

# Lezione

Progetto di Strutture

# Progettazione per azioni sismiche

# Introduzione

Le costruzioni da edificarsi in siti ricadenti in zona 4 possono essere progettate e verificate applicando le sole regole valide per le strutture non soggette all'azione sismica, alle condizioni di seguito enunciate:

- gli impalcati devono essere rigidi e resistenti nel proprio piano;
- gli elementi strutturali devono rispettare le limitazioni, in termini di geometria e di quantitativi d'armatura, relative alla CD "B";
- le sollecitazioni debbono essere valutate considerando la combinazione di azioni di normativa ed applicando, in due direzioni ortogonali, il sistema di forze orizzontali di progetto, in cui si assumerà  $S_d(T_1) = 0,07g$  per tutte le tipologie.

Nota: Le relative verifiche di sicurezza debbono essere effettuate, in modo indipendente nelle due direzioni, allo stato limite ultimo. Non è richiesta la verifica agli SLE.

# Requisiti nei confronti degli stati limite

In mancanza di espresse indicazioni in merito, il rispetto dei vari stati limite si considera conseguito:

- nei confronti di tutti gli stati limite di esercizio, qualora siano rispettate le verifiche relative al solo SLD;
- nei confronti di tutti gli stati limite ultimi, qualora siano rispettate le indicazioni progettuali e costruttive riportate nel seguito e siano soddisfatte le verifiche relative al solo SLV.

## Nota !

fanno eccezione a quanto detto le costruzioni di classe d'uso III e IV, per gli elementi non strutturali e gli impianti delle quali è richiesto anche il rispetto delle verifiche di sicurezza relative allo *SLO*.

# Requisiti nei confronti degli stati limite

Le costruzioni soggette all'azione sismica, non dotate di appositi dispositivi dissipativi, devono essere progettate in accordo con i seguenti comportamenti strutturali:

- **Comportamento strutturale non-dissipativo**
- **Comportamento strutturale dissipativo**

# Requisiti nei confronti degli stati limite

**Nel comportamento strutturale non dissipativo,** cui ci si riferisce quando si progetta per gli stati limite di esercizio, gli effetti combinati delle azioni sismiche e delle altre azioni sono calcolati, indipendentemente dalla tipologia strutturale adottata, senza tener conto delle non linearità di comportamento (di materiale e geometriche) se non rilevanti.

**Nel comportamento strutturale dissipativo,** cui ci si riferisce quando si progetta per gli stati limite ultimi, gli effetti combinati delle azioni sismiche e delle altre azioni sono calcolati, in funzione della tipologia strutturale adottata, tenendo conto delle non linearità di comportamento (di materiale sempre, geometriche quando rilevanti e comunque sempre quando precisato).

# Requisiti delle strutture

Nel caso la struttura abbia comportamento strutturale dissipativo, si distinguono due livelli di Capacità Dissipativa o Classi di Duttilità (CD):

- **CLASSE DI DUTTILITÀ (GLOBALE) ALTA (CD" A")**
- **CLASSE DI DUTTILITÀ (GLOBALE) BASSA (CD" B")**

## **Nota !**

per ambedue le classi, onde assicurare alla struttura un comportamento dissipativo e duttile evitando rotture fragili e la formazione di meccanismi instabili imprevisti, si fa ricorso ai procedimenti tipici della gerarchia delle resistenze.

La differenza tra le due classi risiede nella entità delle plasticizzazioni cui ci si riconduce in fase di progettazione.

# Duttilita' globale

La duttilità globale disponibile di un sistema a più gradi di libertà é usualmente definita come il rapporto tra

- lo spostamento del centro di massa dell'impalcato di sommità dell'edificio in corrispondenza dell'attingimento di una situazione ritenuta ultima nell'edificio
- lo spostamento dello stesso punto in corrispondenza della prima plasticizzazione nell'edificio:

$$\mu_G = \frac{u_u^{top}}{u_y^{top}}$$

# Duttilita' globale

## Valutazione dello spostamento ultimo

La situazione ultima è usualmente identificata con l'attingimento di :

- MECCANISMO DI COLLASSO (LABILITÀ)
- RIDUZIONE DELLA RESISTENZA RISPETTO AL VALORE MASSIMO
- ROTAZIONE ULTIMA IN UNA SEZIONE

