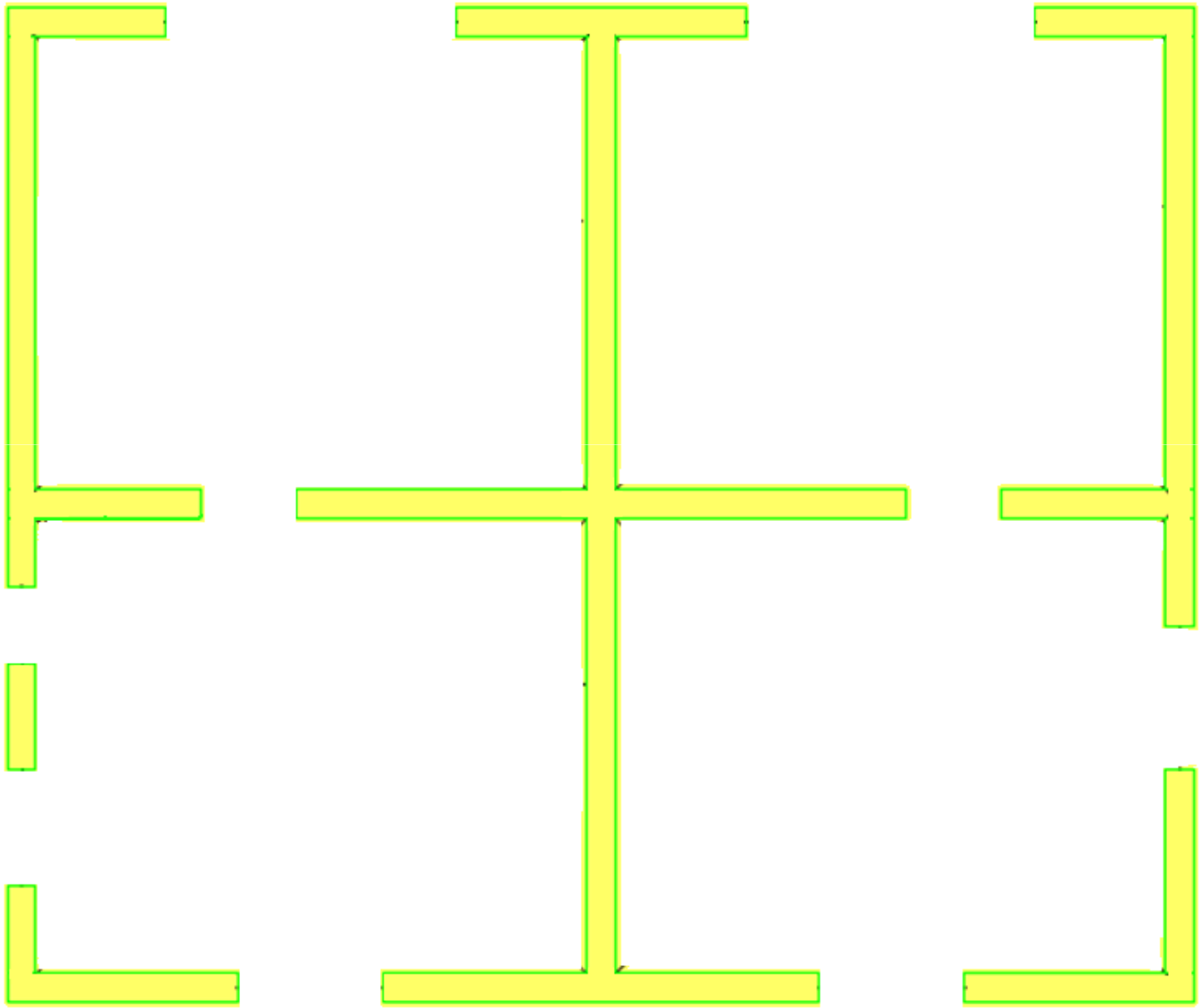
Continuità sui cordoli di piano

Cerniere sui cordoli (schema dell'*articolazione*)

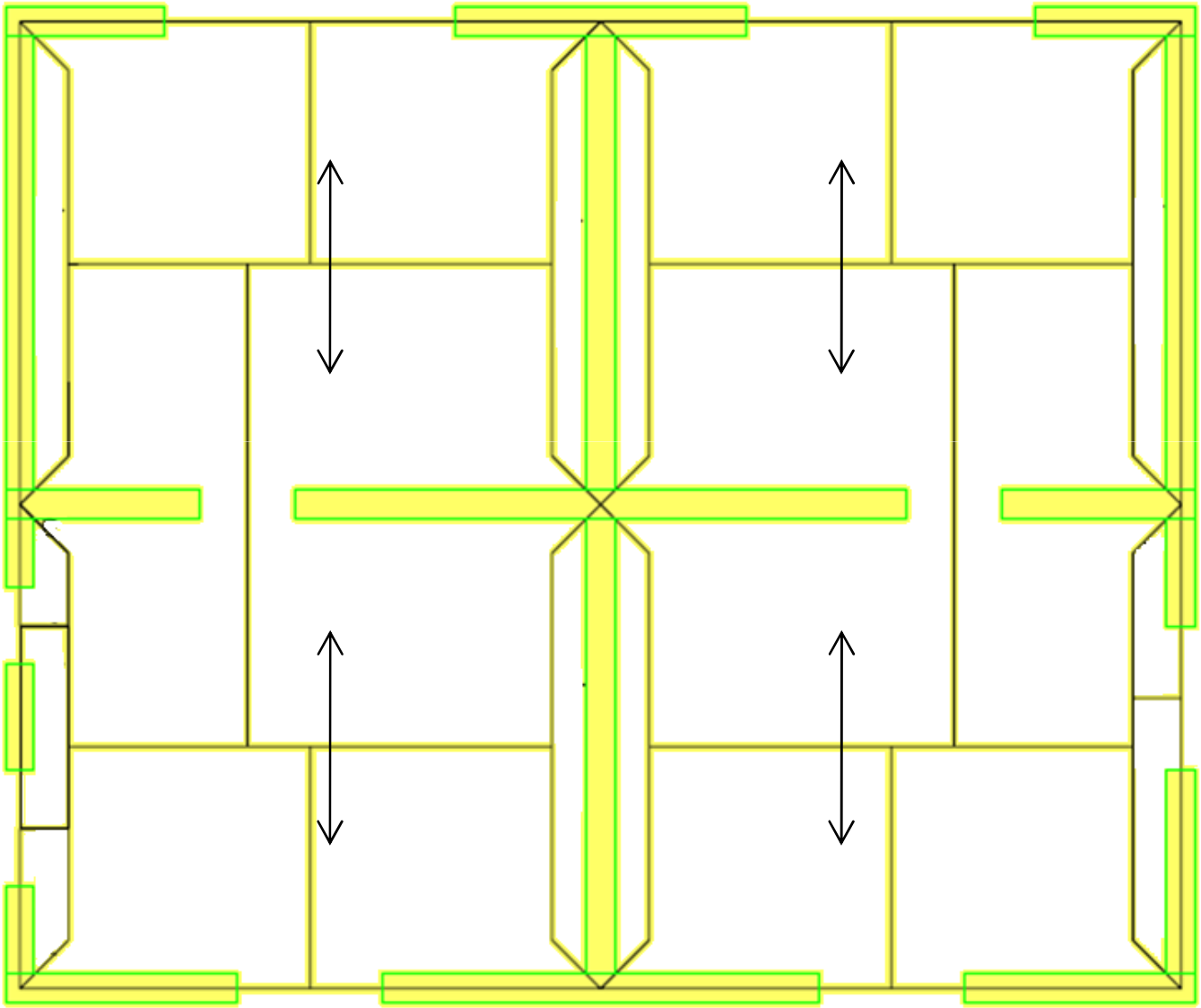
SCHEMA A PARETE

Blocchi rigidi sovrapposti (solai inefficaci)

