

Corso di aggiornamento

Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni

**Progetto di edifici antisismici in c.a.**

9 - Analisi strutturale: modellazione delle azioni

Spoletto

27-28 aprile 2015

Aurelio Ghersi

# Azioni sulla struttura

Azione sismica:

- Modellata mediante analisi statica o analisi modale con spettro di risposta (come già visto)

Altri problemi relativi all'azione sismica:

- Eccentricità
- Combinazione delle componenti

Carichi verticali da accoppiare all'azione sismica:

- Differenze tra norme passate e norme attuali

Carichi verticali  
da accoppiare all'azione sismica

# Carichi verticali e sisma

Quali carichi verticali e quali masse considerare in accoppiata al sisma?

## Vecchia norma

- Carichi verticali massimi ( $g_k + q_k$ ) per TA, ( $g_d + q_d$ ) per SLU
- Masse ridotte ( $g_k + s q_k$ ) [forze  $\times 1.5$  per SLU]

## Nuova norma

- Carichi verticali e masse con valori quasi permanenti ( $g_k + \psi_2 q_k$ )

# Valutazione delle masse per SLU

## secondo le NTC 08

$$W = g_k + \psi_2 q_k$$

$\psi_2 q_k$  = valore quasi permanente del carico variabile

$\psi_2$

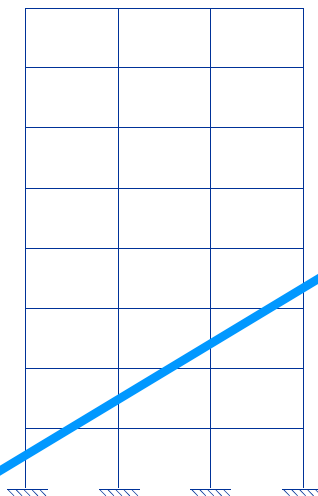
Categoria A. Ambienti ad uso residenziale	0.3
Categoria B. Uffici	0.3
Categoria C. Ambienti suscettibili di affollamento	0.6
Categoria D. Ambienti ad uso commerciale	0.6
Categoria E. Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0.8
Categoria F. Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso $\leq 30$ kN)	0.6
Categoria G. Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso $> 30$ kN)	0.3
Categoria H. Coperture	0.0
Vento	0.0
Neve (a quota $\leq 1000$ m s.l.m.)	0.0
Neve (a quota $> 1000$ m s.l.m.)	0.2
Variazioni termiche	0.0

# Valutazione delle masse per SLU

## secondo OPCM 3274 ed Eurocodice 8

$$W = g_k + \varphi \psi_2 q_k$$

$\varphi$  tiene conto della probabilità di avere i carichi quasi permanenti a tutti i piani



Uso non  
correlato

1.0

0.5

...

...

...

...

...

0.5

Piani con uso  
correlato

0.8

0.8

0.8

Archivi

1.0

Veniva introdotto un coefficiente  $\varphi$ , concettualmente corretto ma tale da complicare i calcoli senza variare sostanzialmente il risultato

# Precedente norma italiana (D.M. 16/1/96)

Verifiche con T.A.

Carichi verticali:  $g_k + q_k$

Forze orizzontali:

Masse  $W$   $g_k + s q_k$

Forze per zone a media  
sismicità  $0.07 \times W$

Si noti che il calcolo sismico  $g + q \pm F$   
racchiude anche il calcolo per soli carichi verticali

# Precedente norma italiana (D.M. 16/1/96)

Verifiche	con T.A.	con S.L.U.
Carichi verticali:	$g_k + q_k$	$1.4 g_k + 1.5 q_k$
Forze orizzontali:		
Masse $W$	$g_k + s q_k$	$g_k + s q_k$
Forze per zone a media sismicità	$0.07 \times W$	$1.5 \times 0.07 \times W$

Il passaggio a S.L.U. si è basato sull'idea che:

Verifiche TA  $\cong$  Verifiche SLU con car.soll.  $\times 1.5$

# Precedente norma italiana (D.M. 16/1/96)

Questo è abbastanza vero per le travi:

$$M_{\max,TA} \cong M_{Rd,SLU}$$

Non è vero per i pilastri:

$$\text{per } N \text{ assegnato, } M_{\max,TA} < M_{Rd,SLU}$$

Il passaggio a S.L.U. si è basato sull'idea che:

Verifiche TA  $\cong$  Verifiche SLU con car.soll.  $\times 1.5$

# Norma italiana attuale (NTC08)

Verifiche con S.L.U.	solo carichi verticali	carichi verticali più sisma
Carichi verticali:	$1.3 g_k + 1.5 q_k$	$g_k + \psi_2 q_k$
Forze orizzontali:		Carichi variabili quasi permanenti
Masse $W$	---	$g_k + \psi_2 q_k$
Forze per media sismicità, alta duttilità, suolo C	---	$0.134 \times W$

Si noti che il calcolo sismico  $g + q \pm F$   
non racchiude il calcolo per soli carichi verticali

# Confronto tra vecchia e nuova norma (carichi verticali più sisma)

Verifiche SLU	D.M. 16/1/96	D.M. 14/1/08
---------------	--------------	--------------

Carichi verticali:	$1.4 g_k + 1.5 q_k$	$g_k + \psi_2 q_k$
--------------------	---------------------	--------------------

Forze orizzontali:

Masse $W$	$g_k + s q_k$	$g_k + \psi_2 q_k$
-----------	---------------	--------------------

Forze per zone a media sismicità, ecc.	$0.105 \times W$	$0.134 \times W$
--	------------------	------------------

Notare:	Carichi verticali minori	Masse quasi invariate	Forze orizzontali maggiori
---------	--------------------------	-----------------------	----------------------------

# Confronto tra vecchia e nuova norma (carichi verticali più sisma)

Verifiche SLU

D.M. 16/1/96

D.M. 14/1/08

Carichi ve

Forze ori

Masse  $W$

Forze per  
sist

Buona parte delle differenze  
tra i risultati ottenuti con la  
attuale norma, rispetto a  
quanto si aveva in passato, è  
dovuto a questo

non all'uso di stati limite  
anziché tensioni ammissibili

$$q_k + \psi_2 q_k$$

$$q_k + \psi_2 q_k$$

$$1.34 \times W$$

Notare:

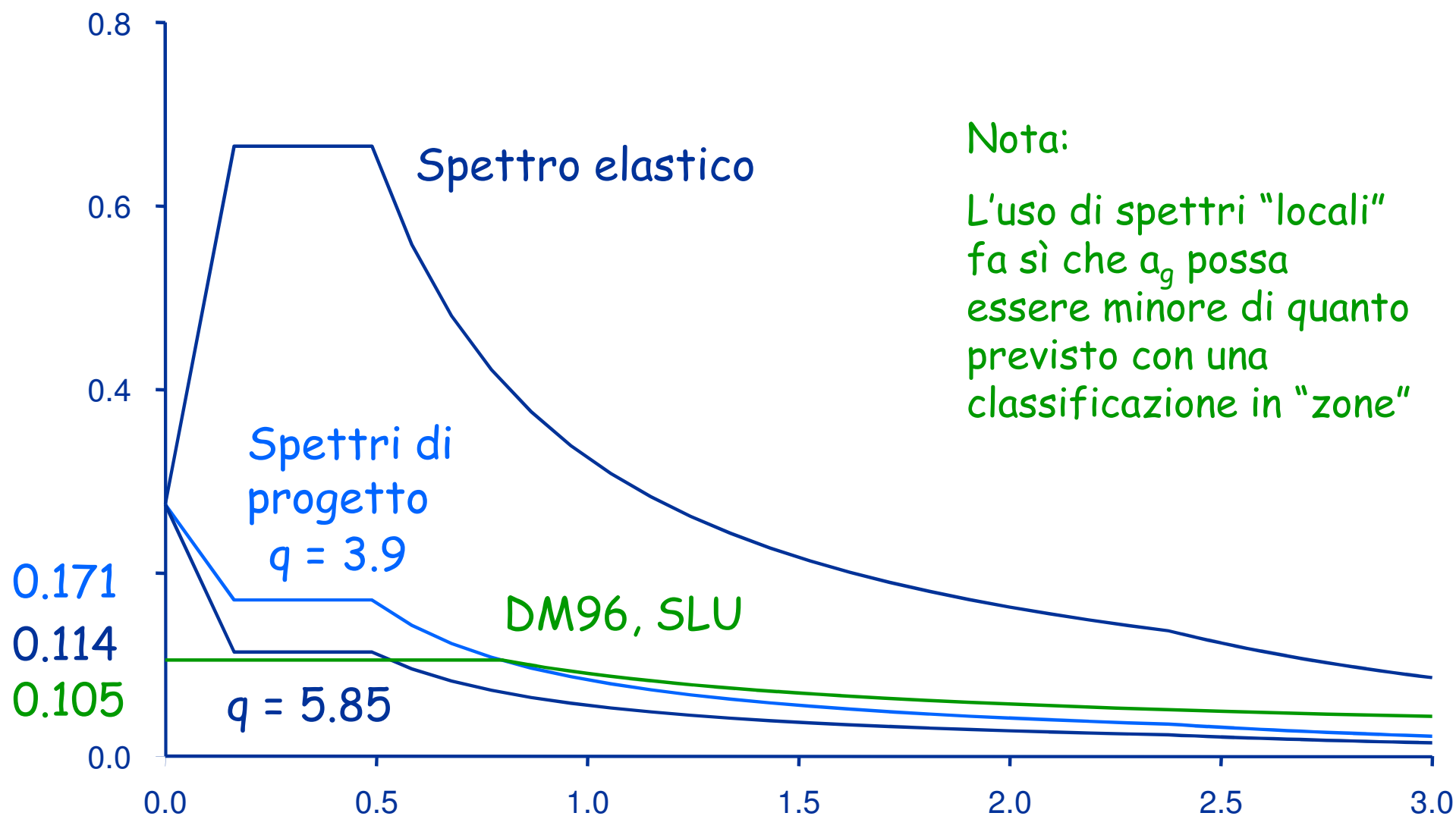
Carichi  
verticali  
minori

Masse  
quasi  
invariate

Forze  
orizzontali  
maggiori

# Confronto di spettri di risposta

## SLV, Spoleto



Altri problemi  
nella modellazione delle azioni sismiche

# Modellazione delle azioni

1. Occorre tener conto delle incertezze relative alla effettiva posizione del centro di massa (i carichi variabili possono essere distribuiti in maniera non uniforme)
  - eccentricità accidentale
2. Occorre tener conto dell'effetto contemporaneo delle diverse componenti dell'azione sismica
  - criteri di combinazione delle componenti

Problemi concettualmente giusti,  
ma che complicano notevolmente il calcolo

# Modellazione delle azioni

## 1. Eccentricità accidentale

“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”

“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”

# Modellazione delle azioni

## 1. Eccentricità accidentale

Variabilità spaziale del moto sismico:

- Le onde sismiche si propagano con velocità elevata ma non infinita; quindi raggiungono punti diversi dell'edificio in istanti diversi (sfasamento delle accelerazioni)

La normativa nel capitolo 3 precisa:

- Degli effetti sopra indicati dovrà tenersi conto quando essi possono essere significativi e in ogni caso quando le condizioni di sottosuolo siano così variabili lungo lo sviluppo dell'opera da richiedere l'uso di accelerogrammi o di spettri di risposta diversi

Quindi problema importante solo per strutture di dimensioni elevate (ad esempio viadotti) o con sottosuolo fortemente variabile