### **Nota !**

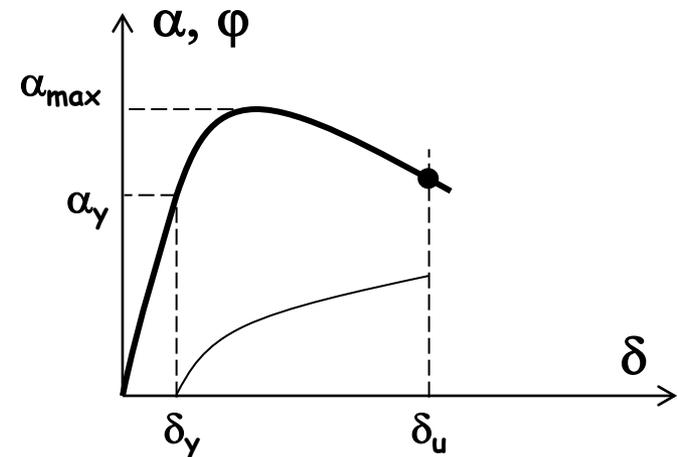
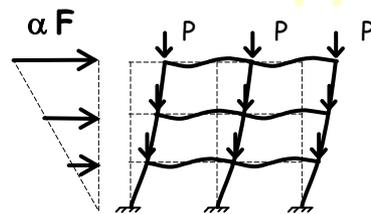
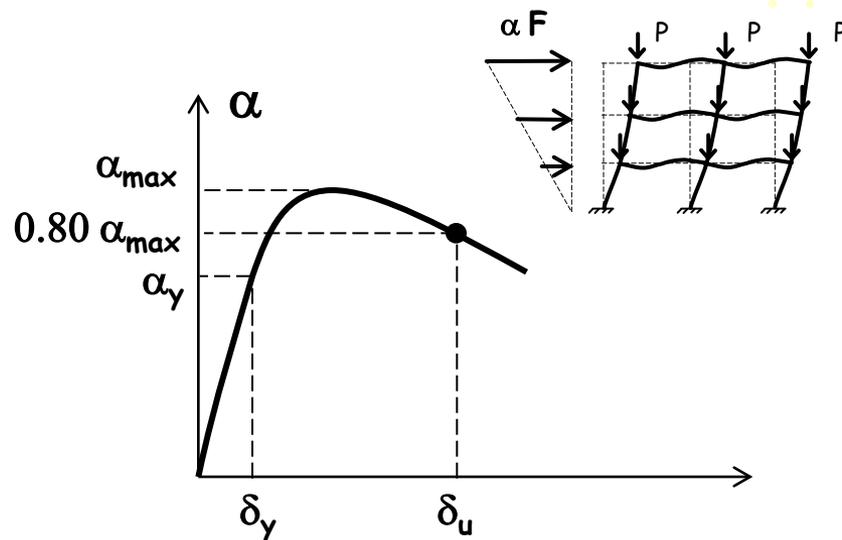
La valutazione della duttilità globale, con situazione ultima individuata all'atto della formazione di un meccanismo (o della riduzione della resistenza) è vincolata alla valutazione della risposta strutturale tramite analisi statica incrementale. Tale valutazione sarebbe, infatti, difficilmente applicabile con analisi dinamica al passo.

# Duttilita' globale

Valutazione dello spostamento ultimo

Riduzione della resistenza  
rispetto al valore massimo

Rotazione ultima  
in una sezione



# Duttilita' globale

La situazione di primo snervamento è usualmente identificata con l'attingimento di :

- SOLLECITAZIONE DI PIENA PLASTICIZZAZIONE  
(sezione in acciaio)

oppure

SOLLECITAZIONE CORRISPONDENTE  
ALLO SNERVAMENTO DELL'ACCIAIO TESO  
o diversamente in funzione della modellazione  
(sezione in conglomerato cementizio armato)

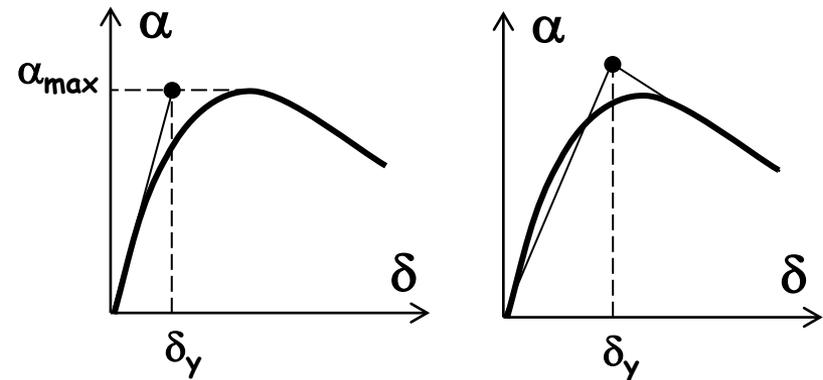
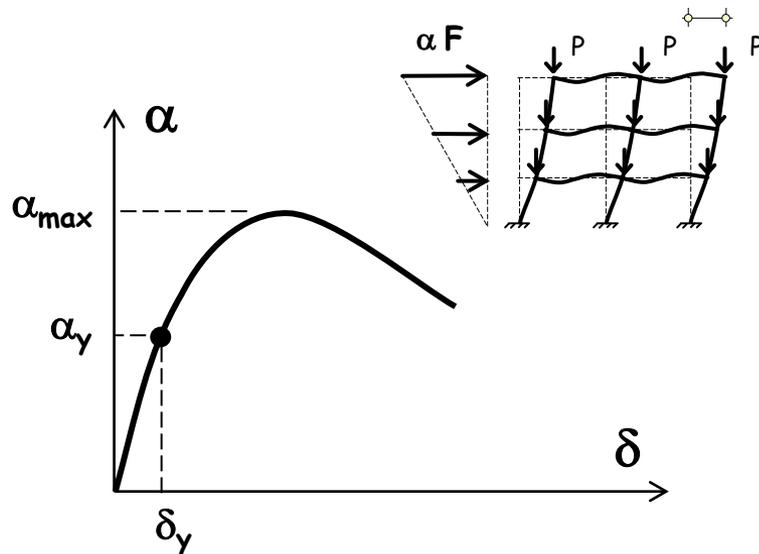
- BILINEARIZZAZIONE DELLA CURVA DI CAPACITA'

# Duttilita' globale

Valutazione dello spostamento di prima plasticizzazione

Prima plasticizzazione della sezione

Bilinearizzazione della curva di capacità



# Duttilita' globale

Diversamente dai sistemi ad un solo grado di liberta', la duttilita' globale delle strutture a piu' gradi di liberta' non e' generalmente proporzionale alla duttilita' locale.