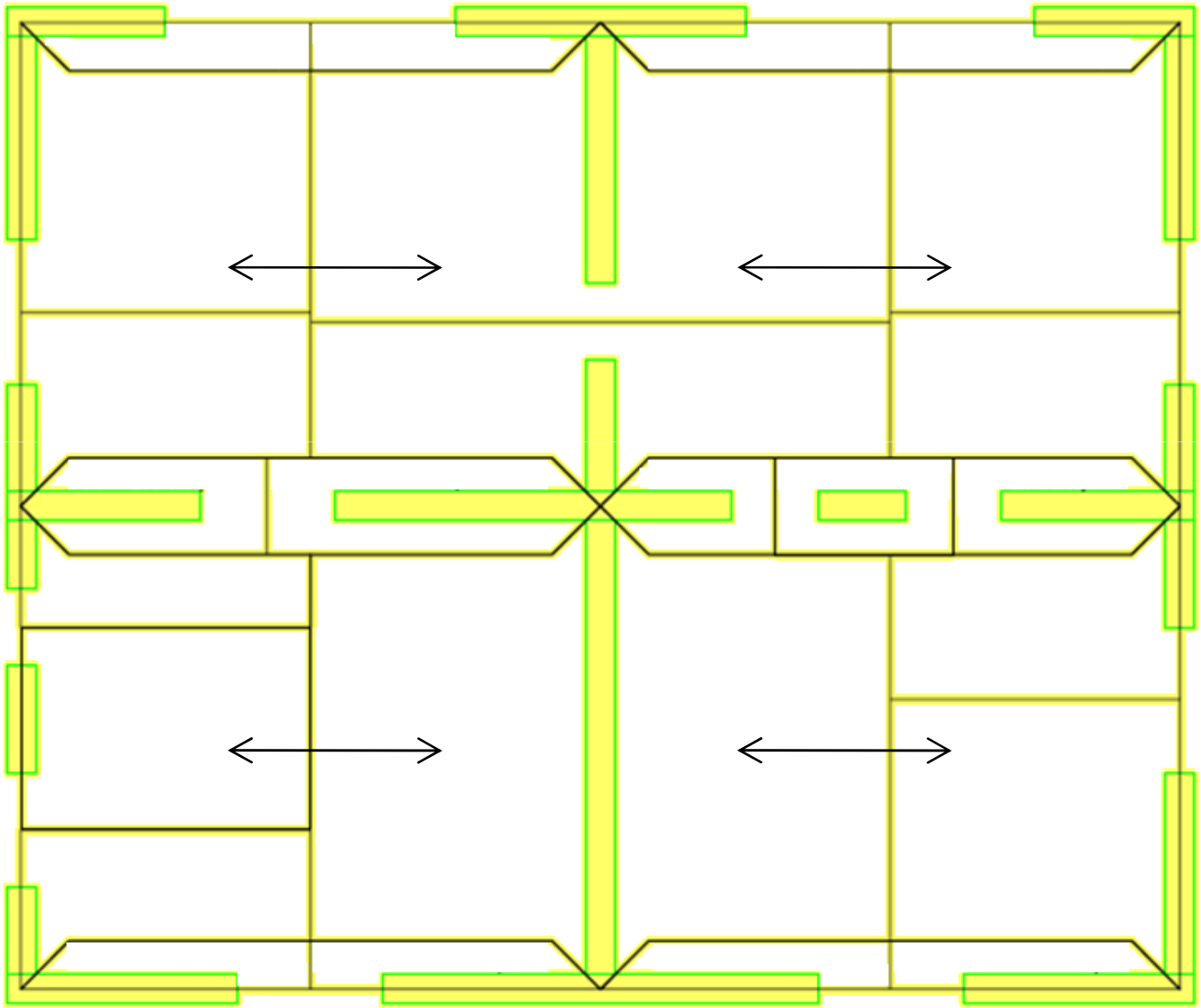
Analisi e verifica per carichi verticali



Analisi e verifica per carichi verticali



Analisi e verifica per carichi verticali



I LIVELLI DI CONOSCENZA E METODI DI ANALISI

		GEOMETRIA	DETTAGLI STRUTTURALI	PROPRIETÀ DEI MATERIALI	Metodi di Analisi	FC
Limitata	LC1	.....	.....	.....	TUTTI	1.35
Adeguata	LC2		.....	.....		1.20
Accurata	LC3		.....	.....		1.00

Metodi di analisi

La risposta strutturale è calcolata usando:

- **ANALISI SEMPLIFICATE**
- **ANALISI LINEARI**, assumendo i valori secanti dei moduli di elasticità
- **ANALISI NON LINEARI**

Ovviamente sia per quanto riguarda le analisi lineari che per quelle non lineari è possibili procedere con analisi **statiche** o **dinamiche**

Per la valutazione di effetti locali è consentito l'impiego di modelli di calcolo relativi a **parti isolate della struttura**

Per il calcolo dei carichi trasmessi dai solai alle pareti e per la valutazione su queste ultime degli effetti delle azioni fuori dal piano, è consentito l'impiego di **modelli semplificati**

Verifiche di sicurezza

ANALISI LINEARE STATICA O DINAMICA

Verifica di ciascun elemento a

- pressoflessione
- taglio/scorrimento
- pressoflessione fuori piano

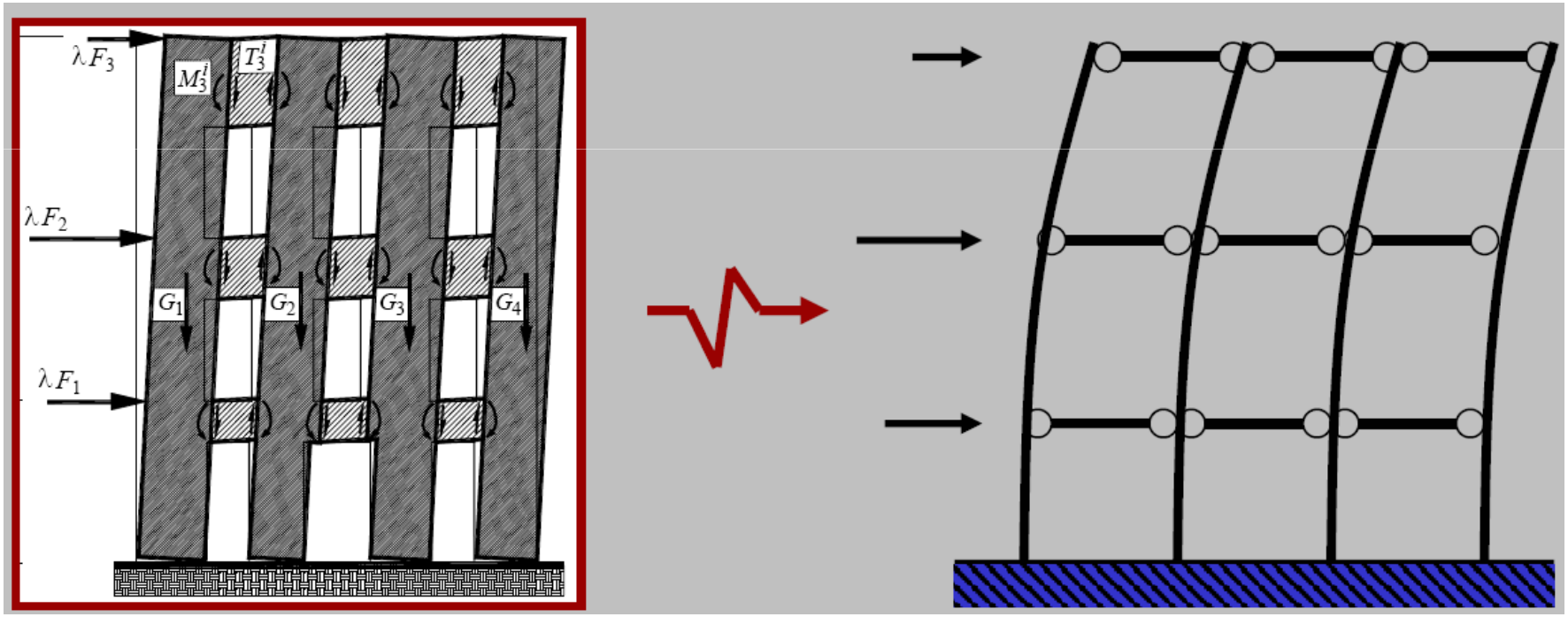
ANALISI NON LINEARE STATICA

Confronto tra la capacità di spostamento ultimo e la domanda di spostamento ottenuta dallo **SPETTRO ELASTICO**, in corrispondenza del periodo di vibrazione calcolato utilizzando la rigidezza secante allo spostamento ultimo

Modelli di calcolo

Modello di calcolo a mensole

È costituito dai soli elementi murari continui dalla base alla sommità, collegati ai soli fini traslazionali alle quote dei solai



Modelli di calcolo

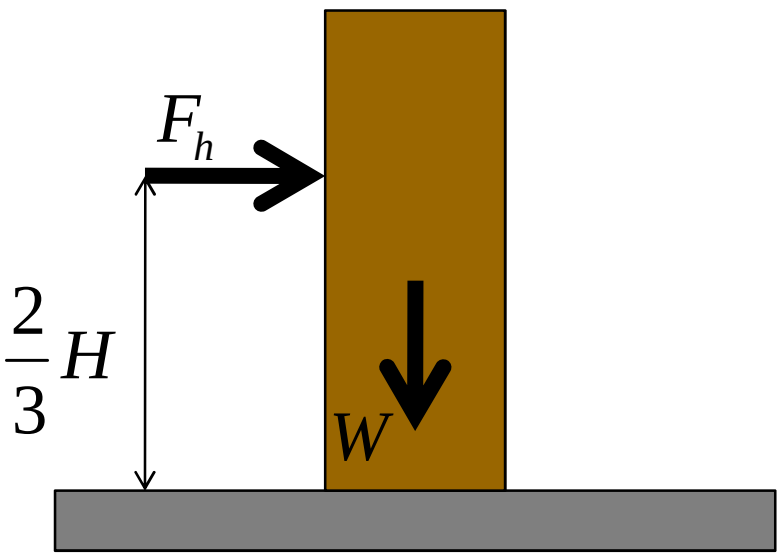
Modello a mensola

È costituito dai soli elementi murari continui dalla base alla sommità, collegati ai soli fini traslazionali alle quote dei solai