# Modellazione delle azioni

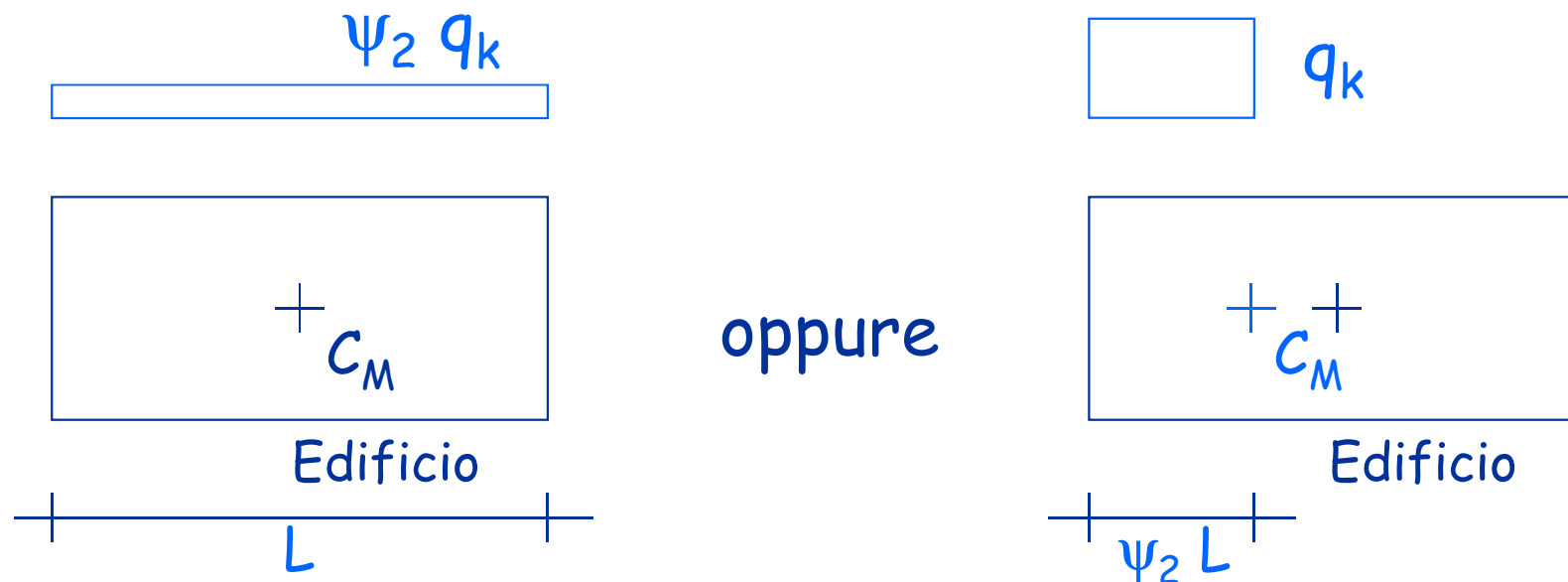
## 1. Eccentricità accidentale

Incertezze:

- Incertezze nella localizzazione delle masse
- Incertezze relative ad altri possibili effetti usualmente trascurati
  - Ad esempio, variazione di rigidezza nei pilastri in c.a. per effetto dello sforzo normale, che può provocare dissimmetrie anche in strutture simmetriche a causa della contemporanea presenza di moto in due direzioni

# Incertezze nella localizzazione delle masse

L'aliquota di carichi variabili presente in occasione del sisma potrebbe non essere uniformemente distribuita nell'edificio

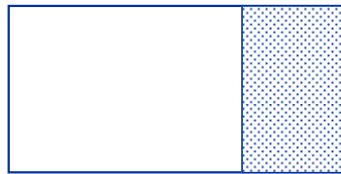


Il centro di massa deve quindi essere spostato di una quantità detta "eccentricità accidentale"

# Eccentricità accidentale

## Perché il 5% ?

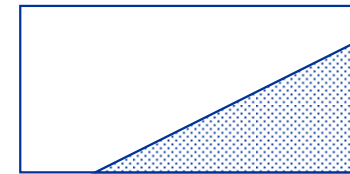
Se si applica il carico variabile massimo su un'area pari a  $\psi_2 \times$  area totale si ottiene un'eccentricità nettamente minore