Infatti, essa dipende da:

- **DUTTILITA' LOCALE**
- **COMPORTAMENTO GLOBALE A COLLASSO**

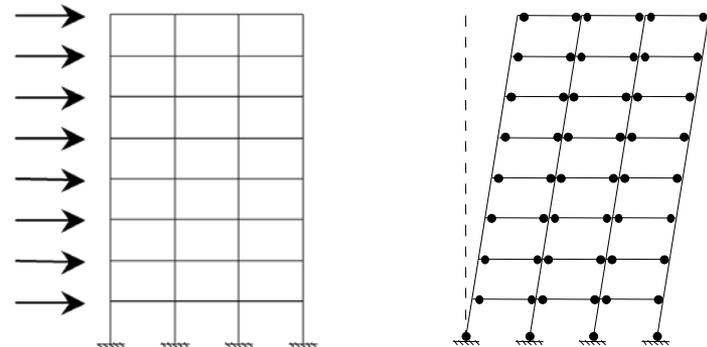
# Comportamento a collasso di strutture multipiano

1° CASO: La struttura perviene alla formazione di un meccanismo attraverso la formazione del numero massimo di cerniere plastiche in grado di trasformare il sistema in un meccanismo.

Questo tipo di meccanismo di collasso si definisce

## MECCANISMO GLOBALE

Esempio: un telaio perviene al collasso globale dopo la formazione delle cerniere plastiche alle estremità delle travi e alla base delle colonne del primo ordine.



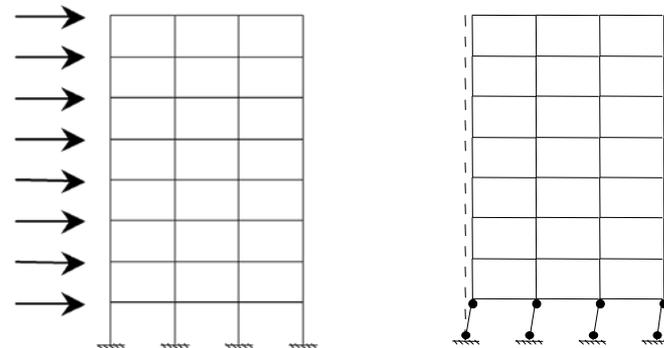
# Comportamento a collasso di strutture multipiano

2° CASO: La struttura perviene alla formazione di un meccanismo attraverso la formazione del numero minimo di cerniere plastiche necessario a trasformare il sistema in un meccanismo.

Questo tipo di meccanismo di collasso si definisce

## MECCANISMO DI PIANO

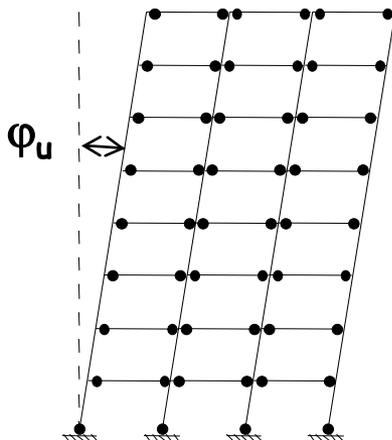
Esempio: un telaio perviene al collasso di piano dopo la formazione delle cerniere plastiche alle estremità delle colonne del primo ordine.



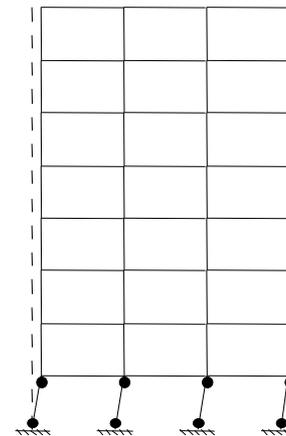
# Comportamento a collasso di strutture multipiano

A meno del contributo elastico, lo spostamento laterale di sommità corrispondente all'attingimento di tale rotazione è:

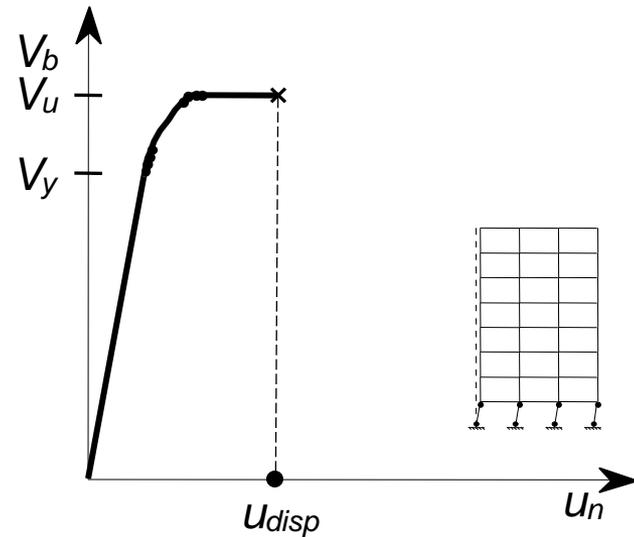
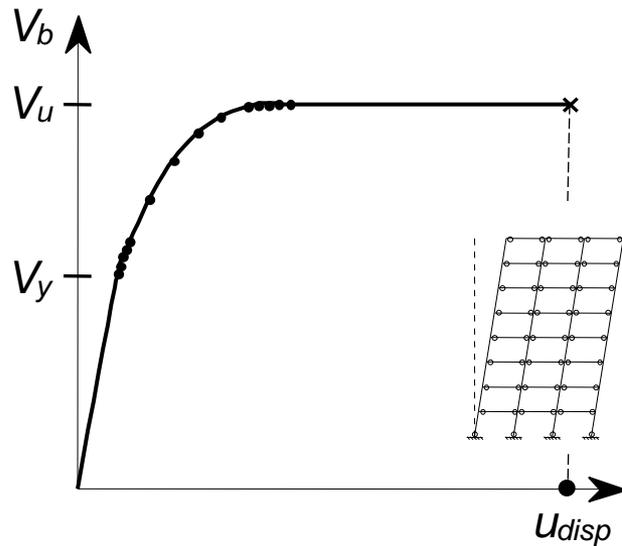
$$u_u^{top} = n_s h \varphi_u$$