$$F_h = \frac{a_g}{g}\frac{2.5}{q} S\lambda l W$$

$$M_h = \frac{2}{3} F_h H = \frac{2}{3}\frac{a_g}{g}\frac{2.5}{q} S\lambda l W$$

$$M_W = \frac{l}{2} W$$



Condizione limite

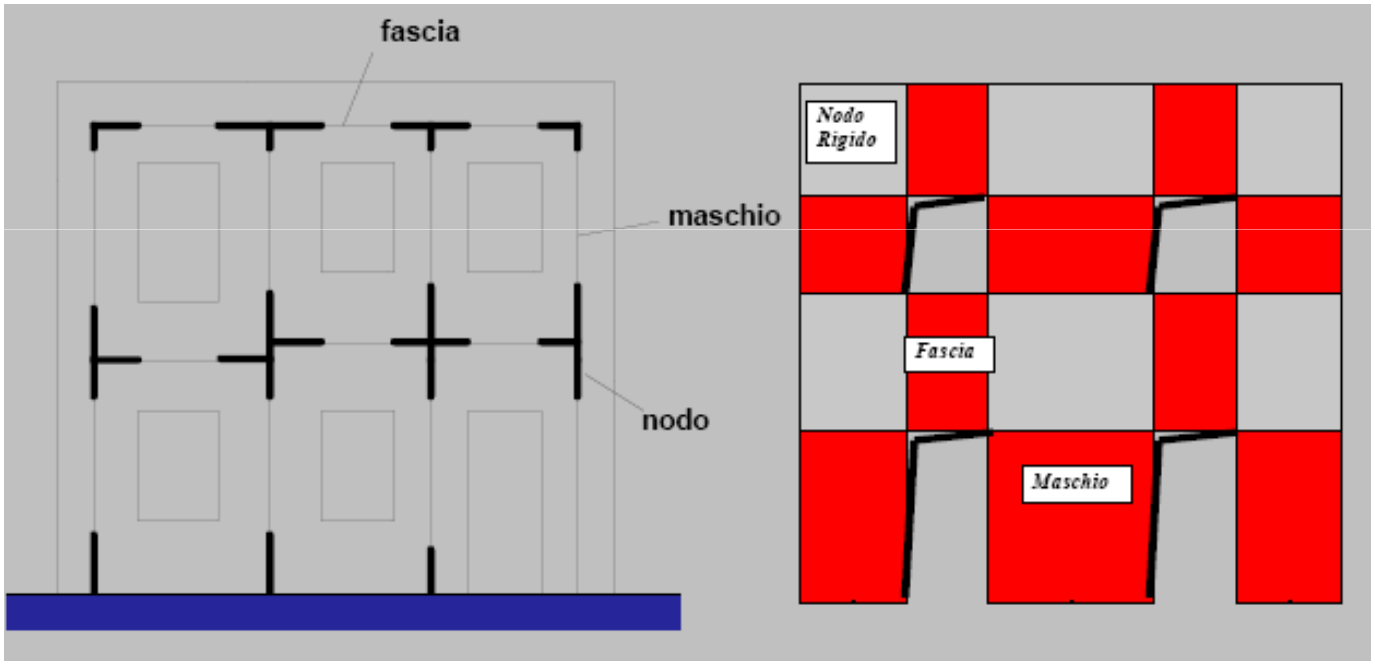
$$M_h = M_W$$

$$\frac{l}{H} = \frac{4}{3}\frac{a_g}{g}\frac{2.5}{q} S\lambda l$$

Modelli di calcolo

Modello di calcolo a telaio

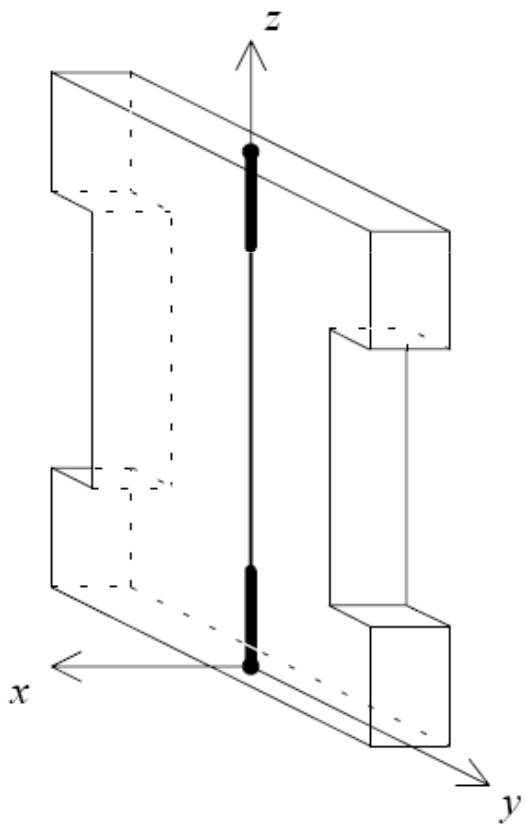
In alternativa si possono considerare anche travi, cordoli in c.a. e/o travi in muratura, a condizione che le verifiche di sicurezza vengano effettuate anche su tali elementi

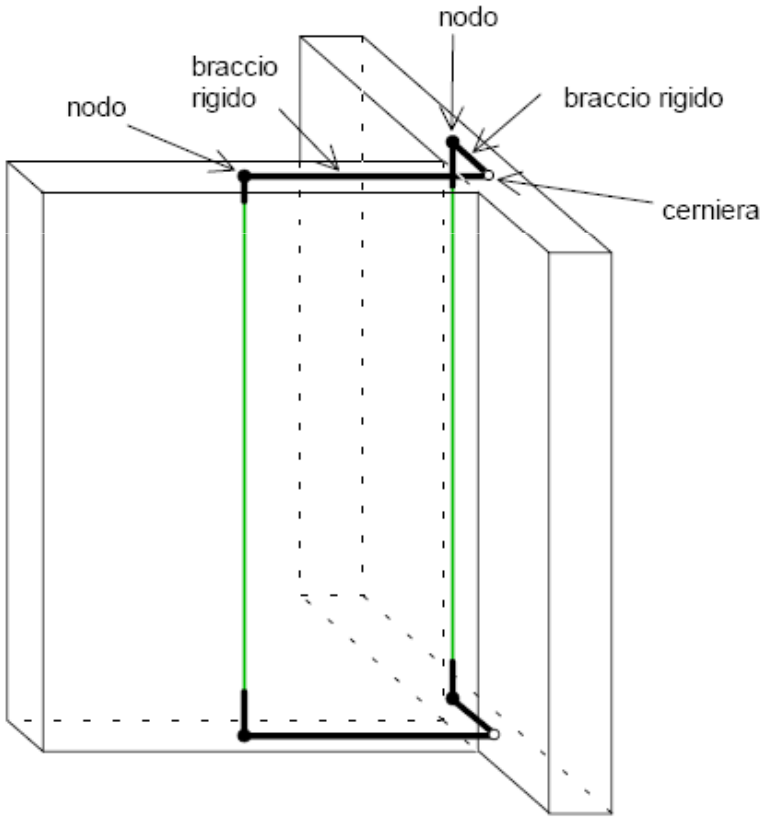


le parti di intersezione tra elementi verticali e orizzontali possono essere considerate infinitamente rigide

Modelli di calcolo

Individuazione degli elementi trave equivalenti

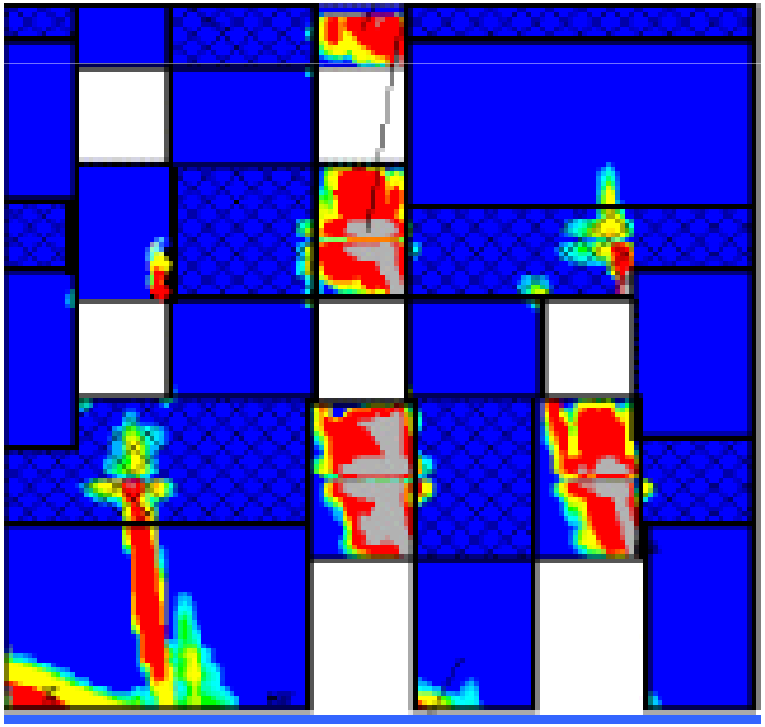




Modelli di calcolo

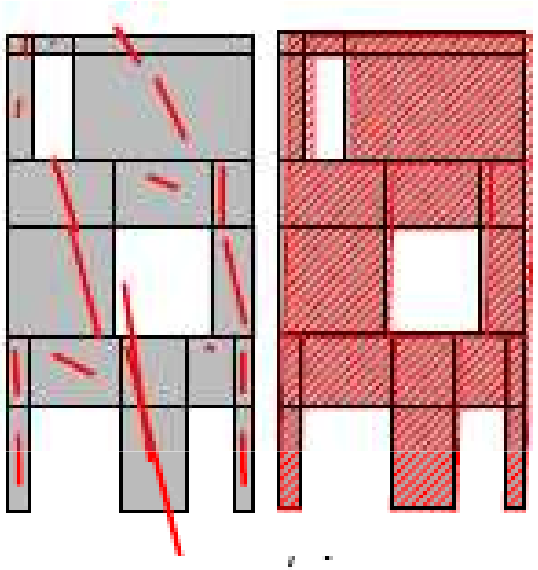
Modellazione analoga all'analisi statica lineare oppure utilizzando modelli non lineari più sofisticati purché adeguatamente documentati

