

Corso di aggiornamento  
Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

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

5 - Analisi strutturale

Spoletto  
11-13 novembre 2010

Aurelio Gheresi

# Il capitolo 10 delle NTC 08

Redazione dei progetti strutturali esecutivi  
e delle relazioni di calcolo

# Capitolo 10 e norme precedenti

- Il capitolo 10 delle NTC 08 deriva sostanzialmente dalle Istruzioni CNR 10024/86 (del 1986)
- Dal 1986 ad oggi le potenzialità di calcolo sono cambiate radicalmente...  
... ma il capitolo 10 delle NTC 08 non ne tiene conto

# Residui del passato...

Notare:

“Nel caso di analisi svolte con l’ausilio di codici di calcolo...”  
“Qualora l’analisi strutturale sia condotta con codici di calcolo”  
... come se fosse possibile farne a meno

10.1 C

I proge  
e di co  
Restan

omiss

Il progettista resta comunque responsabile dell’intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l’ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.

## 10.2 ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L’AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l’analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l’ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l’affidabilità dei codici utilizzati e verificare l’attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

# Capitolo 10 e norme precedenti

- Il capitolo 10 delle NTC 08 deriva sostanzialmente dalle Istruzioni CNR 10024/86 (del 1986)
- Dal 1986 ad oggi le potenzialità di calcolo sono cambiate radicalmente...  
... ma il capitolo 10 delle NTC 08 non ne tiene conto
- Il capitolo 10 delle NTC 08 è molto importante, ma nell'applicarlo bisogna tener conto del fatto che i tempi sono cambiati

# Capitolo 10.1 - Caratteristiche generali

## 10.1 CARATTERISTICHE GENERALI

I progetti esecutivi riguardanti le strutture devono essere informati a caratteri di chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti e devono inoltre definire compiutamente l'intervento da realizzare. Restano esclusi i piani operativi di cantiere ed i piani di approvvigionamento.

Il progetto deve comprendere i seguenti elaborati:

- Relazione di calcolo strutturale, comprensiva di una descrizione generale dell'opera e dei criteri generali di analisi e verifica.
- Relazione sui materiali;
- Elaborati grafici, particolari costruttivi;
- Piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera;
- Relazione sui risultati sperimentali corrispondenti alle indagini specialistiche ritenute necessarie alla realizzazione dell'opera.

Particolare cura andrà posta nello sviluppare le relazioni di calcolo, con riferimento alle analisi svolte con l'ausilio del calcolo automatico, sia ai fini di facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli, sia ai fini di consentire elaborazioni indipendenti da parte di soggetti diversi dal redattore del documento.

Il progettista resta comunque responsabile dell'intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l'ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.

# Capitolo 10.1 - Caratteristiche generali

## 10.1 CARATTERISTICHE GENERALI

I progetti esecutivi riguardanti le strutture devono essere informati a caratteri di chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti e devono inoltre definire compiutamente l'intervento da realizzare. Restano esclusi i piani operativi di cantiere ed i piani di approvvigionamento.

Il progetto deve comprendere i seguenti elaborati:

- Relazione di calcolo strutturale, comprensiva di una descrizione generale dell'opera e dei criteri generali di analisi e verifica.
  - Relazione sui materiali;
  - Elaborati grafici, particolari costruttivi;
  - Piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera;
  - Relazione sui risultati sperimentali corrispondenti alle ind
- alla realizzazione dell'opera.

Elenco di elaborati  
(niente di particolare)

Particolare cura andrà posta nello sviluppare le relazioni di calcolo, con riferimento alle analisi svolte con l'ausilio del calcolo automatico, sia ai fini di facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli, sia ai fini di consentire elaborazioni indipendenti da parte di soggetti diversi dal redattore del documento.

Il progettista resta comunque responsabile dell'intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l'ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.

# Capitolo 10.1 - Caratteristiche generali

## 10.1 CARATTERISTICHE GENERALI

I progetti esecutivi riguardanti le strutture devono essere informati a caratteri di chiarezza espositiva e di completezza nei contenuti. Devono inoltre definire compiutamente l'intento da realizzare. Restano esclusi i piani operativi.

Il progetto deve comprendere i seguenti contenuti:

- Relazione di calcolo strutturale

- Relazione di analisi e verifica generale di analisi e verifica.

- Relazione sui materiali;

- Elaborati grafici, particolari

- Piano di manutenzione della

- Relazione sui risultati sperimentali alla realizzazione dell'opera.

### Obiettivo delle relazioni di calcolo:

- Facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli

- Consentire elaborazioni indipendenti (per controllo)

dei criteri

necessarie

Particolare cura andrà posta nello sviluppare le relazioni di calcolo, con riferimento alle analisi svolte con l'ausilio del calcolo automatico, sia ai fini di facilitare l'interpretazione e la verifica dei calcoli, sia ai fini di consentire elaborazioni indipendenti da parte di soggetti diversi dal redattore del documento.

Il progettista resta comunque responsabile dell'intera progettazione strutturale.

Nel caso di analisi e verifica svolte con l'ausilio di codici di calcolo, oltre a quanto sopra specificato, e in particolare oltre alla Relazione generale strutturale, si dovranno seguire le indicazioni fornite in § 10.2.



# Capitolo 10.2 - Uso di codici di calcolo

## 10.2 ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

- *Tipologia di codice di calcolo*
  - *Origine del codice di calcolo*
  - *Affidabilità del codice di calcolo*
  - *Verifica dell'attendibilità dei risultati*
  - *Modalità di presentazione dei risultati*
  - *Inquadramento dei risultati*
- Cosa deve fare il progettista?

  - Controllare l'affidabilità dei codici utilizzati
  - Verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti
  - Curare che la presentazione dei risultati sia tale da garantirne leggibilità, corretta interpretazione, riproducibilità
- *Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.*

# Capitolo 10.2 – Uso di codici di calcolo

## 10.2 ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

- *Tipo di analisi svolta*
- *Origine e Caratteristiche dei Codici di Calcolo*
- *Affidabilità dei codici utilizzati*
- *Validazione dei codici.*
- *Modalità di presentazione dei risultati.*
- *Informazioni generali sull'elaborazione.*
- *Giudizio motivato di accettabilità dei risultati.*

### Problematiche:

- **Metodi di analisi**
- **Codici di calcolo e modellazione strutturale**
- **Schemi di calcolo e loro combinazione**
- **Giudizio motivato di accettazione dei risultati**

Metodi di analisi  
previsti dalla norma

# Capitolo 10.2 - Uso di codici di calcolo

## 10.2 ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

- *Tipo di analisi svolta*

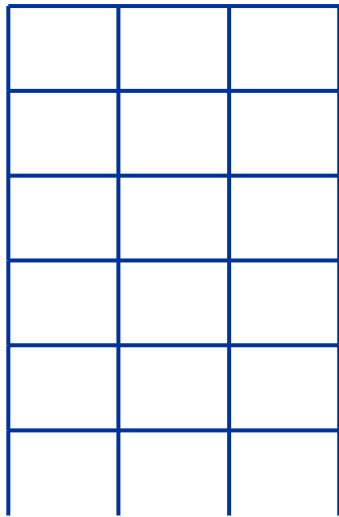
Occorre preliminarmente:

- dichiarare il tipo di analisi strutturale condotta (di tipo statico o dinamico, lineare o non lineare) e le sue motivazioni;
- indicare il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale e le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni.
- indicare chiaramente le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti. In ogni caso va motivato l'impiego delle combinazioni o dei percorsi di carico adottati, in specie con riguardo alla effettiva esaustività delle configurazioni studiate per la struttura in esame.

# Comportamento reale di una struttura durante il sisma

- Il sisma è un'azione dinamica (il moto di suolo causa il movimento di tutte le parti della struttura)
- Durante un terremoto violento si supera il limite elastico dei materiali: il comportamento è quindi non lineare
- Una conoscenza "esatta" del comportamento durante il sisma dovrebbe essere cercata con una **analisi dinamica non lineare**:
  - Assegnare un accelerogramma
  - Integrare le equazioni del moto
  - Usare un modello della struttura non lineare

# Comportamento oltre il limite elastico



Modello per i materiali



Legame momento-curvatura  
( $M-\chi$ ) per la sezione  
mediante modello a fibre



Modello di telaio con  
cerniere plastiche



Modello di telaio  
a fibre

# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

Problemi (per i pilastri - telai piani)

- Resistenza e duttilità variano con lo sforzo normale
- Se lo sforzo normale è alto:
  - È difficile schematizzare il legame con un a bilatera elastica-perfettamente plastica
  - C'è un ramo decrescente molto accentuato, con forte perdita di resistenza
  - La duttilità si riduce fortemente