$$u_u^{top} = h \varphi_u$$



# Comportamento a collasso di strutture multipiano



spostamenti a collasso del sistema con collasso globale >  
spostamenti del sistema con collasso di piano

# Comportamento a collasso di strutture multipiano

e dunque essendo la duttilità globale

$$\mu_G = \frac{u_u^{top}}{u_y^{top}}$$

A parità di duttilità locale  $\varphi_u$   
e di comportamento al limite elastico  $u_y^{top}$

$$\mu_{G_1} > \mu_{G_2}$$

$\left( \begin{array}{c} \textit{sistema con} \\ \textit{collasso globale} \end{array} \right)$	$\left( \begin{array}{c} \textit{sistema con} \\ \textit{collasso di piano} \end{array} \right)$
-------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

# Analisi lineare

L'analisi lineare può essere utilizzata per calcolare gli effetti delle azioni sismiche nel caso di

- **SISTEMI DISSIPATIVI**
- **SISTEMI NON DISSIPATIVI**

# Utilizzo dell'analisi lineare

## Sistemi non dissipativi

Quando si utilizza l'analisi lineare per sistemi non dissipativi (ad es. SLS) gli effetti delle azioni sismiche sono calcolati riferendosi allo spettro di progetto ottenuto assumendo un fattore di struttura  $q$  unitario.

La resistenza delle membrature e dei collegamenti deve essere valutata in accordo con le regole presentate per zona non sismica, non essendo necessario soddisfare i requisiti di duttilità fissati nei paragrafi successivi.

## Sistemi dissipativi

Quando si utilizza l'analisi lineare per sistemi dissipativi (ad es. SLU), gli effetti delle azioni sismiche sono calcolati riferendosi allo spettro di progetto ottenuto assumendo un fattore di struttura  $q > 1$ .

La resistenza delle membrature e dei collegamenti deve essere valutata in accordo con le regole presentate per zona non sismica, essendo necessario soddisfare i requisiti di duttilità fissati nei paragrafi successivi.

# Analisi lineare

## Non linearità geometriche

Per le costruzioni civili ed industriali, le non linearità geometriche possono essere trascurate nel caso in cui ad ogni orizzontamento risulti:

$$\theta = \frac{P d_r}{V h} \leq 0.1$$

$P$  è il carico verticale totale della parte di struttura sovrastante;  
 $d_r$  è lo spostamento orizzontale medio d'interpiano;  
 $V$  è il taglio di piano;  
 $h$  è l'altezza d'interpiano.

Nota: Quando  $\theta$  è compreso tra 0,1 e 0,2 gli effetti delle non linearità geometriche possono essere presi in conto incrementando gli effetti dell'azione sismica orizzontale di un fattore pari a  $1/(1-\theta)$ ;  
 $\theta$  non può comunque superare il valore 0,3.

# Analisi lineare

## Valutazione degli spostamenti

Gli spostamenti  $d_E$  della struttura sotto l'azione sismica di progetto allo SLV si ottengono moltiplicando per il fattore  $\mu_d$  i valori  $d_{Ee}$  ottenuti dall'analisi lineare, dinamica o statica, secondo l'espressione seguente:

$$d_E = \pm \mu_d d_{Ee}$$

dove

$$\mu_d = q \quad \text{se } T_1 \geq T_C$$

$$\mu_d = 1 + (q-1)T_C / T_1 \quad \text{se } T_1 < T_C$$

In ogni caso  $\mu_d \leq 5q - 4$ .

# Analisi statica o dinamica

## 1. Analisi lineare dinamica

o analisi modale con spettro di risposta è il metodo di riferimento per determinare gli effetti dell'azione sismica, sia su sistemi dissipativi sia su sistemi non dissipativi.

L'azione sismica è modellata attraverso lo spettro di progetto.

## 2. Analisi dinamica al passo

si può adottare in alternativa all'analisi modale per sistemi non dissipativi.

L'azione sismica é modellata attraverso accelerogrammi

# Analisi statica o dinamica

## 3. Analisi lineare statica

o metodo delle forze laterali, è utilizzabile per le sole costruzioni la cui risposta sismica, in ogni direzione principale, non dipenda significativamente dai modi di vibrare superiori. Il suo utilizzo è consentito sia per sistemi dissipativi che non dissipativi.

l'equilibrio è trattato staticamente e si modella l'azione sismica direttamente attraverso lo spettro di progetto.

# Analisi lineare dinamica

L'analisi dinamica lineare consiste:

- nella determinazione dei modi di vibrare della costruzione (analisi modale),
- nel calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto,
- per ciascuno dei modi di vibrare individuati,
- nella combinazione di questi effetti.

**Attenzione !** è opportuno considerare

1. tutti i modi con massa partecipante superiore al 5%
2. un numero di modi la cui massa partecip. totale sia superiore all'85%.