$$e_{a1} = 0.021 L_1$$



$$e_{a2} = 0.021 L_2$$

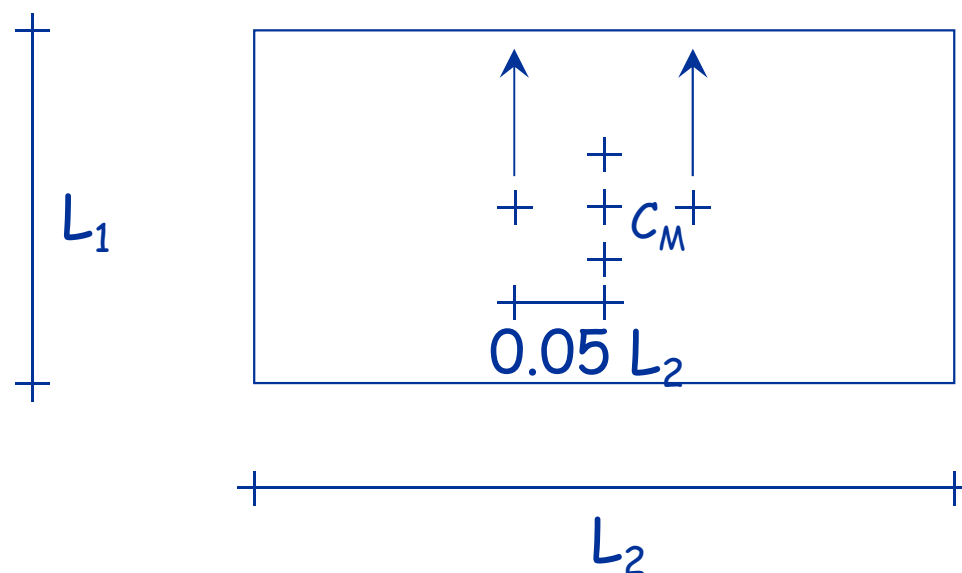
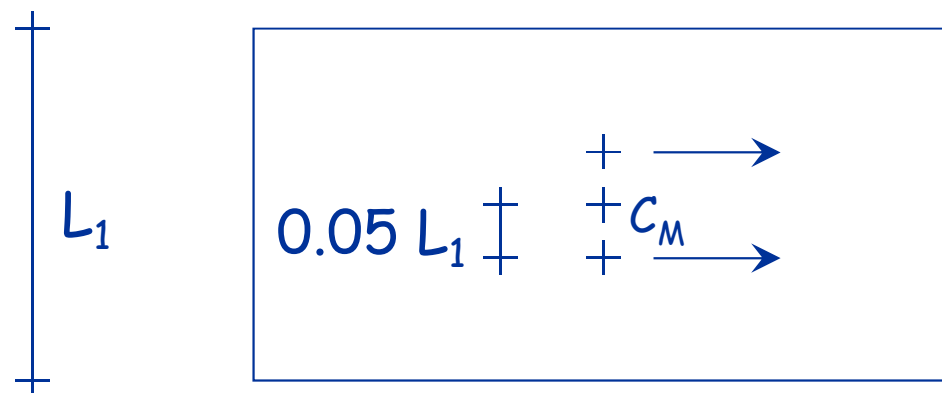


$$e_{a1} = 0.015 L_1$$
$$e_{a2} = 0.015 L_2$$

Il valore 0.05 è maggiore, per tener conto di:

- amplificazione della rotazione per effetti dinamici
- rotazione per lo sfasamento dell'onda sismica da un estremo all'altro dell'edificio

# Eccentricità accidentale



Aumentano,  
di molto, le  
combinazioni  
di carico

# Eccentricità accidentale

## Come tenerne conto?

Effettuando più volte l'analisi modale, considerando il centro di massa spostato di una quantità pari a  $e_a$

oppure

Considerando le forze statiche applicate al centro di massa spostato di una quantità pari a  $e_a$

ovvero

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità  $e_a$

# Eccentricità accidentale

## Come tenerne conto?

Preferisco questa impostazione perché così:

- riduco il numero di schemi base di calcolo da controllare
- giudico più facilmente l'effetto della eccentricità accidentale
- evito di accentuarne l'effetto (l'eccentricità  $e_a$  è già amplificata per tener conto di effetti dinamici)