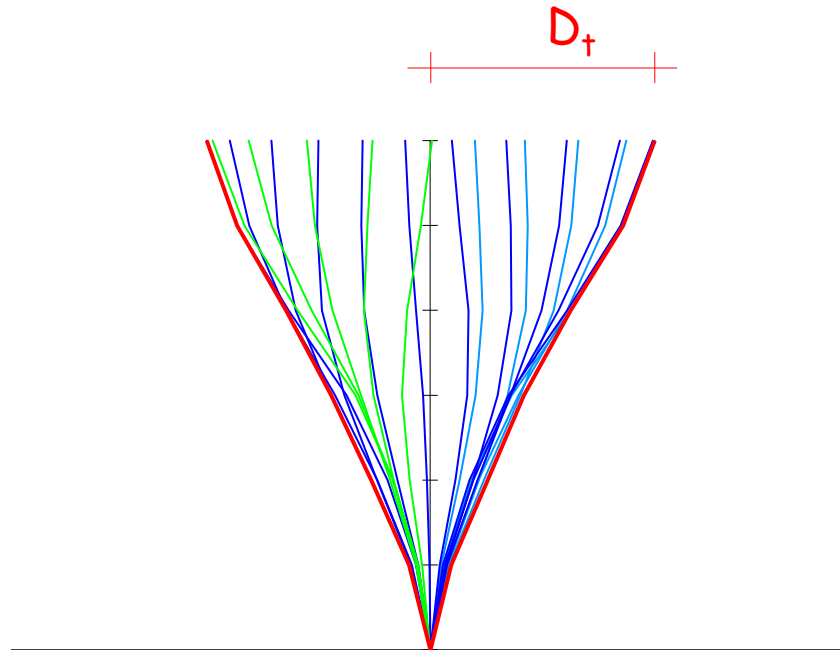
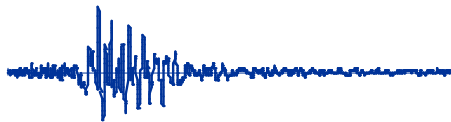
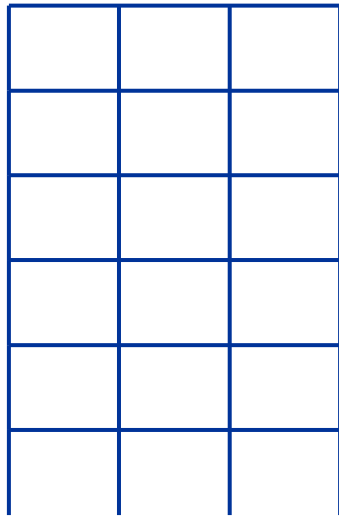
# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

Problemi (per i pilastri - telai spaziali)

- Occorre tener conto della interazione tra  $N$ ,  $M_x$  ed  $M_y$
- La modellazione è difficile ed i risultati potrebbero non essere attendibili



# Risposta dinamica inelastica



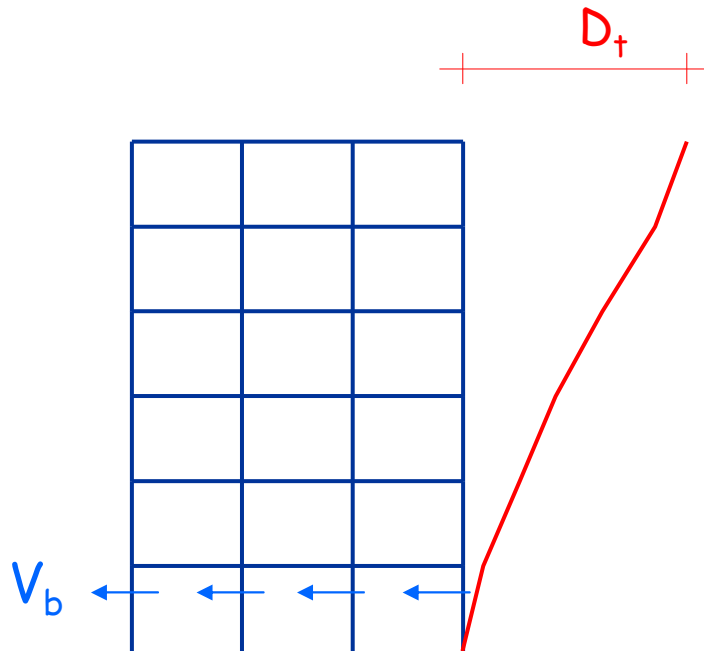
La struttura si deforma nel tempo

La forma della deformata varia nel tempo

Compaiono e scompaiono cerniere

In rosso: inviluppo degli spostamenti

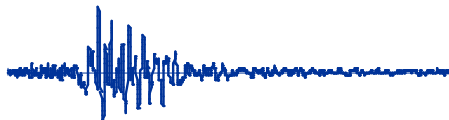
# Risposta dinamica inelastica



L'analisi dinamica non lineare fornisce i valori massimi di:

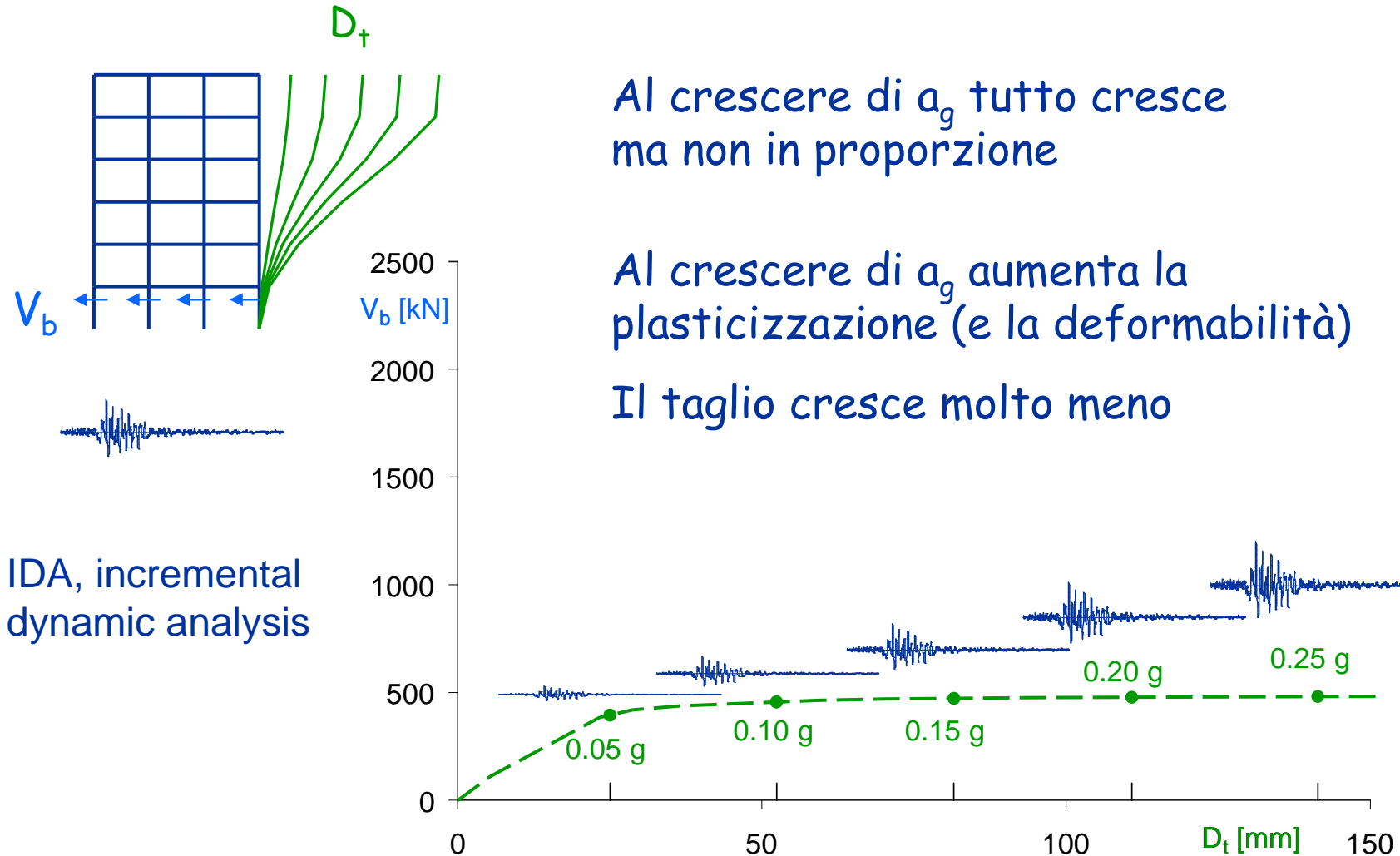
- Spostamenti
- Caratteristiche di sollecitazione
- Rotazioni plastiche

$V_b$  taglio massimo al piede



In rosso: inviluppo degli spostamenti

# Risposta dinamica inelastica



# Analisi dinamica non lineare

Consente di valutare bene la risposta strutturale, ma:

- Può essere usata solo per verifica (richiede una preliminare definizione delle resistenze)
- Va effettuata con specifici accelerogrammi - vedi NTC 08, punto 3.2.3.6 (almeno 3  $\Rightarrow$  ma sono sufficienti?)
- Richiede l'uso di programmi molto sofisticati ed una accurata modellazione del comportamento ciclico delle sezioni  $\Rightarrow$  possibili errori

Quindi: possibile solo a livello di ricerca

# Alternative all'analisi dinamica inelastica

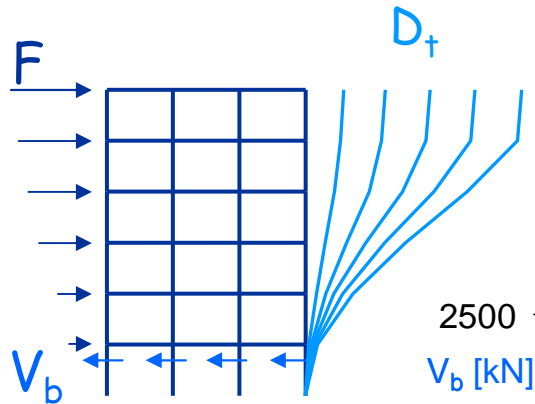
## Analisi statica non lineare

Effettuare una analisi statica non lineare

- Esaminare il comportamento non lineare della struttura soggetta a forze statiche crescenti (analisi pushover)

# Alternative all'analisi dinamica inelastica

## Analisi statica non lineare



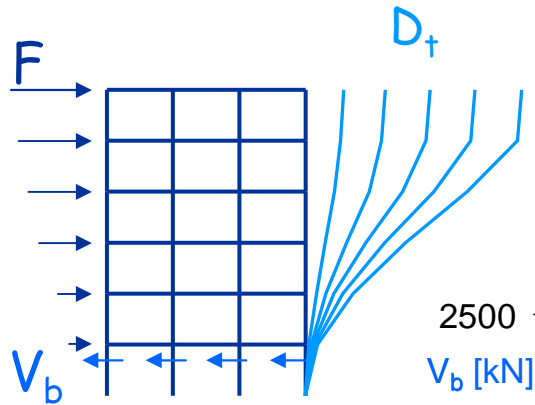
Si applica una distribuzione di  $F$   
e la si fa crescere