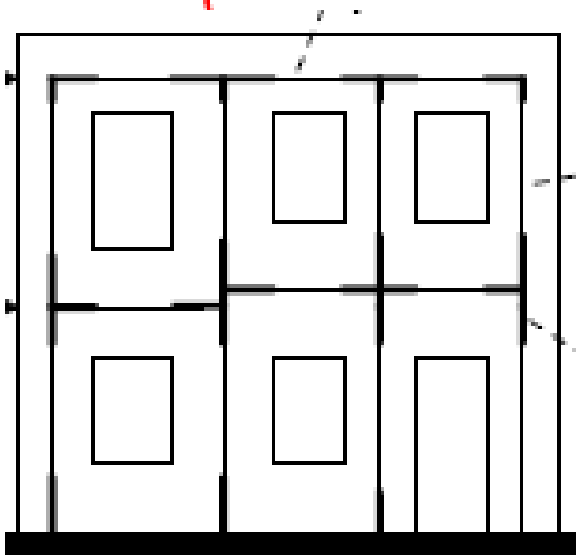
Modelli a elementi finiti

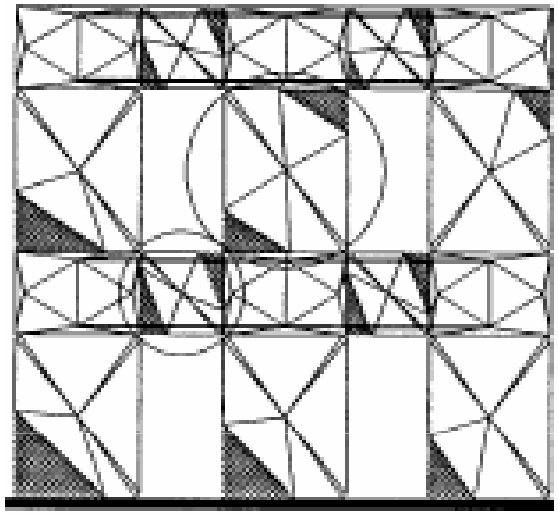


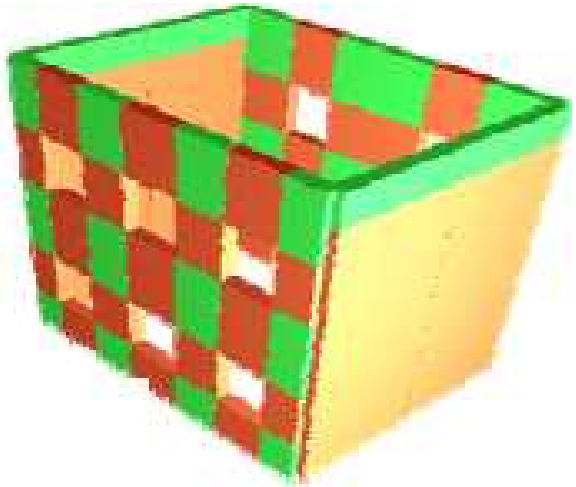
Modelli di calcolo

Modelli a macroelementi









Metodi di analisi: analisi statica lineare

L'**ANALISI STATICA LINEARE** può essere effettuata per costruzioni regolari in altezza, a condizione che il primo periodo di vibrazione, nella direzione in esame, della struttura (T_1) non superi $2.5T_C$ (per gli edifici in muratura è sempre verificato nella pratica)

In assenza di calcoli più dettagliati, T_1 può essere stimato utilizzando la formula:

$$T_1 = 0.05 \; H^{3/4}$$

dove H è l'altezza totale dell'edificio (quota di gronda), in metri, dal piano di fondazione

Metodi di analisi: analisi statica lineare

L'**ANALISI STATICA LINEARE** consiste nell'applicazione di un sistema di forze distribuite lungo l'altezza dell'edificio assumendo una distribuzione lineare degli spostamenti

La forza da applicare a ciascun piano è data dalla formula

$$F_i = F_h \cdot z_i \cdot W_i \,/\, \sum_j z_j W_j$$

dove

$$F_h = S_d(T_1) \cdot W \cdot \lambda / g$$

λ pari a 0.85 se l'edificio ha almeno tre piani e se $T_1 < 2$ TC

λ pari a 1.0 in tutti gli altri casi (per edifici irregolari in altezza $\lambda = 1$ in ogni caso).

Metodi di analisi: analisi statica lineare

Gli effetti torsionali accidentali, per edifici aventi massa e rigidezza simmetricamente distribuite in pianta, possono essere considerati amplificando le forze da applicare a ciascun elemento verticale con il fattore (δ) risultante dalla seguente espressione:

$$\delta = 1 + 0{,}6\, x / L_e$$

x: distanza dell'elemento resistente verticale dal baricentro geometrico dell'edificio, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica considerata

L_e: distanza tra i due elementi resistenti più lontani, misurata allo stesso modo

Ridistribuzione: solai rigidi

In caso di solai rigidi, la distribuzione del taglio nei diversi pannelli di uno stesso piano potrà essere modificata, a condizione che l'equilibrio globale di piano sia rispettato e a condizione che il valore assoluto della variazione del taglio ΔV sia non superiore al maggiore tra:

$$0.25\,|\mathbf{V}| \text{ e } 0.1\,|\mathbf{V}_{\mathbf{piano}}|$$

dove $\mathbf{V}$ è il taglio nel pannello e $\mathbf{V}_{\mathbf{piano}}$ è il taglio totale al piano nella direzione parallela al pannello

Ridistribuzione: solai deformabili

Nel caso di solai deformabili, la ridistribuzione potrà essere effettuata solamente tra pannelli complanari collegati da cordoli o incatenamenti, ovvero appartenenti alla stessa parete

In tal caso, nel calcolo dei limiti per la ridistribuzione, $\mathbf{V_{piano}}$ è da intendersi come la somma dei tagli nei pannelli complanari, ovvero appartenenti alla stessa parete

Metodi di analisi: analisi lineare

ANALISI DINAMICA MODALE

Modellazione e possibilità di ridistribuzione analoghe all'analisi statica lineare

Definizione del fattore di struttura **q**

Modalità costruttive e fattori di struttura

Fattori di struttura q

1. edifici in muratura ordinaria
   - –regolari in elevazione $q = 2.0\ \alpha_u / \alpha_1$
   - –non regolari in elevazione $q = 1.5\ \alpha_u / \alpha_1$

2. edifici in muratura armata
   - –regolari in elevazione $q = 2.5\ \alpha_u / \alpha_1$
   - –non regolari in elevazione $q = 2.0\ \alpha_u / \alpha_1$
   - –progettati secondo i principi della gerarchia delle resistenze $q = 2.0\ \alpha_u / \alpha_1$

Modalità costruttive e fattori di struttura

α_1 è il moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale, mantenendo costanti le altre azioni, il primo pannello murario raggiunge la sua resistenza ultima ultima

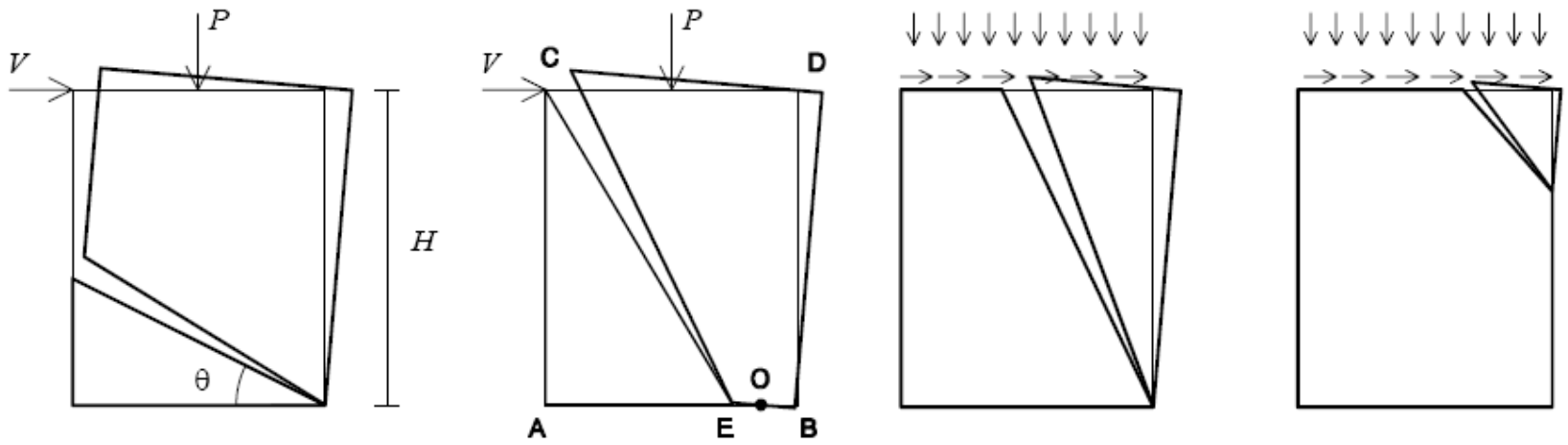
α_u è il 90% del moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale, mantenendo costanti le altre azioni, l'edificio raggiunge la massima forza resistente

α_u / α_1 può essere calcolato per mezzo di un'analisi statica non lineare e non può in ogni caso essere assunto superiore a 2.5