# Analisi lineare dinamica

## Combinazione degli effetti

Per la combinazione degli effetti relativi ai singoli modi deve essere utilizzata una combinazione quadratica completa degli effetti relativi a ciascun modo, quale quella indicata nell'espressione

$$E = \left( \sum_j \sum_i \rho_{ij} E_i E_j \right)^{1/2}$$

con:

$E_j$       valore dell'effetto relativo al modo  $j$ ;  
 $\rho_{ij}$       coefficiente di correlazione tra il modo  $i$  e il modo  $j$ ,

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi\beta_{ij}^{3/2}}{(1+\beta_{ij}) \left[ (1-\beta_{ij})^2 + 4\xi^2\beta_{ij} \right]}$$

$\xi$       smorzamento viscoso dei modi  $i$  e  $j$ ;  
 $\beta_{ij}$       è il rapporto tra periodi di ciascuna coppia  $j$ - $i$  di modi ( $\beta_{ij} = T_j/T_i$ ).

# Analisi lineare dinamica al passo

In alternativa, nel caso in cui la struttura sia non dissipativa, si può effettuare un'analisi con integrazione al passo, modellando l'azione sismica attraverso accelerogrammi, tenendo conto dell'eccentricità accidentale.

# Analisi lineare statica

L'analisi statica lineare consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze di inerzia indotte dall'azione sismica.

## Attenzione !

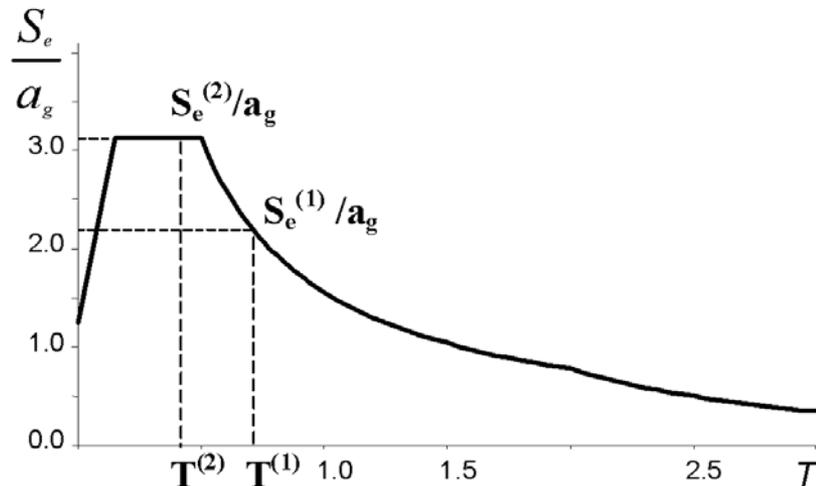
Essa può essere effettuata a condizione che :

1. IL PERIODO DEL MODO DI VIBRARE PRINCIPALE NELLA DIREZIONE IN ESAME ( $T_1$ ) NON SUPERI  $2,5 T_C$  O  $T_D$
2. LA COSTRUZIONE SIA REGOLARE IN ALTEZZA

# Analisi lineare statica

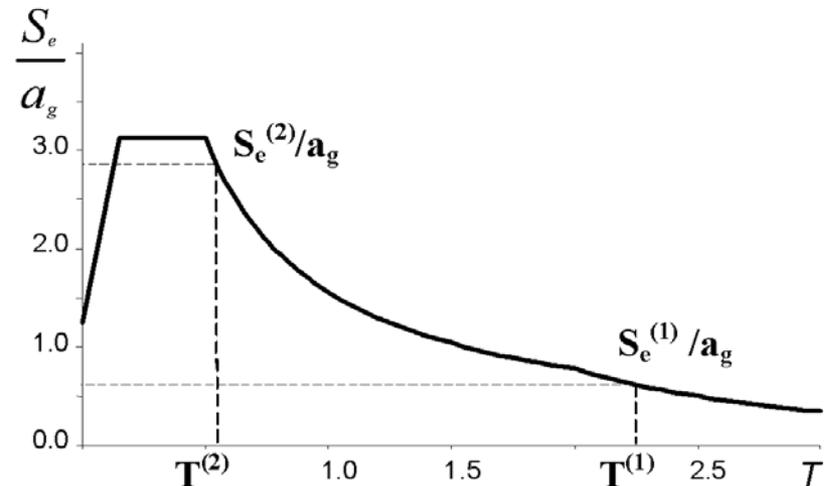
$$V_b^{(j)} = \Gamma^{(j)} S_e^{(j)} \sum m_i \phi_i^{(j)}$$

$T^{(1)}$  poco maggiore di  $T^{(2)}$



$$\Gamma^{(1)} S_e^{(1)} \gg \Gamma^{(2)} S_e^{(2)}$$

$T^{(1)}$  molto maggiore di  $T^{(2)}$



$$\Gamma^{(1)} S_e^{(1)} \quad \Gamma^{(2)} S_e^{(2)}$$

# Analisi lineare statica

Valutazione approssimata  $T_1$

Condizione: Per costruzioni civili o industriali che non superino i 40 m di altezza e la cui massa sia approssimativamente uniformemente distribuita lungo l'altezza,

$T_1$  può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, utilizzando la formula seguente:

$$T_1 = C_1 H^{3/4}$$

dove:

**H** è l'altezza della costruzione, in metri, dal piano di fondazione

**C<sub>1</sub>** 0,085 per costruzioni con struttura a telaio in acciaio,

0,075 per costruzioni con struttura a telaio in calcestruzzo armato

0,050 per costruzioni con qualsiasi altro tipo di struttura.