Al crescere di  $F$  si ha una  
progressiva plasticizzazione  
della struttura



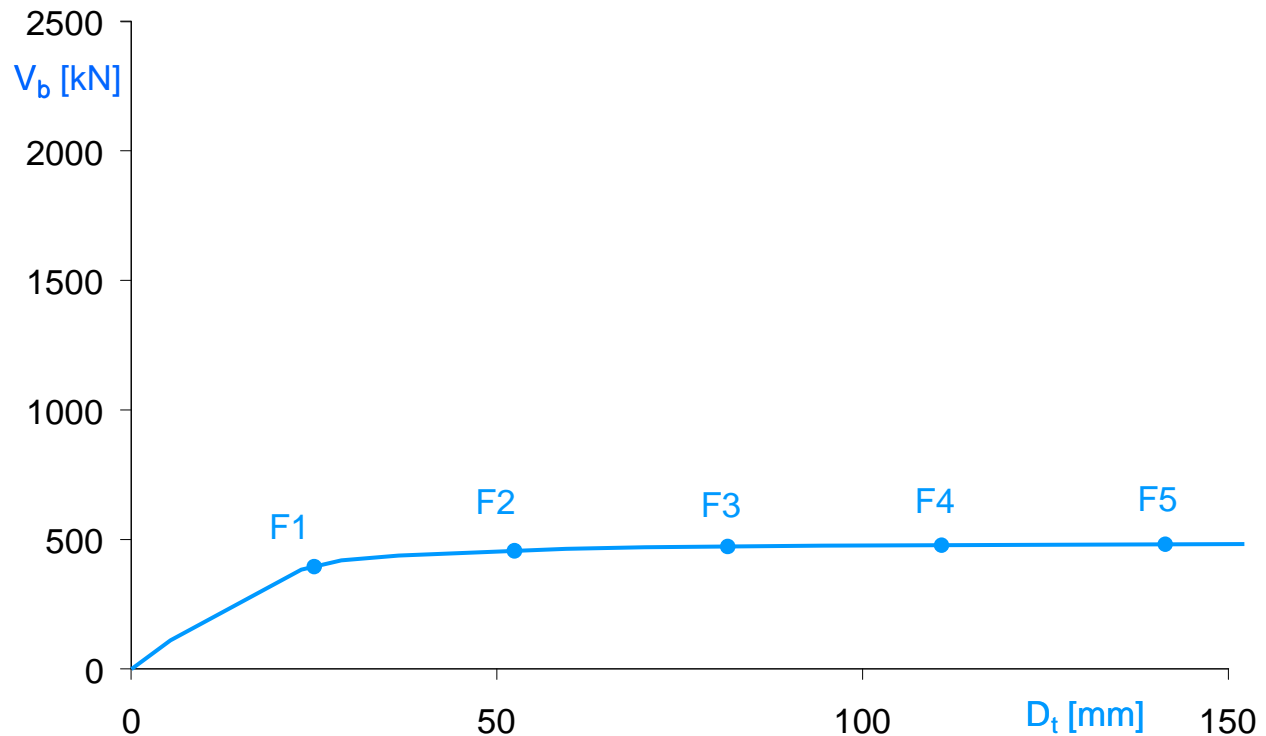
# Alternative all'analisi dinamica inelastica

## Analisi statica non lineare



Problemi:

- Quale distribuzione di forze usare?



# Modi approssimati per valutare la risposta al sisma

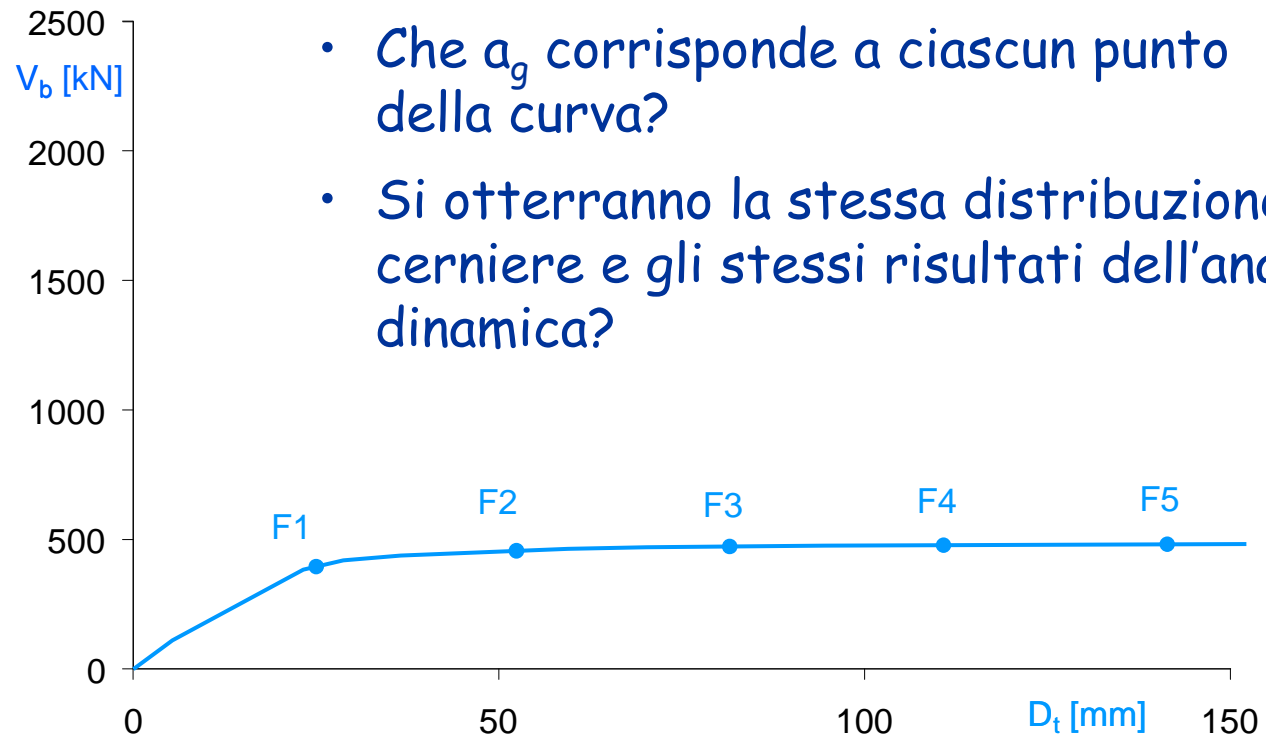
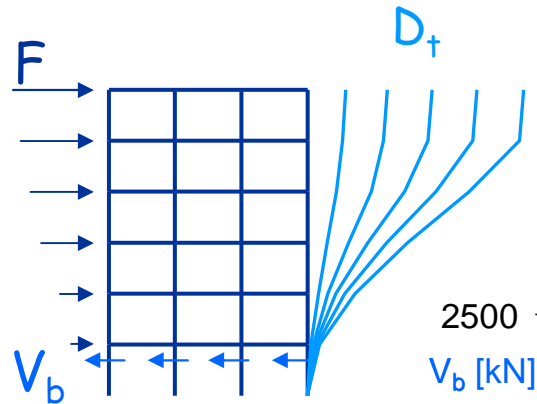
Effettuare una **analisi statica non lineare**

- Esaminare il comportamento non lineare della struttura soggetta a forze statiche crescenti (analisi pushover)
- Stimare gli spostamenti che la struttura avrà durante il terremoto  
(ipotesi di uguaglianza - o relazione nota - tra spostamenti dinamici in campo elastico e in campo non lineare)



# Alternative all'analisi dinamica inelastica

## Analisi statica non lineare



Problemi:

- Quale distribuzione di forze usare?
- Che  $a_g$  corrisponde a ciascun punto della curva?
- Si otterranno la stessa distribuzione di cerniere e gli stessi risultati dell'analisi dinamica?

# Modi approssimati per valutare la risposta al sisma

Effettuare una **analisi statica non lineare**

- Stimare gli spostamenti che la struttura avrà durante il terremoto  
(ipotesi di uguaglianza - o relazione nota - tra spostamenti dinamici in campo elastico e in campo non lineare)
- Esaminare il comportamento non lineare della struttura soggetta a forze statiche crescenti (analisi pushover)
- Giudicare la struttura in base a quello che le accade per gli spostamenti da sisma stimati

**Displacement based design**

**Progettazione basata sugli spostamenti**

# Analisi statica non lineare

In quali casi può essere utile?