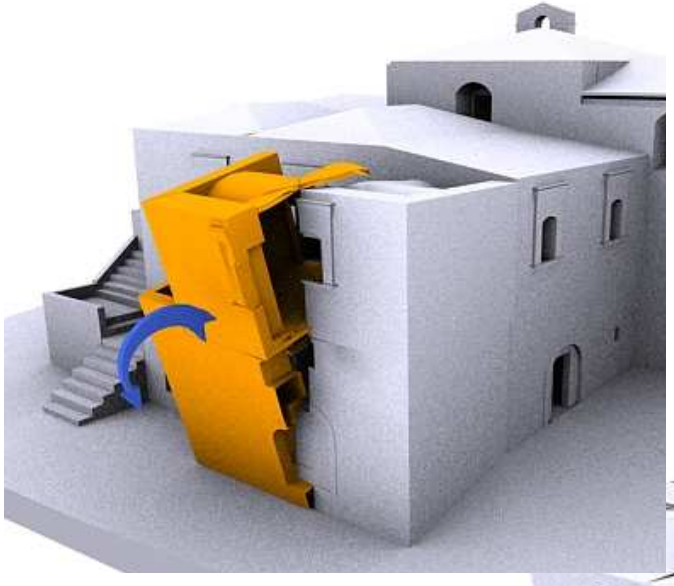
Metodi di analisi NON lineare

Una prima distinzione individua i modelli basati sull'**analisi limite**, in cui ci si limita al calcolo del carico di collasso e del relativo meccanismo

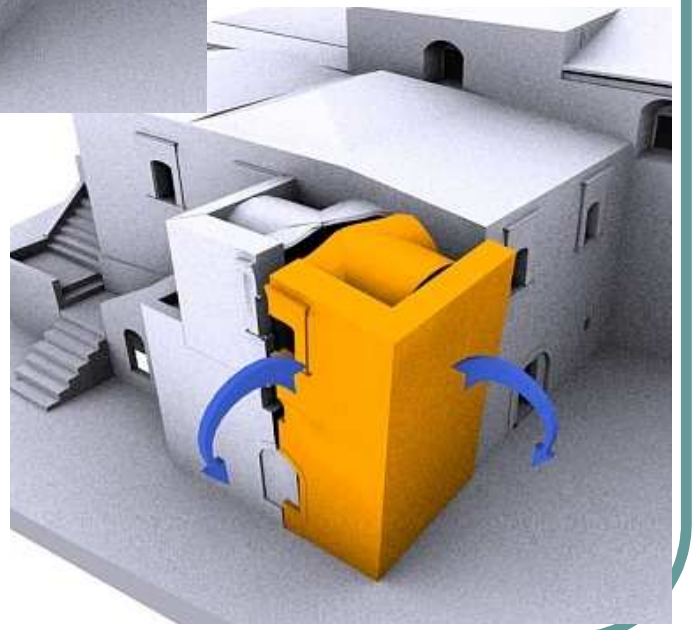
In tali modelli non si studia la deformabilità della struttura in fase elastica e post-elastica, in quanto ci si riconduce in sostanza ad uno studio di equilibri e cinematismi di corpi rigidi

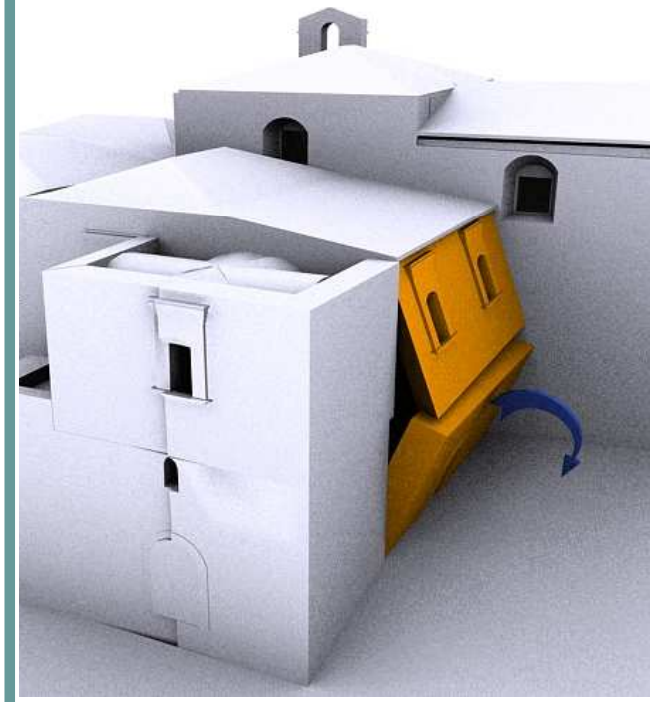


Meccanismi 1



Meccanismi 2





Meccanismo 3

Metodi di analisi NON lineare

Metodo POR

Modelli con elementi monodimensionali con deformazione a taglio

In questo ambito sono stati proposti sia elementi a rigidezza variabile (basata sul calcolo in sezione parzializzata, Braga e Dolce, 1982) che elementi a rigidezza costante in fase elastica, a cui segue una fase di deformazione plastica (Tomaževic, 1978, Dolce, 1989, Tomaževic e Weiss, 1990)

In quest'ultimo caso la non linearità del comportamento è innescata dal raggiungimento di una condizione limite di resistenza

SI IPOTIZZA IN GENERE UN MECCANISMO DI PIANO

Metodi di analisi NON lineare

Metodo POR

I limiti principali del metodo POR, nella sua versione originale (Tomaževic, 1978 e DT2, 1978), consistevano :

a) nel considerare i maschi murari come unica sede di deformazioni e di rotture, senza valutare l'eventualità della rottura di altri elementi quali le fasce

b) nell'ipotizzare un solo possibile meccanismo di rottura dei maschi murari (rottura per taglio con fessurazione diagonale), trascurando le rotture per ribaltamento o per scorrimento

Successive proposte di miglioramento del metodo hanno ovviato ad alcuni inconvenienti in modo piuttosto agevole introducendo opportuni criteri di rottura aggiuntivi

Metodi di analisi NON lineare

Metodo POR

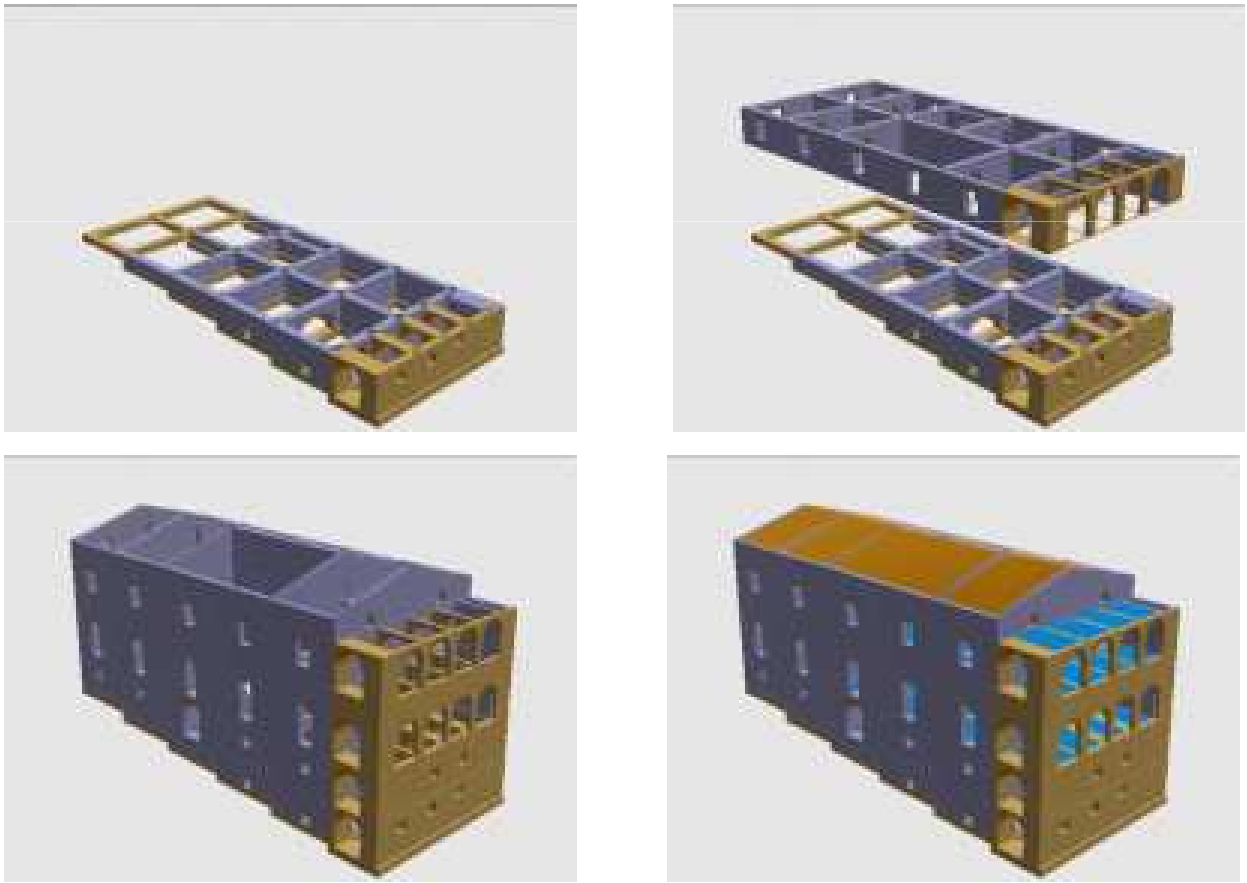
Tuttavia non è stato possibile ovviare in modo soddisfacente al limite, relativo al modello strutturale d'insieme