# Analisi lineare statica

## Forze di progetto

La forza da associare a ciascuna massa della costruzione è data dalla formula seguente:

$$F_i = F_h \frac{z_i W_i}{\sum_j z_j W_j}$$

dove:

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

$F_i$  è la forza da applicare alla massa  $i$ -esima;

$W_i$  e  $W_j$  sono i pesi, rispettivamente, della massa  $i$  e della massa  $j$ ;

$z_i$  e  $z_j$  sono le quote, rispetto al piano di fondazione, delle masse  $i$  e  $j$ ;

$S_d(T_1)$  è l'ordinata dello spettro di risposta di progetto;

$W$  è il peso complessivo della costruzione;

$\lambda$  è un coefficiente pari a 0,85 se la costruzione ha almeno tre orizzontamenti e se  $T_1 < 2T_C$ , pari a 1,0 in tutti gli altri casi;

# Eccentricità strutturale

## Definizione

E' la distanza tra il centro delle masse e il centro delle rigidezze laterali degli elementi verticali resistenti

## **Nota !**

Sia le masse che le rigidezze sono considerate con i loro valori nominali e nelle posizioni ipotizzate in fase di progetto (masse uniformemente distribuite e rigidezze in corrispondenza degli elementi verticali resistenti)

# Eccentricità accidentale

## Definizione

Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze nella localizzazione delle masse, al centro di massa deve essere attribuita una eccentricità accidentale rispetto alla sua posizione quale deriva dal calcolo.

## Nota !

Per i soli edifici ed in assenza di più accurate determinazioni l'eccentricità accidentale in ogni direzione non può essere considerata inferiore a 0.05 volte la dimensione dell'edificio misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica.

Detta eccentricità è assunta costante, per entità e direzione, su tutti gli orizzontamenti.

# Effetti eccentricità accidentale

## Analisi lineare dinamica

Per gli edifici, gli effetti della eccentricità accidentale del centro di massa possono essere determinati mediante

- l'applicazione di carichi statici costituiti da momenti torcenti di valore pari alla risultante orizzontale della forza agente al piano, moltiplicata per l'eccentricità accidentale del baricentro delle masse rispetto alla sua posizione di calcolo.

# Effetti eccentricità accidentale

## Analisi lineare statica semplificata

### Nota !

Condizione: per gli edifici, se le rigidzze laterali e le masse sono distribuite simmetricamente in pianta,

gli effetti torsionali accidentali possono essere considerati amplificando le sollecitazioni su ogni elemento resistente, calcolate con la distribuzione fornita dalla normativa, attraverso il fattore risultante dalla seguente espressione:

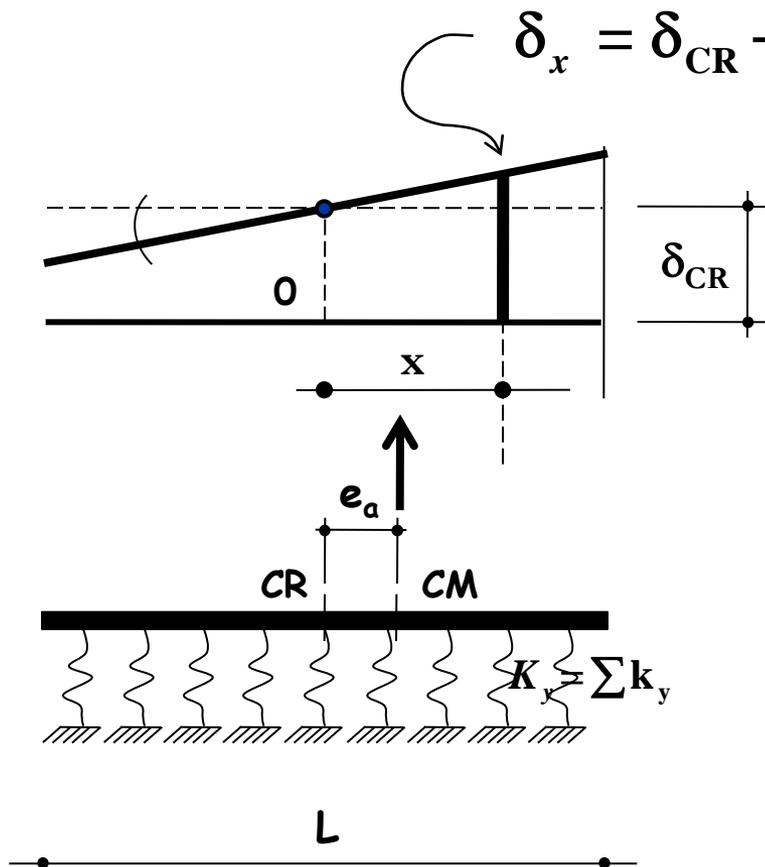
$$\delta = 1 + 0.6 x / L$$

dove:

- x** è la distanza dell'elemento resistente verticale dal baricentro geometrico di piano, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica considerata;
- L** è la distanza tra i due elementi resistenti più lontani, misurata allo stesso modo.