Progetto di nuove costruzioni:

- Solo in casi particolari, se si vuole dimostrare che il superamento della resistenza in qualche sezione non porta comunque al collasso

Valutazione della vulnerabilità di costruzioni esistenti:

- Se la struttura non ha collasso fragile, l'analisi statica non lineare può essere indispensabile per tener conto correttamente della duttilità

# Modi approssimati per valutare la risposta al sisma

Approccio tradizionale: **analisi lineare**

- Si assume che il comportamento dinamico non lineare della struttura sarà accettabile se essa è in grado di sopportare forze nettamente più piccole di quelle che subirebbe se rimanesse in campo elastico
- Le forze sono valutate mediante un coefficiente riduttivo  $q$  (fattore di struttura)
- Si giudicare la struttura in base alla resistenza delle sezioni alle sollecitazioni prodotte dalle forze così determinate

**Force based design**

Progettazione basata sulle forze

# Possibili approcci per valutare la risposta elastica

Analisi dinamica, con valutazione della storia della risposta (istante per istante)

Analisi modale con spettro di risposta, per valutare la massima risposta

Analisi statica, per valutare in maniera approssimata la massima risposta

# Analisi dinamica, con valutazione della storia della risposta

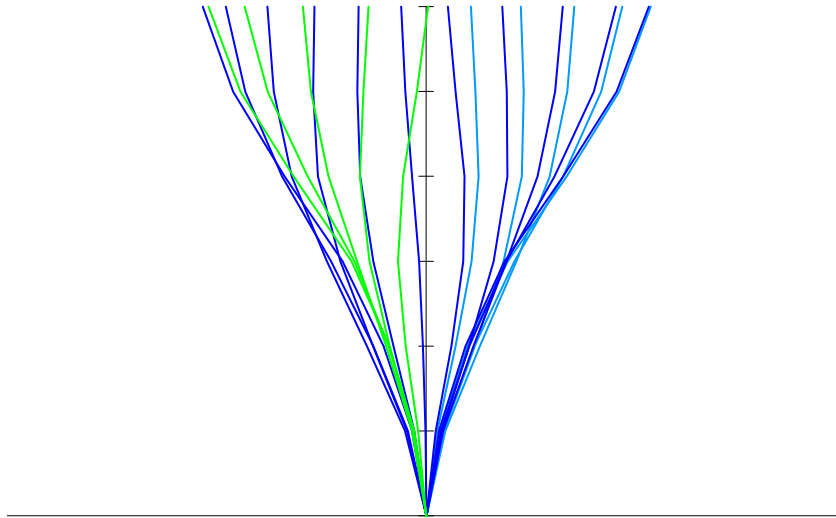
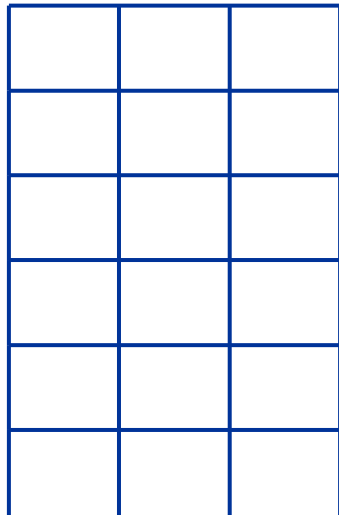
- Se il sistema ha  $n$  gradi di libertà (dinamici) il suo moto è descritto con  $n$  funzioni spostamento  $\mathbf{u}$  (quindi con un vettore di funzioni  $\mathbf{u}$ )
- L'equazione di equilibrio dinamico è

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k} \mathbf{u} = -\mathbf{m} \mathbf{I} \ddot{\mathbf{u}}_g$$

che è formalmente simile a quella di un oscillatore semplice (ma in realtà è un sistema di equazioni differenziali)

- Risolverla numericamente (cioè determinare la risposta istante per istante) è possibile ma è matematicamente oneroso

# Risposta dinamica elastica



La struttura si deforma nel tempo

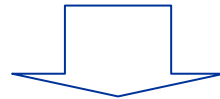
La forma della deformata varia nel tempo

# Analisi dinamica, con valutazione della storia della risposta

- Determinare la risposta istante per istante è possibile ma è matematicamente oneroso

Ma ci serve veramente?

- In realtà a noi interessano i massimi spostamenti e le massime sollecitazioni



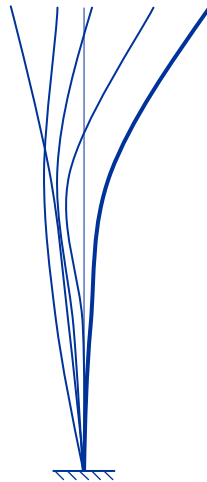
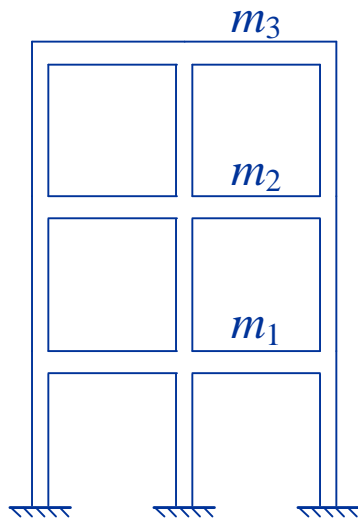
Per ottenere questi si può usare  
un procedimento più semplice:  
l'analisi modale (con spettro di risposta)



# Analisi modale

## Modi di oscillazione libera della struttura

- Se si assegna una deformata iniziale qualsiasi e si lascia la struttura libera di oscillare ...

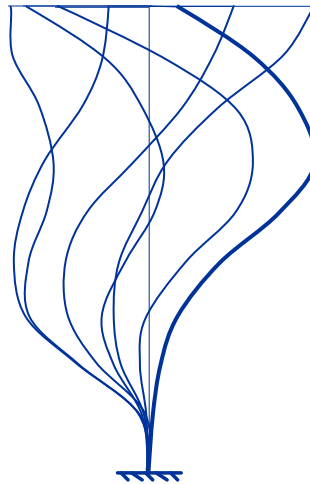
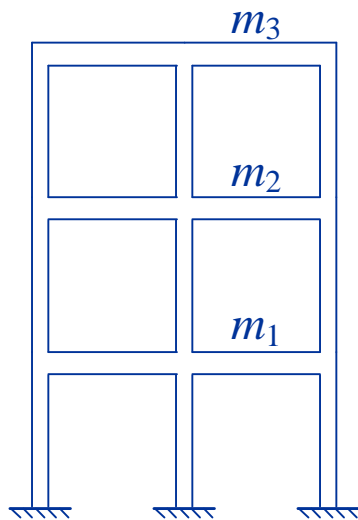


... la struttura si muove in maniera disordinata

# Analisi modale

## Modi di oscillazione libera della struttura

- Se si assegna una deformata iniziale qualsiasi e si lascia la struttura libera di oscillare ...



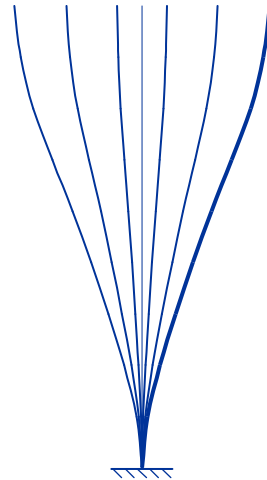
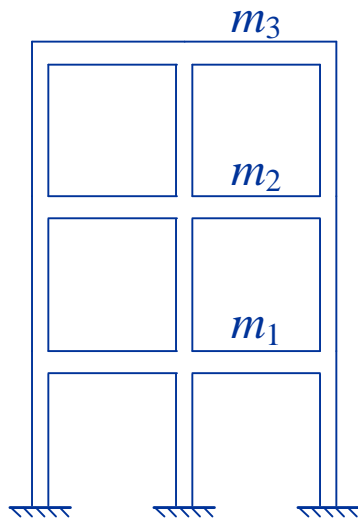
... la struttura si muove in maniera disordinata

altro esempio

# Analisi modale

Questo è un "modo di oscillazione libera"

- Se si assegna una particolare deformata iniziale e si lascia la struttura libera di oscillare ...



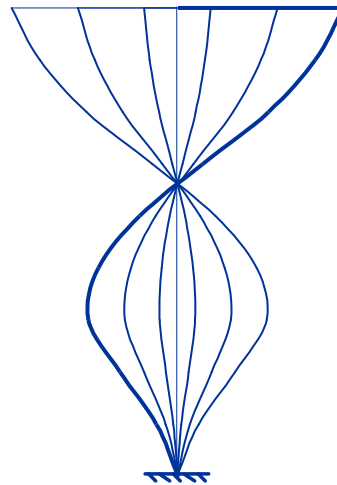
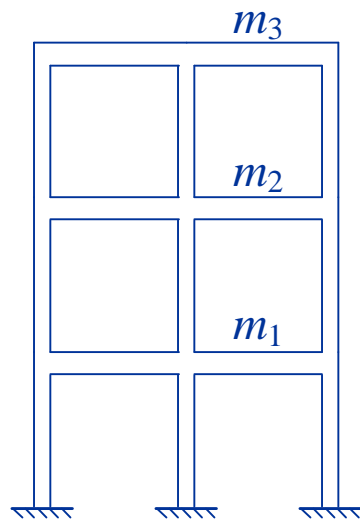
... la struttura si muove mantenendo la forma della deformata ed oscilla con un periodo ben preciso

$T$  = periodo di oscillazione libera

# Analisi modale

Questo è un "modo di oscillazione libera"

- Se si assegna una particolare deformata iniziale e si lascia la struttura libera di oscillare ...



altro esempio

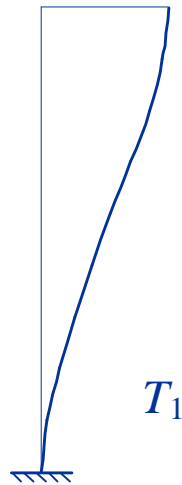
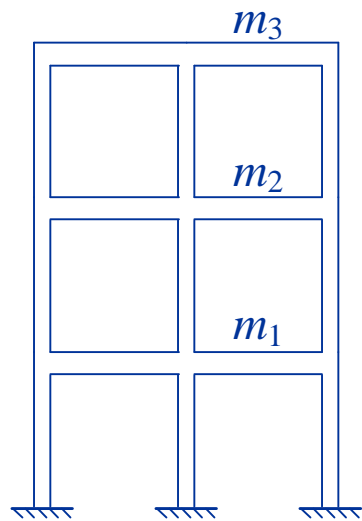
... la struttura si muove mantenendo la forma della deformata ed oscilla con un periodo ben preciso