Considerando l'effetto di coppie pari alle forze statiche per l'eccentricità  $e_a$

# Considerazioni sull'eccentricità accidentale

L'eccentricità accidentale dovrebbe dipendere dal rapporto carichi variabili / carichi permanenti e quindi essere legata alla tipologia strutturale e alla destinazione d'uso

La norma fornisce una indicazione semplice per tener conto degli effetti dell'eccentricità accidentale:

amplificare per  $1 + 0.6 \frac{x}{L}$        $x$  distanza da  $C_M$   
 $x=L/2 \Rightarrow 1.30$

In genere molto cautelativo

Non corretto per edifici deformabili torsionalmente

# Modellazione delle azioni

## 2. Combinazione delle componenti

Le componenti orizzontali e verticali del sisma agiscono simultaneamente

Esse però non sono correlate  
(i massimi si raggiungono in istanti diversi)

Come combinarle?

Criterio generale:

Sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

# Modellazione delle azioni

## 2. Combinazione delle componenti

Criterio generale:

Sommare

- gli effetti massimi di una componente dell'azione
- il 30% dei massimi prodotti dalle altre componenti

Esempio: sisma prevalente  $x \Rightarrow E_x + 0.3 E_y + 0.3 E_z$

EC8 e NTC13 considerano questa come una possibile alternativa, ma suggeriscono anche:

Combinare gli effetti come SRSS  $\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$

Può andar bene quando vi è una sola caratteristica di sollecitazione (travi)

Improponibile quando vi sono più caratteristiche di sollecitazione (pilastri)