Il modello basato sull'ipotesi di **meccanismo di piano** esegue una analisi non lineare taglio-spostamento separatamente per ogni interpiano definito

Tale approccio, che ***semplifica enormemente i calcoli***, non può tuttavia prendere in considerazione il problema del calcolo delle sollecitazioni delle fasce se non facendo eventualmente ricorso a calcoli molto approssimati

Metodo POR

Esempio



Metodi di analisi NON lineare

Metodo POR

L'analisi taglio-spostamento di piano richiede delle ipotesi sul grado di vincolo esistente alle estremità dei maschi

Tale grado di vincolo dipende da rigidezza e resistenza degli elementi orizzontali di accoppiamento (fasce murarie e/o cordoli in c.a.), sollecitati in modo crescente al crescere delle forze sismiche orizzontali e suscettibili di fessurazione o rottura

Questi fenomeni possono essere valutati in modo accurato solamente con un'analisi globale di parete multipiano o di edifici

Metodi di analisi NON lineare

ANALISI GLOBALE

L'analisi globale dell'edificio è l'unica possibilità per evitare violazioni degli equilibri globali e locali

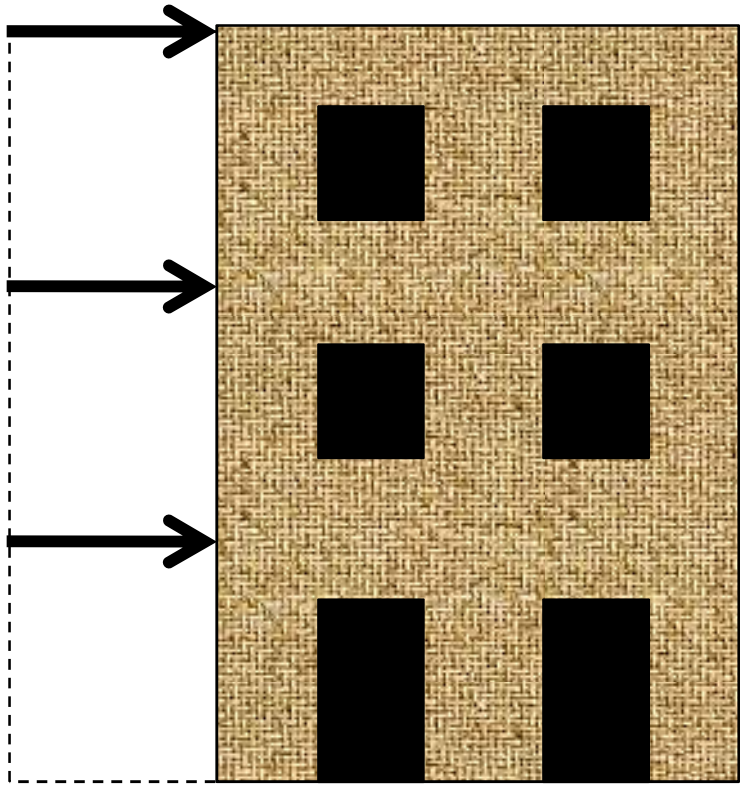
Una analisi separata piano per piano non può rendere conto delle variazioni di azione assiale nei maschi murari al crescere delle forze sismiche, che possono influire sulla rigidezza ma soprattutto sulla resistenza dei maschi murari

Modelli POR (ad es. POR90)

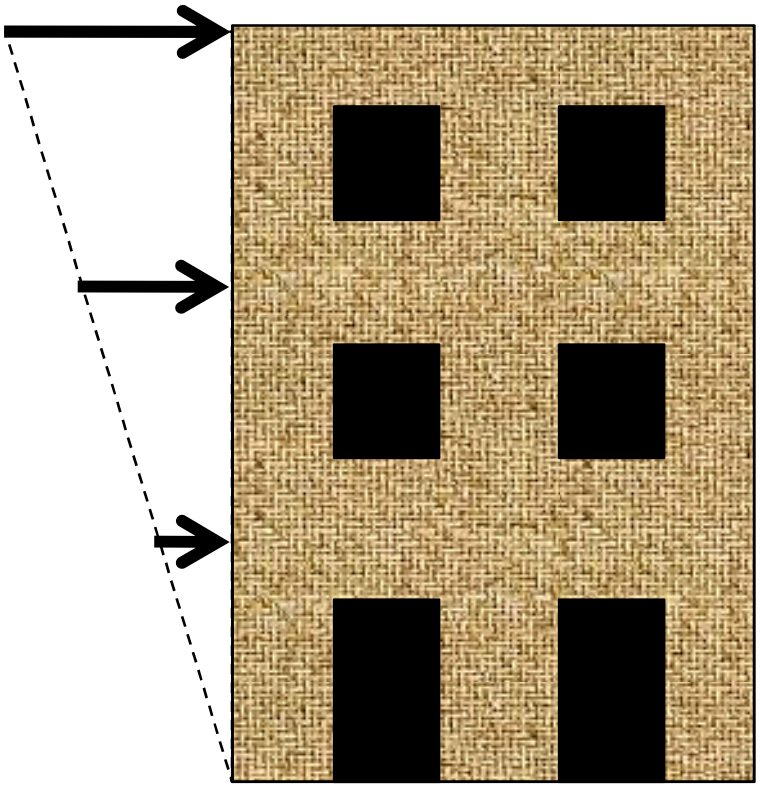
Applicabili a edifici fino a 2 piani modelli con MECCANISMI DI PIANO

Metodi di analisi: analisi statica NON lineare

Distribuzione delle forze orizzontali



forze proporzionali alle masse

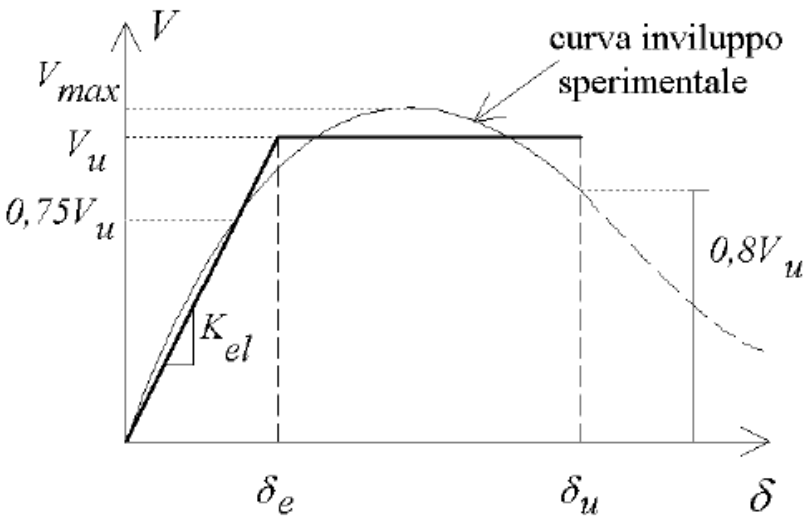


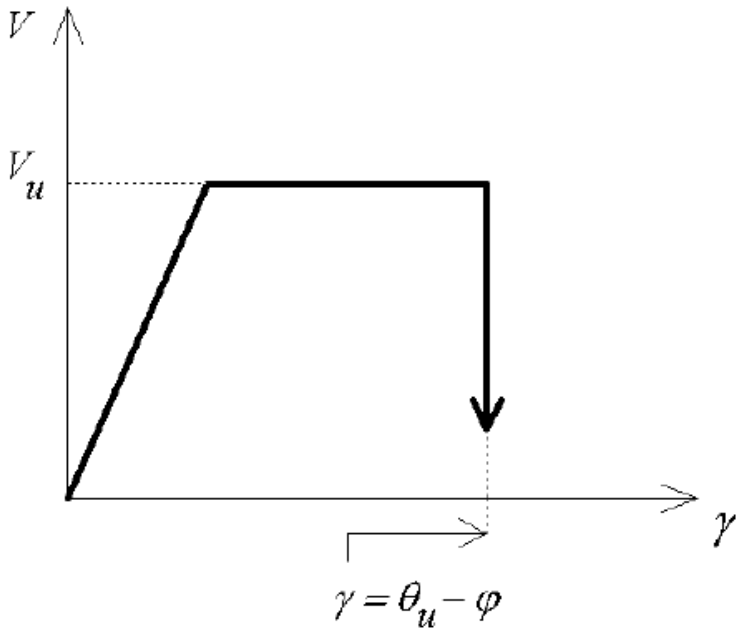
forze proporzionali a quelle da utilizzarsi per l'analisi statica