$T$  = periodo di oscillazione libera

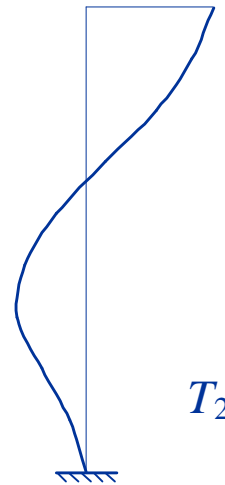
# Modi di oscillazione libera

Telaio piano (con traversi inestensibili):

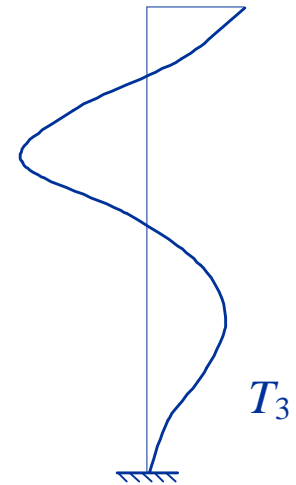
numero di modi di oscillazione libera = numero di piani



Primo modo



Secondo modo

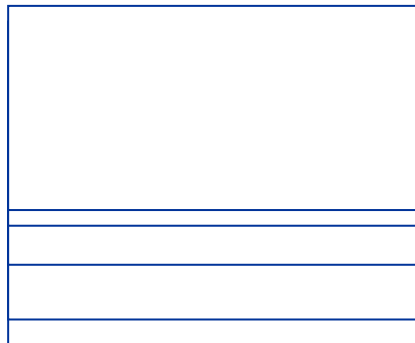


Terzo modo

# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):  
numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:  
- n modi di traslazione in una direzione



Vista dell'edificio,  
dall'alto

# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):

numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:

- n modi di traslazione in una direzione
- n modi di traslazione nell'altra direzione



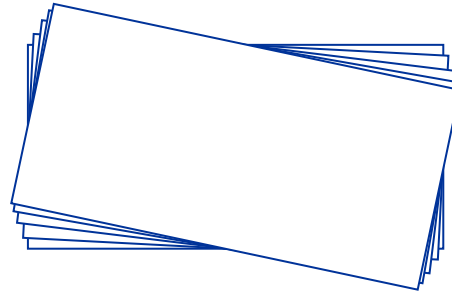
Vista dell'edificio,  
dall'alto

# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):  
numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta ha due assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono disaccoppiati:

- n modi di traslazione in una direzione
- n modi di traslazione nell'altra direzione
- n modi di rotazione



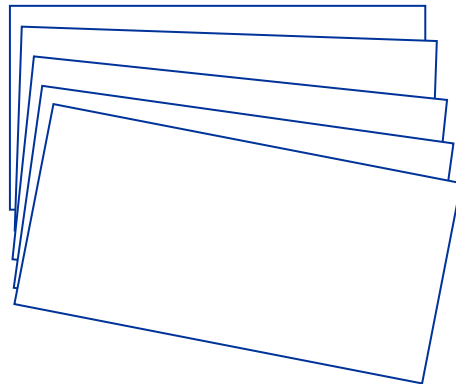
Vista dell'edificio,  
dall'alto



# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale (con impalcati indeformabili nel piano):  
numero di modi di oscillazione libera =  $3 \times$  numero di piani

Se la pianta non ha assi di simmetria, i modi di oscillazione libera sono accoppiati



# Modi di oscillazione libera

Telaio spaziale

senza impalcati indeformabili nel piano

Il numero di modi di oscillazione libera è molto maggiore

# Moto libero

(trattazione matematica)

L'equazione del moto, in termini matriciali, è analoga a quella dell'oscillatore semplice

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k} \mathbf{u} = 0$$

La soluzione, in caso di moto libero con deformata modale, è una funzione armonica

$$u_i(t) = \phi_{i,j} \cos(\omega_j t)$$

a condizione che sia

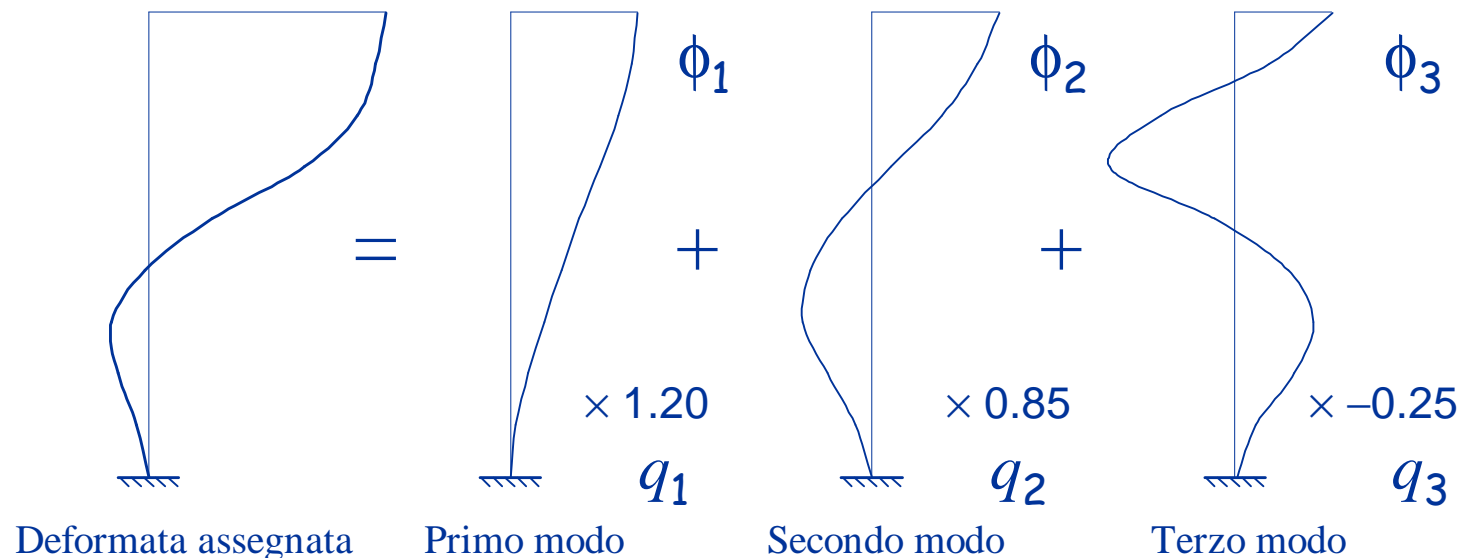
$$\det(\mathbf{k} - \omega_j^2 \mathbf{m}) = 0$$

Da questa si ricavano le frequenze angolari  $\omega_j$  e quindi i periodi  $T_j$  (autovalori) e le deformate  $\phi$  (autovettori)

# Equazione del moto

(trattazione matematica)

Una qualsiasi deformata può essere espressa come combinazione delle deformate modali



$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\phi} \mathbf{q}$$

# Equazione del moto (risposta ad un accelerogramma)

L'equazione del moto  $\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k} \mathbf{u} = -\mathbf{m} \mathbf{I} \ddot{u}_g$

diventa  $\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = -\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{m} \mathbf{I} \ddot{u}_g$

Anche in questo caso se la struttura è classicamente smorzata il sistema si scompone in tante equazioni separate

$$\ddot{q}_j + 2 \xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = (-\Gamma_j) \ddot{u}_g$$

$$\Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}^2}$$

Si noti che l'accelerazione del terreno è moltiplicata per  $\Gamma_j$

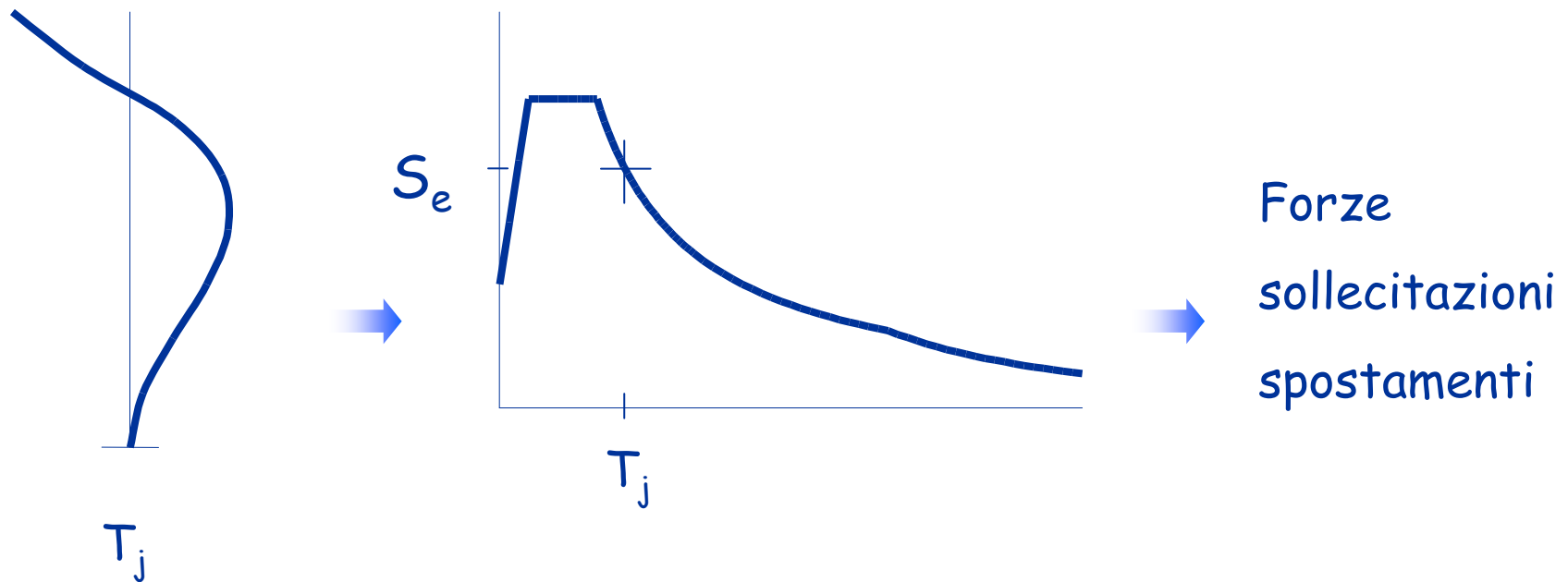
**Coefficiente di partecipazione modale:**  
indica se il contributo del modo al moto totale del sistema è più, o meno, rilevante

# Analisi modale con spettro di risposta

- La struttura che oscilla secondo uno dei suoi "modi" si comporta come un oscillatore semplice
- È possibile ricavare di conseguenza un insieme di forze e calcolare le sollecitazioni prodotte
- Il contributo di quel "modo" al moto complessivo della struttura è scalato mediante un **coefficiente di partecipazione modale**  $\phi$  - in maniera più chiara - in funzione della **massa partecipante**

# Analisi modale con spettro di risposta

Consiste nel valutare separatamente la risposta della struttura vincolata a deformarsi secondo ciascuno dei suoi modi di oscillazione . . .