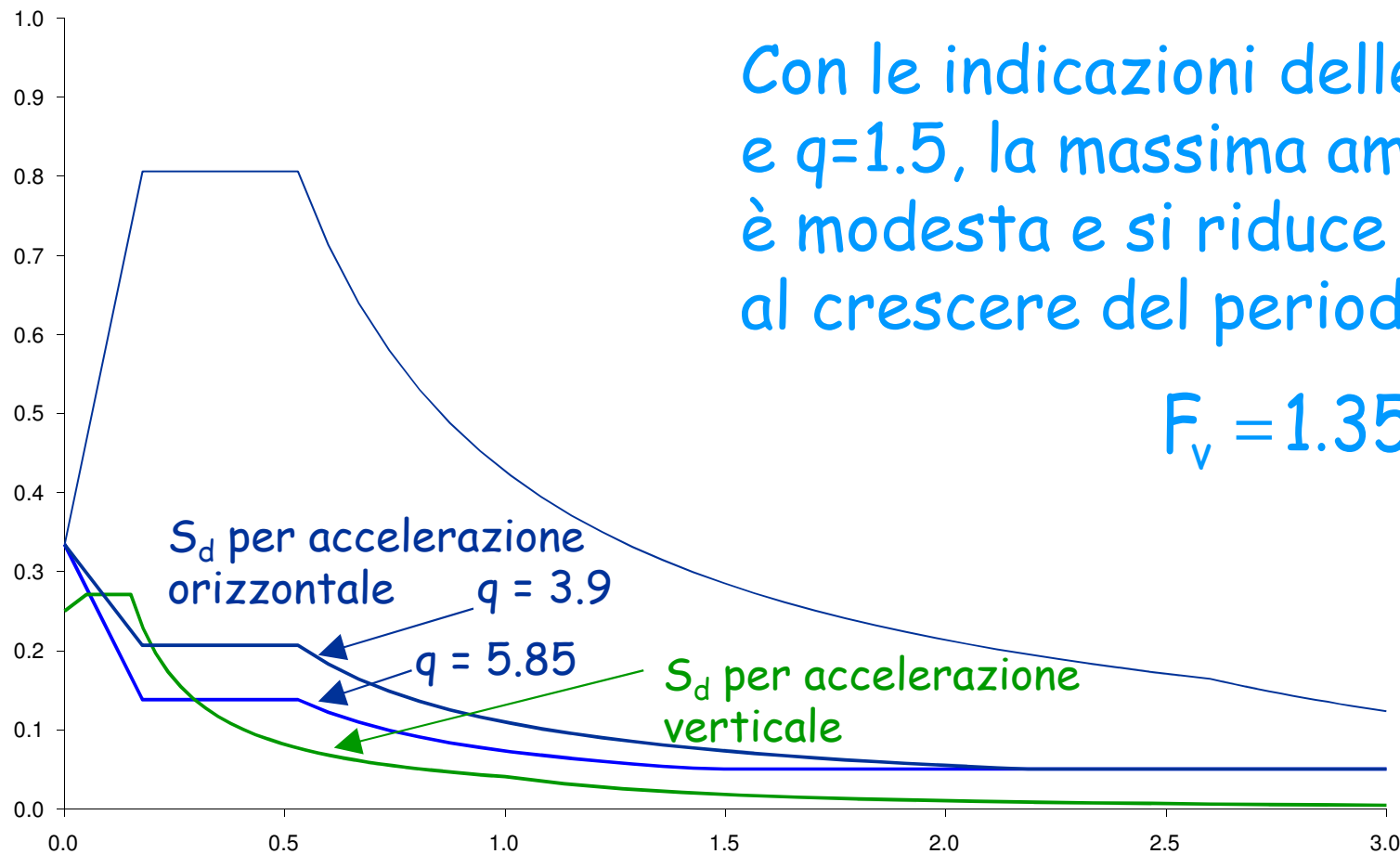
# Componente verticale

Se ne tiene conto solo per:

- Elementi con luce maggiore di 20 m
- Solai precompressi di luce superiore a 8 m
- Sbalzi di luce superiore a 4 m
- Elementi spingenti
- Pilastri in falso
- Edifici con piani sospesi

# Componente verticale considerazioni

- L'accelerazione spettrale dipende dal periodo e dalla zona sismica

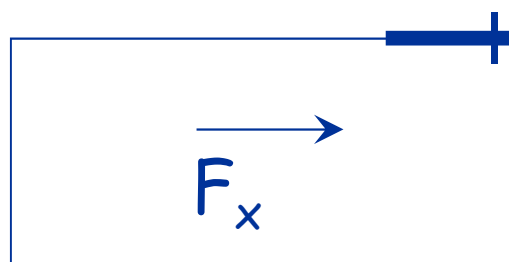


Con le indicazioni delle NTC08, e  $q=1.5$ , la massima amplificazione è modesta e si riduce rapidamente al crescere del periodo

$$F_v = 1.35 F_o \sqrt{a_g / g}$$

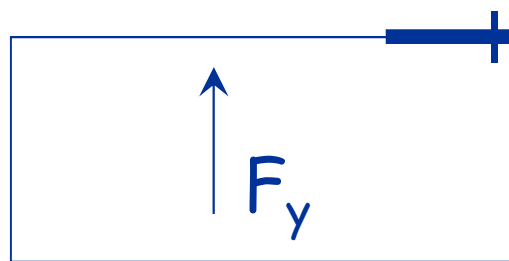
# Componenti orizzontali per le travi

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



edificio

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



edificio

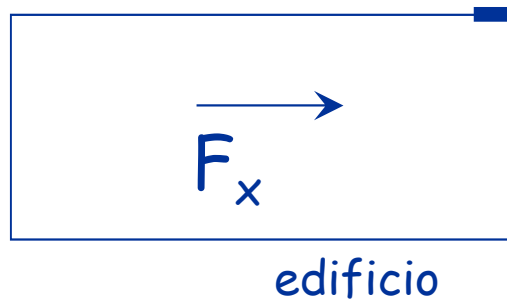
$$M = 50 \text{ kNm}$$

causato dalla  
rotazione

$$M_d = 230 + 0.3 \times 50 = 245 \text{ kNm}$$

# Componenti orizzontali per i pilastri

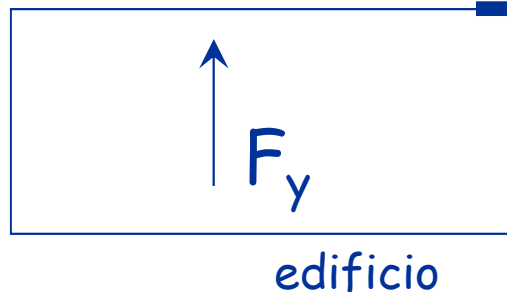
Stesso criterio,  
ma occorre tener conto  
della direzione del sisma prevalente