# Effetti eccentricità accidentale

Analisi lineare statica semplificata



$$\delta_x = \frac{F}{K_y} + \frac{F e_a}{K_y r_x^2} \cdot x$$

$$= \frac{F}{K_y} \left( 1 + \frac{e_a}{r_x^2} \cdot x \right)$$

Se  $e_a = 0.05 L$  e  
se le rigidità degli elementi sono  
eguali e uniformemente distribuite

(ovvero  $r_x^2 = \left( \frac{K_y}{L} \right) \frac{L^3}{12} / \left( \frac{K_y}{L} L \right) = \frac{L^2}{12}$  )

$$\delta_x = \frac{F}{K_y} \left( 1 + 0.60 \frac{x}{L} \right)$$

# Risposta alle componenti

## Effetti combinati sulla struttura

- La risposta può essere calcolata separatamente per ciascuna delle tre componenti.
- Gli effetti sulla struttura sono combinati, successivamente, applicando la seguente espressione:

$$1.00 E_x + 0.30 E_y + 0.30 E_z$$

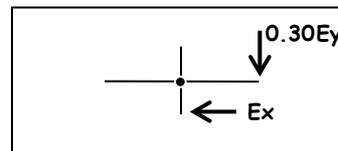
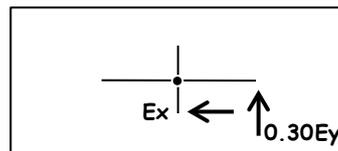
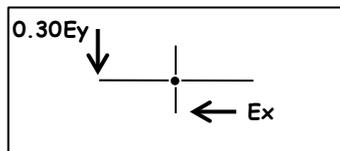
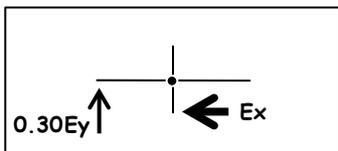
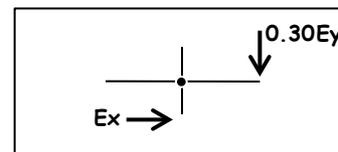
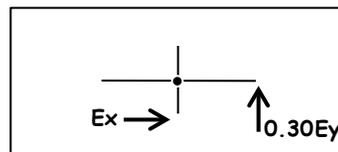
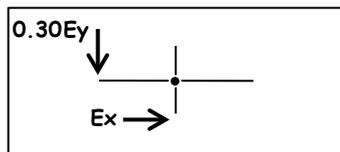
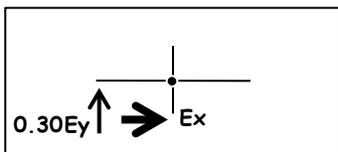
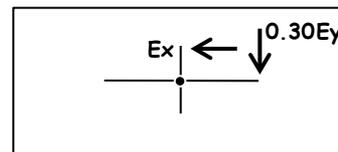
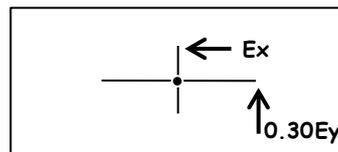
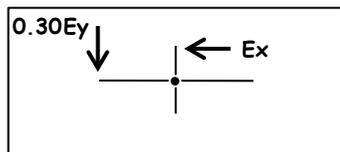
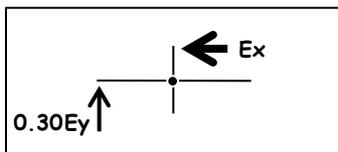
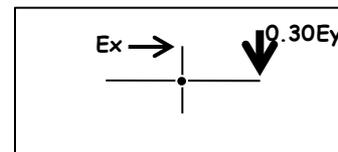
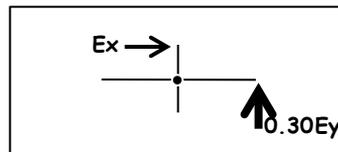
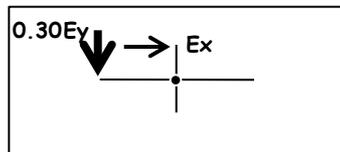
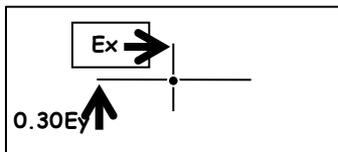
con rotazione dei coefficienti moltiplicativi e conseguente individuazione degli effetti più gravosi.

Nota: la risposta a ciascuna componente, ove necessario, è combinata con gli effetti pseudo-statici indotti dagli spostamenti relativi prodotti dalla variabilità spaziale della componente stessa, utilizzando la radice quadrata della somma dei quadrati.

# Risposta

Effetti per sisma principale in direzione x

$$(\pm E_x \pm 0.30 E_y)$$



# Risposta alle componenti

## Effetti combinati sulla struttura

Caso in cui l'effetto della componente verticale del sisma è trascurabile:

- 16 combinazioni con sisma principale in direzione x
- 16 combinazioni con sisma principale in direzione y
- 1 combinazione delle azioni in situazione non sismica  
(+ altre con combinazioni con vento e neve etc.)

Totale : **33 combinazioni di carico**

# Risposta alle componenti

## Analisi dinamica al passo

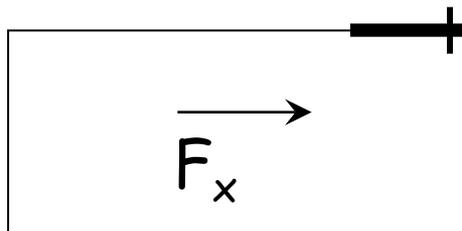
- Le due componenti accelerometriche orizzontali (e quella verticale, ove necessario) sono applicate simultaneamente a formare un gruppo di accelerogrammi.
- Gli effetti sulla struttura sono rappresentati dai :
  - valori medi degli effetti più sfavorevoli ottenuti dalle analisi, se si utilizzano almeno 7 diversi gruppi di accelerogrammi
  - valori più sfavorevoli degli effetti

In nessun caso si possono adottare meno di tre gruppi di accelerogrammi.