# Contributo dei singoli modi

$S_e(T_j)$  = ordinata spettrale corrispondente al periodo  $T_j$

Il taglio alla base corrispondente al modo  $j$  è

$$V_{b,j} = M_j^* S_e(T_j)$$

$M_j^*$  è detta massa partecipante

$$M_j^* = \sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \Gamma_j = \frac{\left( \sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,j}^2}$$



# Analisi modale con spettro di risposta

- La struttura che oscilla secondo uno dei suoi "modi" si comporta come un oscillatore semplice
- È possibile ricavare di conseguenza un insieme di forze e calcolare le sollecitazioni prodotte
- Il contributo di quel "modo" al moto complessivo della struttura è scalato mediante un coefficiente di partecipazione modale  $\phi$  - in maniera più chiara - in funzione della massa partecipante
- La somma delle masse partecipanti di tutti i modi è pari alla massa totale della struttura  
(per questo motivo si parla in genere di masse partecipanti come percentuale della massa totale)

# Analisi modale con spettro di risposta

Consiste nel valutare separatamente la risposta della struttura vincolata a deformarsi secondo ciascuno dei suoi modi di oscillazione . . .

. . . e poi combinare le massime sollecitazioni (o spostamenti) trovati per i singoli modi con criteri statistici

- SRSS = radice quadrata della somma dei quadrati
- CQC = combinazione quadratica completa

- Attenzione: nel fare la combinazione si perde il segno (che può essere utile);  
ma se c'è un modo prevalente si può assegnare a ciascun valore il segno che esso ha nel modo prevalente

# Contributo dei singoli modi

Il primo modo è nettamente predominante per entità di massa partecipante. Le forze sono tutte dello stesso verso

Gli altri modi hanno masse partecipanti via via minori. Essi danno forze discordi, che producono un effetto minore rispetto alla base

In generale, è opportuno considerare tanti modi da:

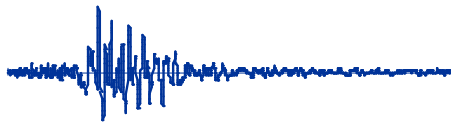
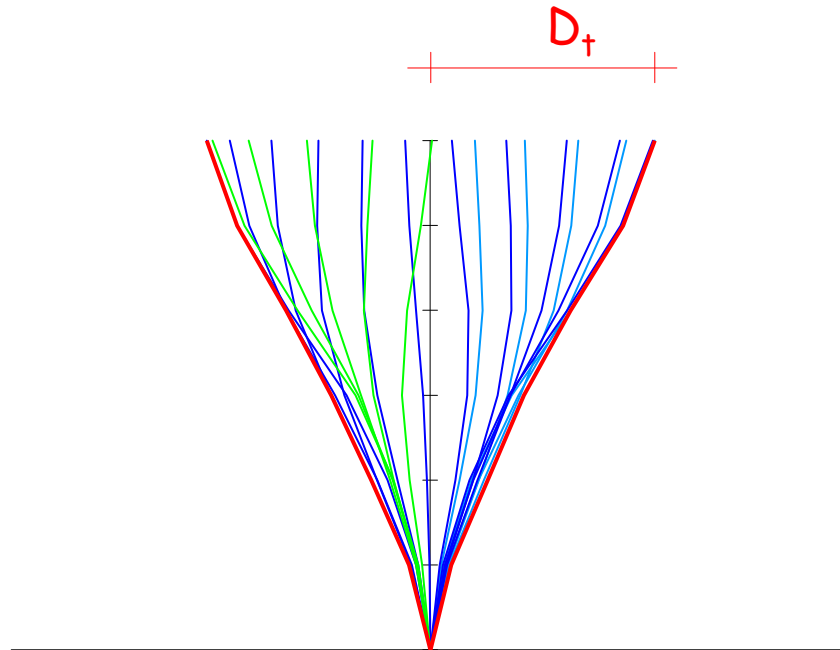
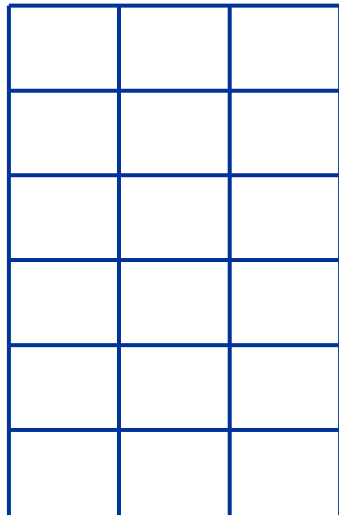
- raggiungere una massa partecipante dell'85%
- non trascurare modi con massa partecipante superiore al 5%

# Considerazioni

Negli schemi spaziali è più difficile valutare l'importanza dei modi:

- se il comportamento è disaccoppiato, sono eccitati solo quei modi che danno spostamento nella direzione di azione del sisma
- in caso contrario tutti i modi possono dare contributo
- se non vi è un impalcato indeformabile nel suo piano il numero di modi cresce enormemente ed è più difficile cogliere la risposta totale della struttura

# Analisi modale



La struttura si deforma nel tempo

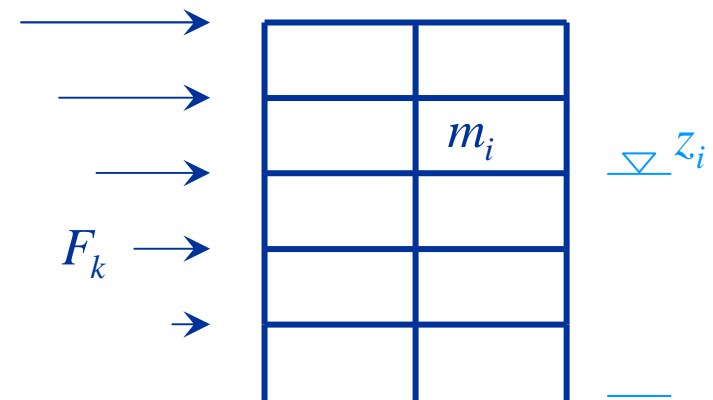
La forma della deformata varia nel tempo

L'analisi modale fornisce l'involuppo degli spostamenti

# Analisi statica

Consiste nel considerare un unico insieme di forze, che rappresentano (in modo semplificato) l'effetto del primo modo

$$F_k = m_k z_k \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n m_i z_i} S_e(T_1)$$



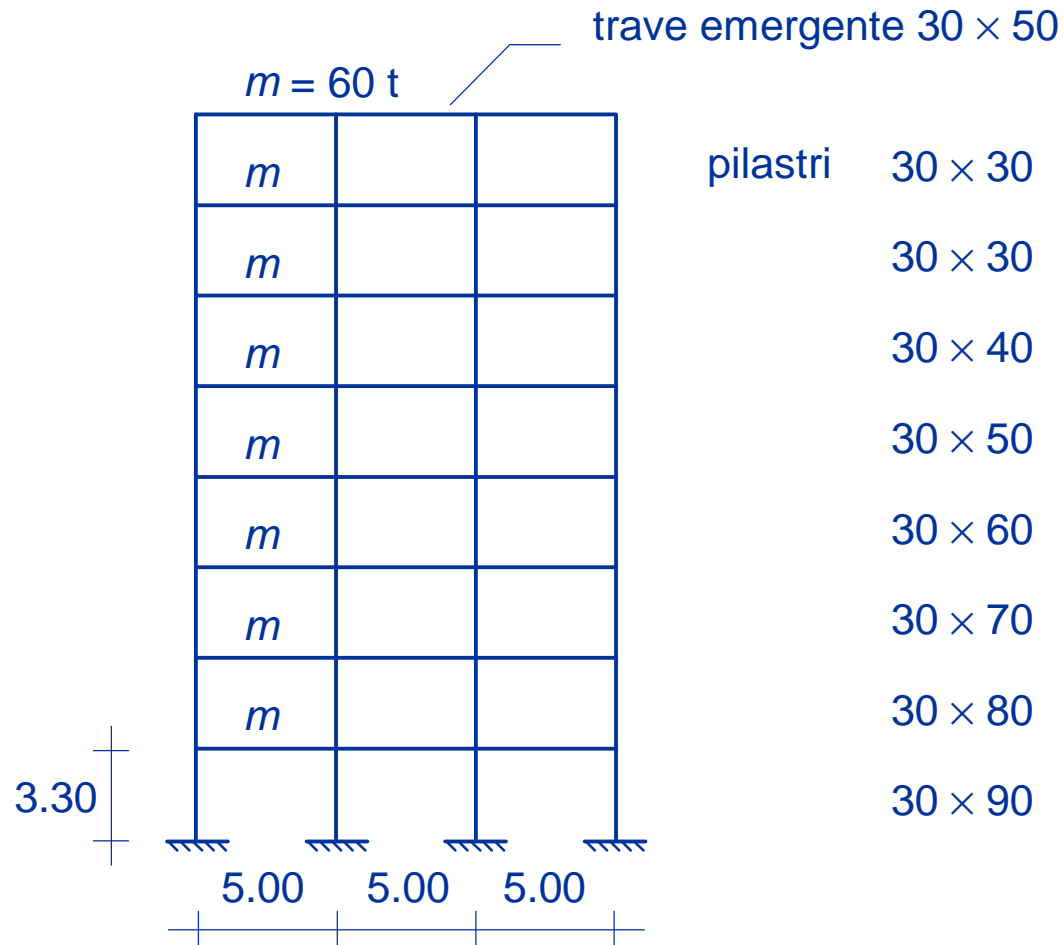
Il periodo proprio può essere valutato con formule semplificate