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

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

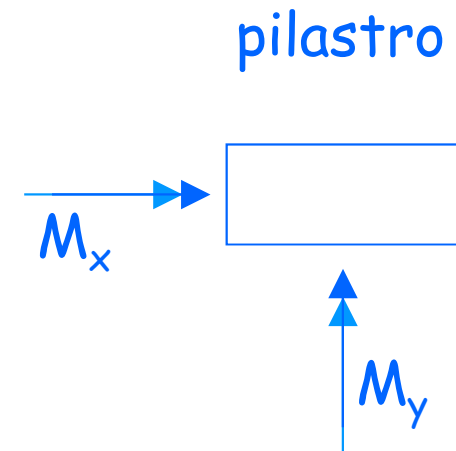
causato dalla  
rotazione



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

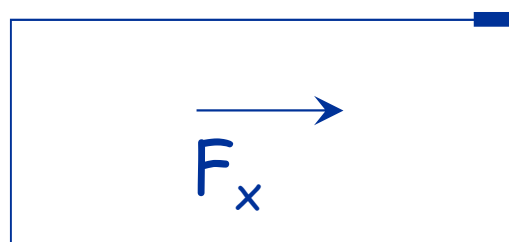
causato dalla  
rotazione

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



# Componenti orizzontali per i pilastri

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

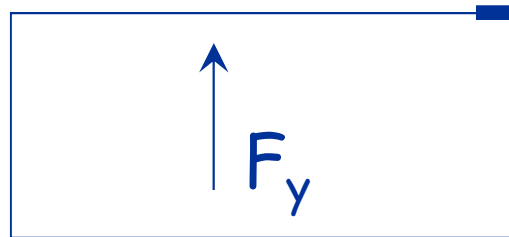


edificio

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

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

causato dalla  
rotazione



edificio

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

causato dalla  
rotazione

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

Sisma prevalente  
in direzione x

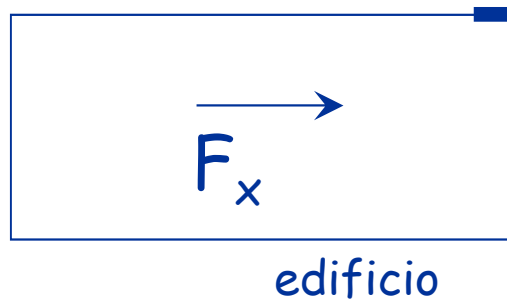
$$M_{d,y} = 280 + 0.3 \times 50 = 295 \text{ kNm}$$

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

Verifica a presso-  
flessione deviata

# Componenti orizzontali per i pilastri

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



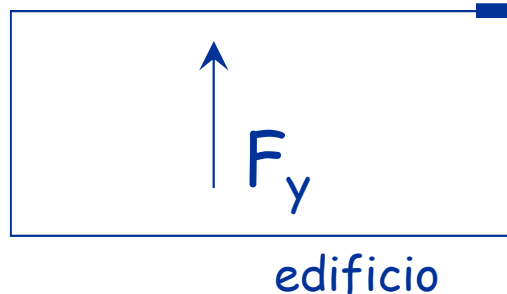
$$M_y = 280 \text{ kNm}$$

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

causato dalla  
rotazione

Sisma prevalente  
in direzione y

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



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

causato dalla  
rotazione

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

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

Verifica a presso-  
flessione deviata

# Componenti orizzontali per i pilastri

Nota:

Allo SLU, la pressoflessione deviata è molto meno gravosa che alle TA

Se la struttura è ben dimensionata, cioè ha rotazioni non elevate, si può progettare a pressoflessione retta, separatamente per le due direzioni, mantenendosi appena in abbondanza

La verifica a pressoflessione deviata sarà abbastanza facilmente soddisfatta