# Sovrapposizione effetti

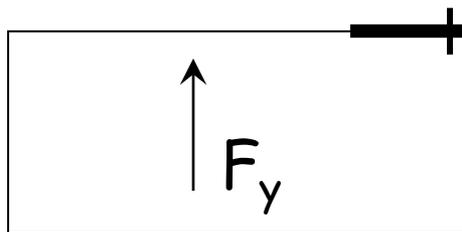
Travi

Azione in una direzione più 30% di azione nell'altra



edificio

$$M = 230 \text{ kNm}$$



edificio

$$M = 50 \text{ kNm}$$

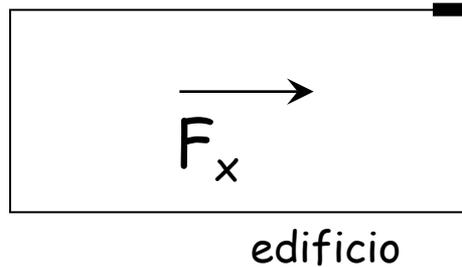
causato dalla  
rotazione

$$\begin{aligned} M_d &= 230 + 0.3 \times 50 = \\ &= 245 \text{ kNm} \end{aligned}$$

# Sovrapposizione effetti

## Pilastrini

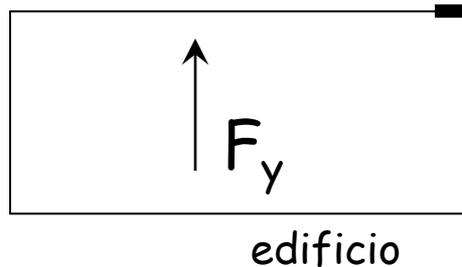
Stesso criterio,  
ma occorre tener conto  
della direzione del sisma prevalente



$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

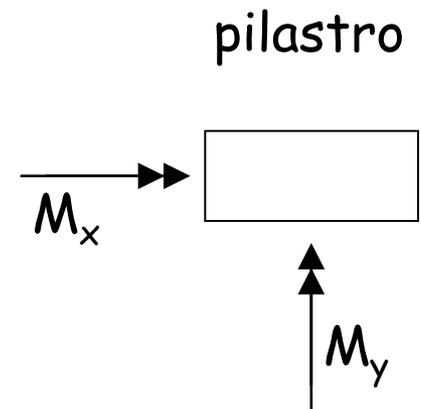


$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

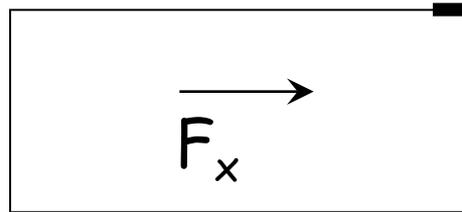
$$M_x = 105 \text{ kNm}$$



# Sovrapposizione effetti

## Pilastrini

Stesso criterio,  
ma occorre tener conto  
della direzione del sisma prevalente



edificio

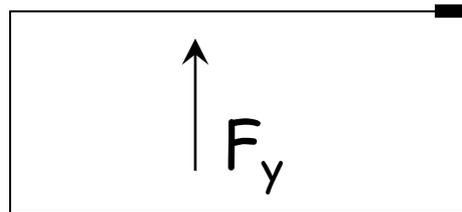
$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

Sisma prevalente in  
direzione x

$$M_{d,y} = 280 + 0.3 \times 50 =$$
$$= 295 \text{ kNm}$$



edificio

$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

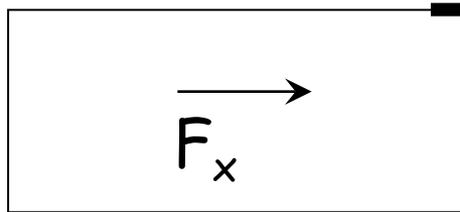
$$M_{d,x} = 45 + 0.3 \times 105 =$$
$$= 77 \text{ kNm}$$

Verifica a presso-  
flessione deviata

# Sovrapposizione effetti

## Pilastrì

Stesso criterio,  
ma occorre tener conto  
della direzione del sisma prevalente



edificio

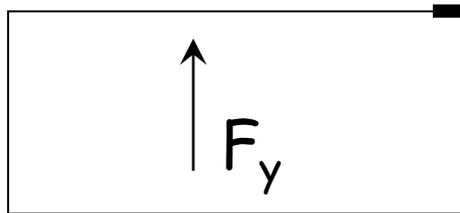
$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

$$M_x = 45 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

Sisma prevalente in  
direzione y

$$M_{d,y} = 50 + 0.3 \times 280 =$$
$$= 134 \text{ kNm}$$



edificio

$$M_y = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

$$M_{d,x} = 105 + 0.3 \times 45 =$$
$$= 119 \text{ kNm}$$

$$M_x = 105 \text{ kNm}$$

Verifica a presso-  
flessione deviata

# Componente verticale

La componente verticale  
deve essere considerata solo in presenza di :

- elementi pressoché orizzontali con luce superiore a 20 m
- elementi precompressi (con esclusione dei solai di luce inferiore a 8 m)
- elementi a mensola di luce superiore a 4 m
- strutture di tipo spingente
- pilastri in falso
- edifici con piani sospesi
- ponti
- costruzioni con isolamento

e purché il sito di costruzione non ricada in zona 3 o 4.

**FINE**