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

Le forze possono essere ridotte con  $\lambda=0.85$  se l'edificio ha almeno 3 piani e periodo non troppo alto

# Confronto analisi statica - modale

## Edificio con travi emergenti



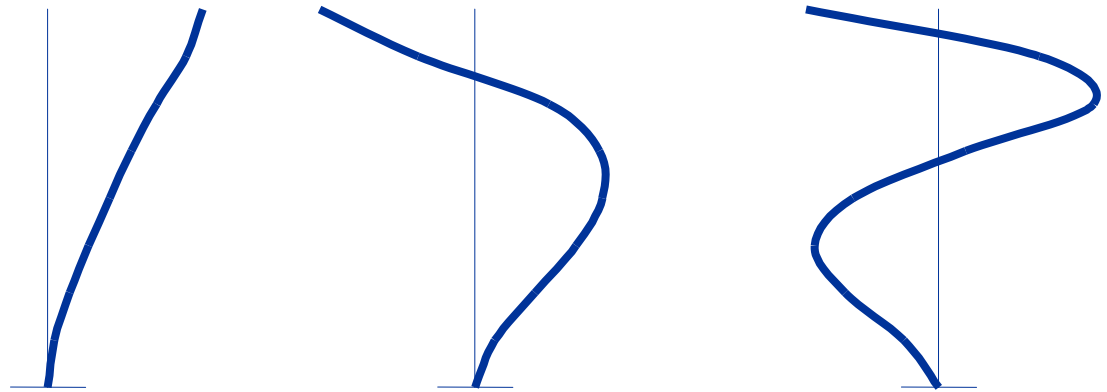
pilastri     $30 \times 30$   
 $30 \times 30$   
 $30 \times 40$   
 $30 \times 50$   
 $30 \times 60$   
 $30 \times 70$   
 $30 \times 80$   
 $30 \times 90$

Zona 3  
 $a_g = 0.15 g$

Suolo B

Classe di  
duttilità B

# Periodi, accelerazioni spettrali, masse partecipanti Edificio con travi emergenti



	Modo 1	Modo 2	Modo 3
$T$	1.183 s	0.461 s	0.259 s
$S_e$	0.0484 g	0.1145 g	0.1145 g
$M^*/M$	70.1 %	13.7 %	5.1 %



# Forze statiche - modali [kN]

## Edificio con travi emergenti

	modale			analisi statica
piano	modo 1	modo 2	modo 3	
8	40.0	-39.1	19.5	50.6
7	35.8	-14.4	-14.9	44.3
6	28.1	18.6	-22.8	38.0
5	21.7	31.3	-4.0	31.6
4	16.0	32.1	12.5	25.3
3	10.6	25.4	18.2	19.0
2	5.7	15.1	13.7	12.7
1	1.8	5.0	5.1	6.3

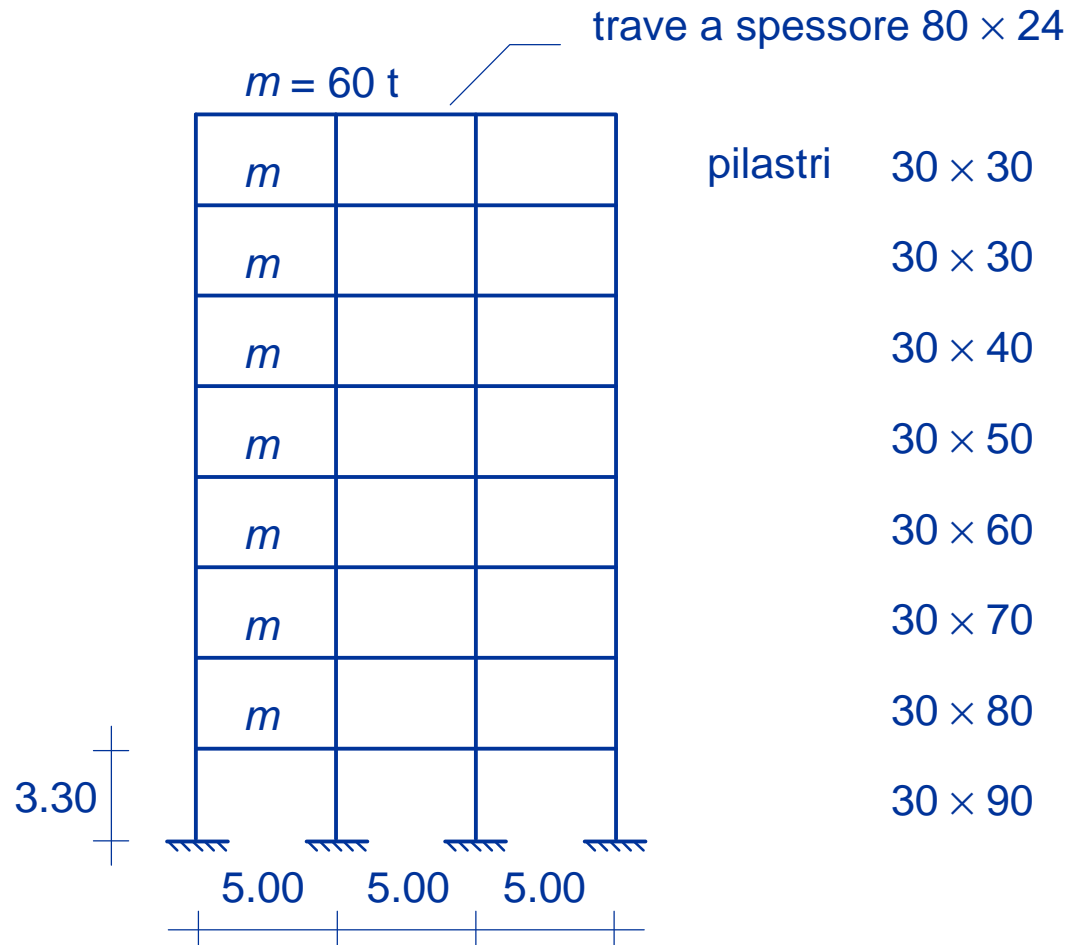
# Tagli statici - modali [kN]

## Edificio con travi emergenti

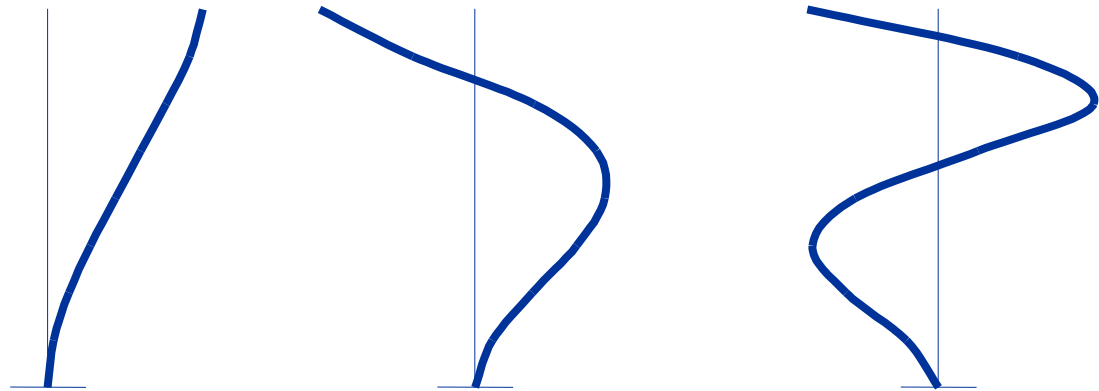
piano	analisi modale	analisi statica	differenza %
8	59.2	50.6	-14.5
7	92.9	94.9	2.2
6	111.1	132.9	19.6
5	127.6	164.5	28.9
4	144.8	189.9	31.1
3	161.7	208.8	29.2
2	173.7	221.5	27.5
1	178.1	227.8	27.9

# Confronto analisi statica - modale

## Edificio con travi a spessore



# Periodi, accelerazioni spettrali, masse partecipanti Edificio con travi emergenti



	Modo 1	Modo 2	Modo 3
$T$	1.738 s	0.604 s	0.328 s
$S_e$	0.0329 g	0.0947 g	0.1145 g
$M^*/M$	70.9 %	11.8 %	5.4 %

# Forze statiche - modali [kN]

## Edificio con travi a spessore

	modale			analisi statica
piano	modo 1	modo 2	modo 3	
8	26.3	-30.3	20.4	34.5
7	24.1	-12.2	-12.5	30.1
6	20.1	11.6	-24.2	25.8
5	15.9	23.6	-6.2	21.5
4	11.5	25.4	12.9	17.2
3	7.3	19.9	19.6	12.9
2	3.6	11.2	14.4	8.6
1	1.0	3.4	5.0	4.3