Metodi di analisi NON lineare

Maschi murari

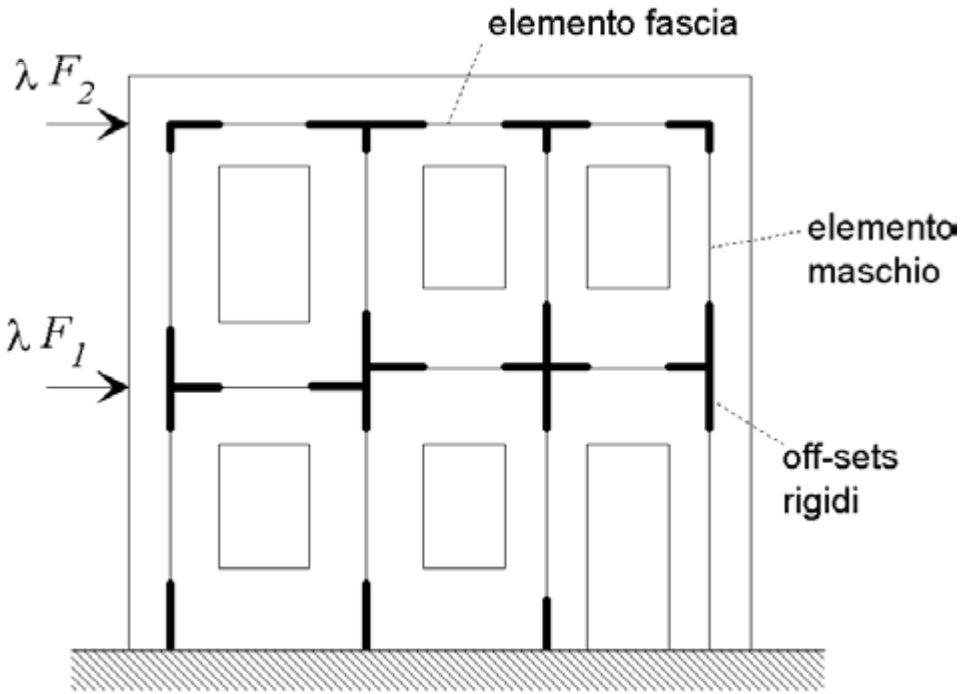
Potranno essere caratterizzati da un comportamento bilineare elastico perfettamente plastico, con resistenza di snervamento equivalente e spostamenti di snervamento e ultimo definiti attraverso la risposta flessionale e a taglio





Maschi murari

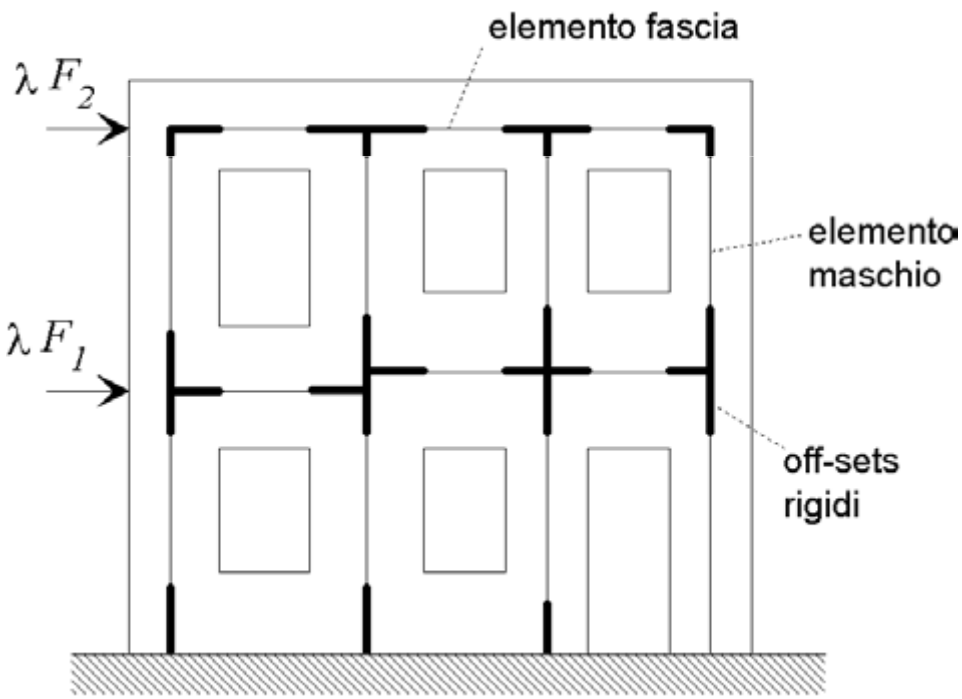
Se la geometria della parete e delle aperture è sufficientemente regolare, è possibile idealizzare una parete muraria mediante un telaio equivalente costituito da elementi maschio (ad asse verticale), elementi fascia (ad asse orizzontale), elementi nodo



Maschi murari

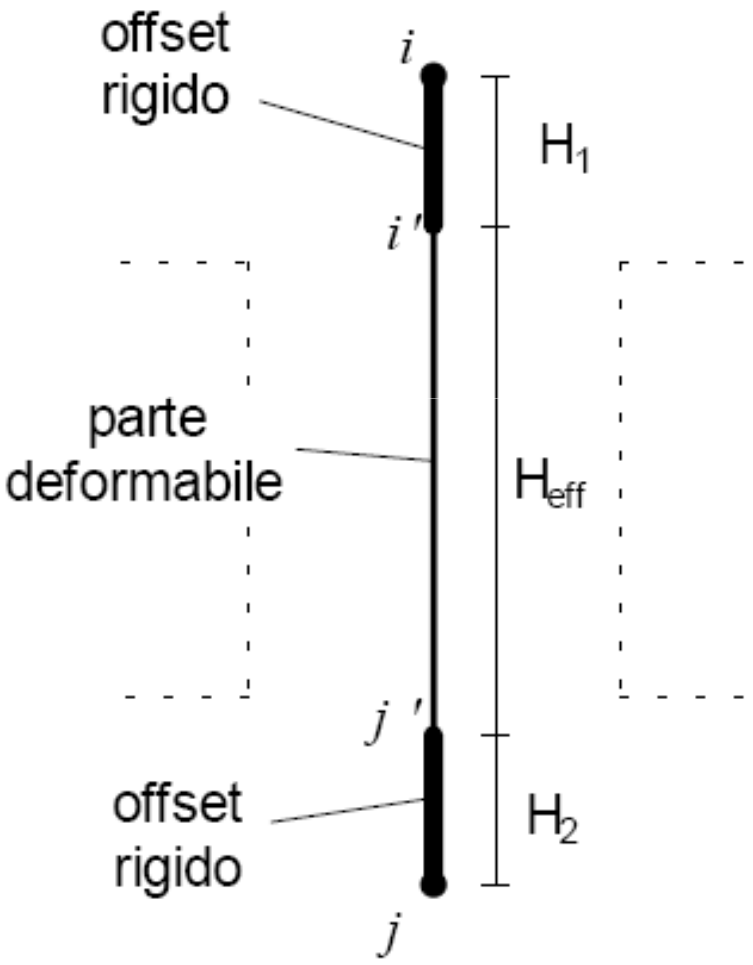
Gli elementi maschio e gli elementi fascia vengono modellati come elementi di telaio ("beam-column") deformabili assialmente e a taglio

Se si suppone che gli elementi nodo siano infinitamente rigidi e resistenti, è possibile modellarli numericamente introducendo opportuni bracci rigidi (offsets) alle estremità degli elementi maschio e fascia



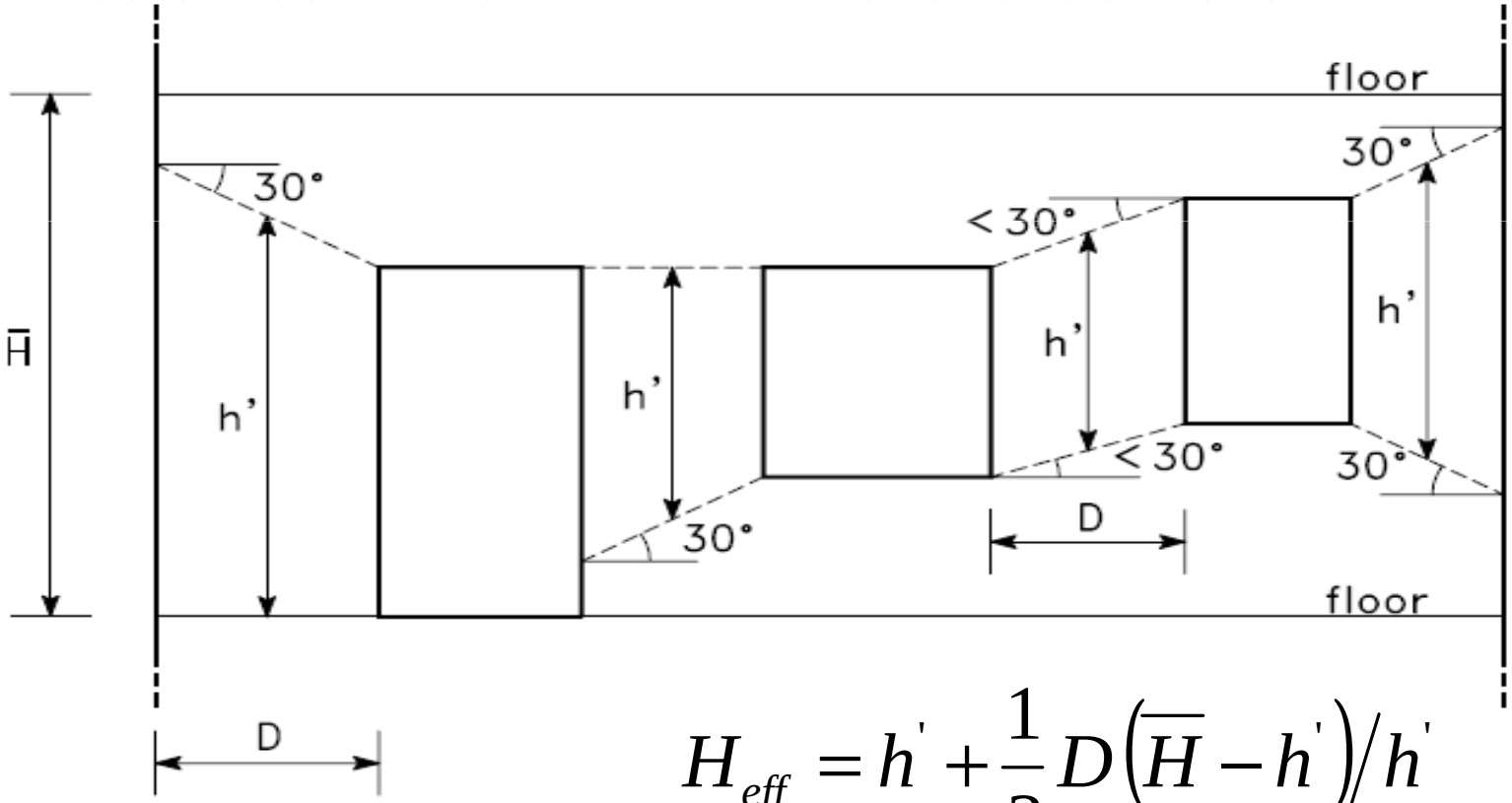
Maschi murari

Si suppone che un elemento murario (**maschio murario**) sia costituito da una parte deformabile con resistenza finita, e di due parti infinitamente rigide e resistenti alle estremità dell'elemento



Maschi murari

L'altezza efficace del maschio può essere definita secondo quanto proposto da Dolce (1989), per tenere conto in modo approssimato della deformabilità della muratura nelle zone di nodo



$$H_{eff} = h' + \frac{1}{3} D \left(\overline{H} - h' \right) / h'$$

Metodi di analisi NON lineare

Maschi murari

Il comportamento dell'elemento maschio viene supposto elasto-plastico con limite in deformazione

Si suppone cioè che il maschio abbia comportamento lineare elastico finché non viene verificato uno dei possibili criteri di rottura

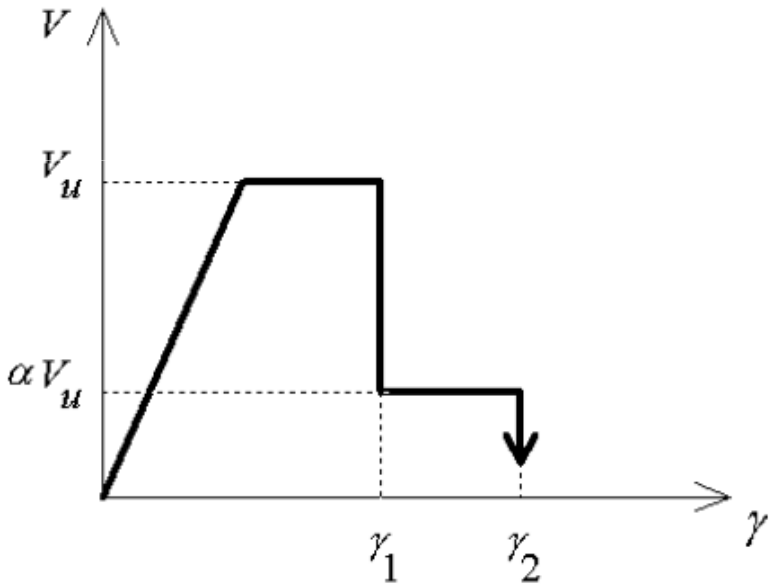
La matrice di rigidezza in fase elastica assume la forma consueta per elementi di telaio con deformazione a taglio, e risulta determinata una volta definiti

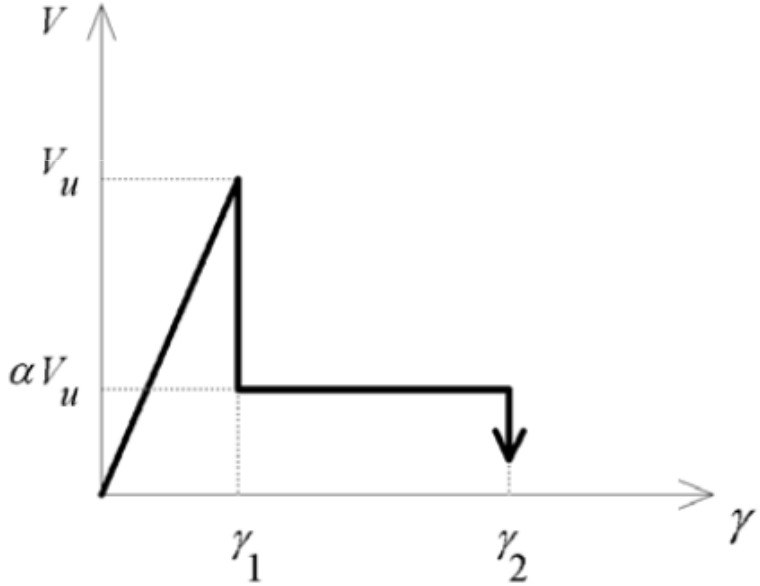
- modulo di Young E
- modulo a taglio G
- la geometria della sezione

Metodi di analisi NON lineare

Maschi murari

Potranno essere caratterizzati da un comportamento di tipo fragile





Metodi di analisi: analisi statica NON lineare

Per edifici con numero di piani superiore a due, il modello dovrà tenere conto degli effetti connessi alla variazione delle forze verticali

L'analisi statica non lineare permette di valutare direttamente la duttilità disponibile della struttura

Capacità di spostamento: valutata sulla curva globale in corrispondenza dei punti:

Stato limite di danno: spostamento minore tra quello corrispondente al raggiungimento della massima forza e quello per il quale il primo maschio murario raggiunge lo spostamento ultimo.

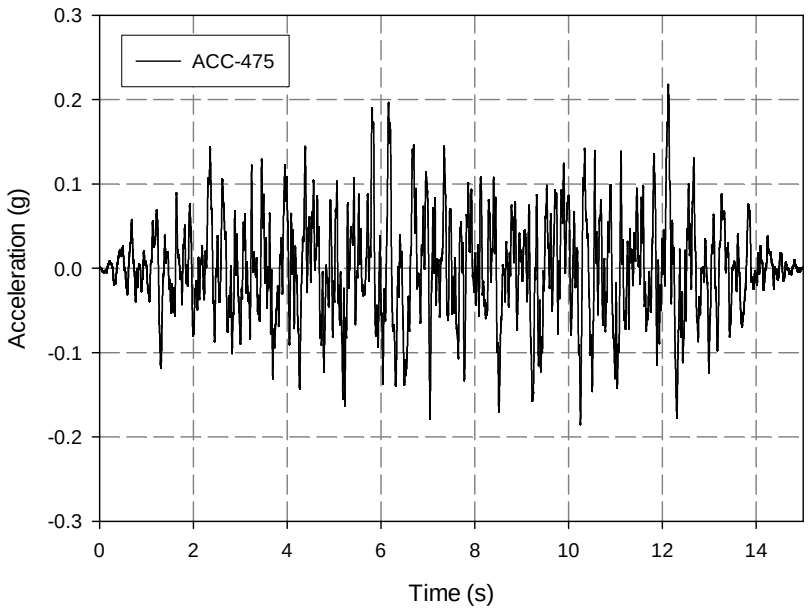
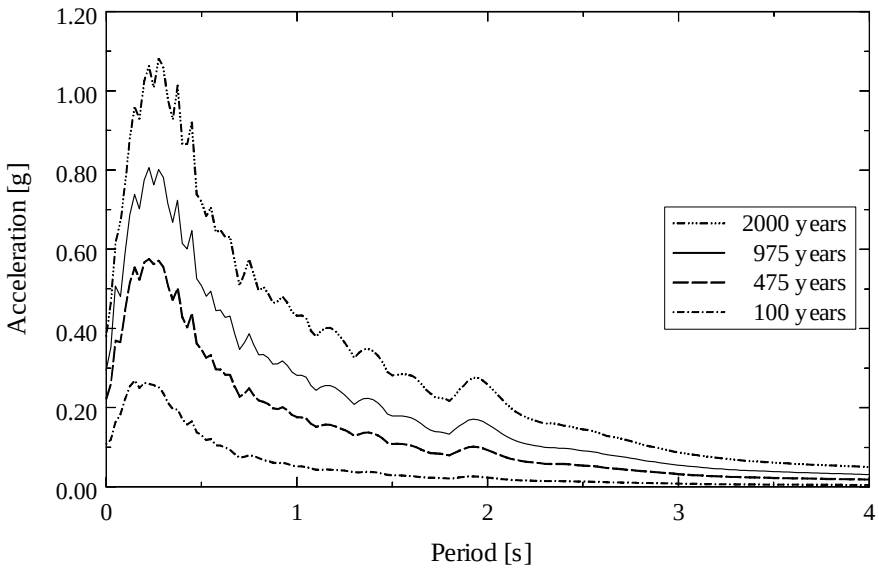
Stato limite ultimo: spostamento corrispondente a una riduzione della forza pari al 20% del massimo

Metodi di analisi: analisi Dinamica NON lineare

Si applica facendo uso di modelli meccanici non lineari di comprovata e documentata efficacia nel riprodurre il comportamento ciclico della muratura

La risposta sismica della struttura può essere calcolata mediante integrazione delle equazioni del moto, utilizzando un modello tridimensionale dell'edificio e gli accelerogrammi

Il modello costitutivo utilizzato per la rappresentazione del comportamento non lineare della struttura dovrà essere giustificato, anche in relazione alla corretta rappresentazione dell'energia dissipata nei cicli di isteresi

Metodi di analisi: analisi Dinamica NON lineare

Nel caso in cui si utilizzino almeno 7 diversi gruppi di accelerogrammi le azioni potranno essere rappresentate dai valori medi ottenuti dalle analisi, nel caso di un numero inferiore di gruppi di accelerogrammi si farà riferimento ai valori più sfavorevoli