# Tagli statici - modali [kN]

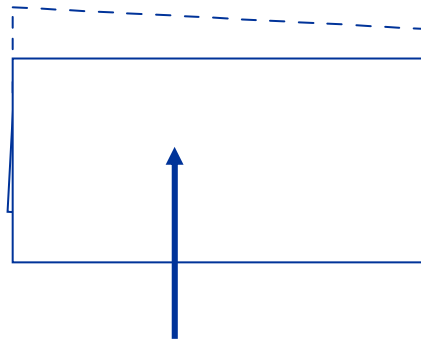
## Edificio con travi a spessore

piano	analisi modale	analisi statica	differenza %
8	45.0	34.5	-23.4
7	66.4	64.6	-2.7
6	78.7	90.4	15.0
5	89.6	112.0	25.0
4	100.0	129.2	29.2
3	112.3	142.1	26.5
2	121.9	150.7	23.6
1	125.3	155.0	23.7

# Analisi statica o analisi modale?

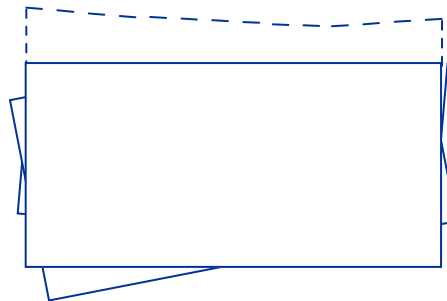
L'analisi statica fornisce risultati attendibili purché:  
- la struttura abbia comportamento piano (basse rotazioni planimetriche)

Analisi statica



Per edifici con  
forti rotazioni,  
non va bene

Analisi modale



modo 1

modo 2

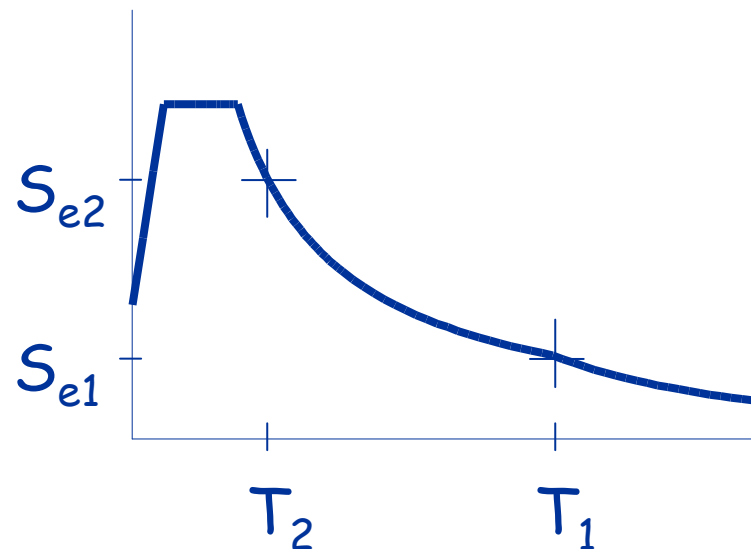
inviluppo

# Analisi statica o analisi modale?

L'analisi statica è cautelativa purché:

- la struttura abbia comportamento piano (basse rotazioni planimetriche)
- la struttura abbia periodo non eccessivamente alto

accelerazione  
molto bassa,  
non cautelativa





# Analisi statica o analisi modale?

L'analisi statica è cautelativa purché:

- la struttura abbia comportamento piano (basse rotazioni planimetriche)
- la struttura abbia periodo non eccessivamente alto
- la stima del periodo proprio sia affidabile (o, meglio, corretta con la formula di Rayleigh)

L'uso del coefficiente riduttivo  $\lambda$  rende i risultati dell'analisi statica non particolarmente gravosi rispetto a quelli dell'analisi modale

# Analisi statica o analisi modale?

La norma vieta l'uso dell'analisi statica se:

- il periodo proprio supera  $2.5 T_c$
- la struttura è irregolare in altezza

Commento:

Il riferimento all'irregolarità in altezza non sembra coerente con gli studi teorici, che evidenziano l'importanza della regolarità in pianta

# Analisi statica o analisi modale?

Oggi l'analisi modale è sicuramente il metodo principale di riferimento per l'analisi strutturale, perché è affidabile e ormai alla portata di tutti (grazie ai programmi per computer)

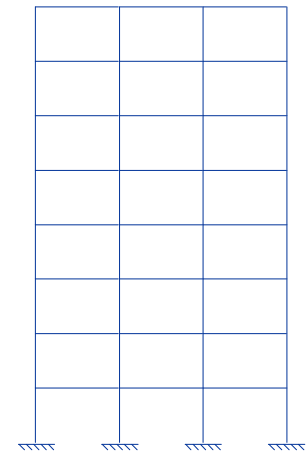
L'analisi statica è però uno strumento fondamentale per capire il comportamento fisico della struttura e per valutarne a priori la risposta (e quindi anche per controllare a posteriori i risultati dell'analisi modale)

# Risposta sismica

Schemi a più gradi di libertà  
in campo plastico

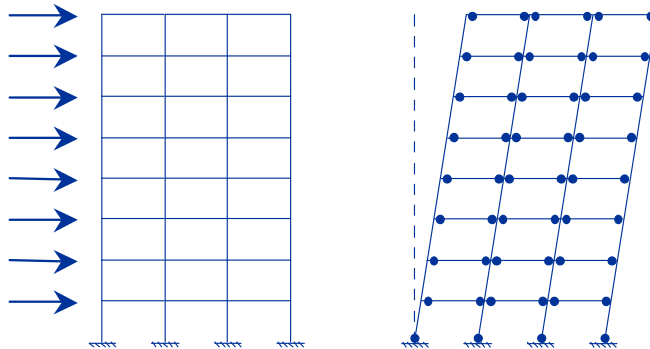
# Dalla sezione alla struttura

Per schemi a più gradi di libertà



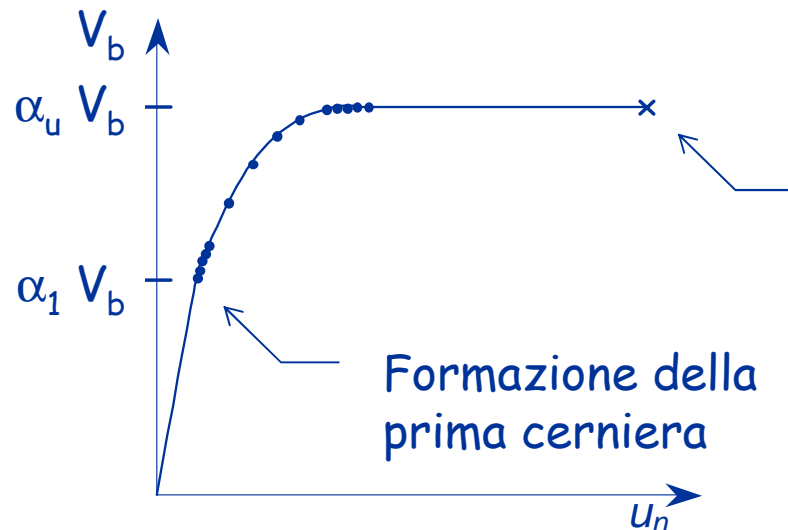
il passaggio tra comportamento della  
sezione e comportamento globale è  
molto più complesso

# Meccanismi di collasso per schemi multipiano



Notare:

Buon incremento della forza  
da prima plasticizzazione a  
collasso

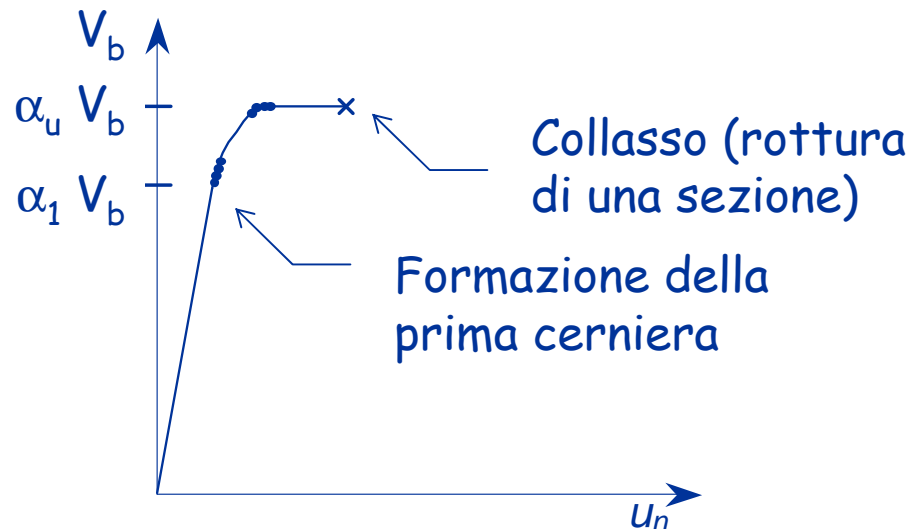
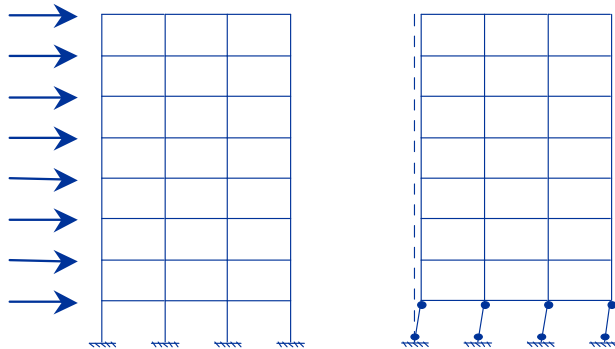


Collasso (rottura  
di una sezione)

Forti spostamenti a collasso =  
elevata duttilità globale

Modalità di collasso:  
globale

# Meccanismi di collasso per schemi multipiano



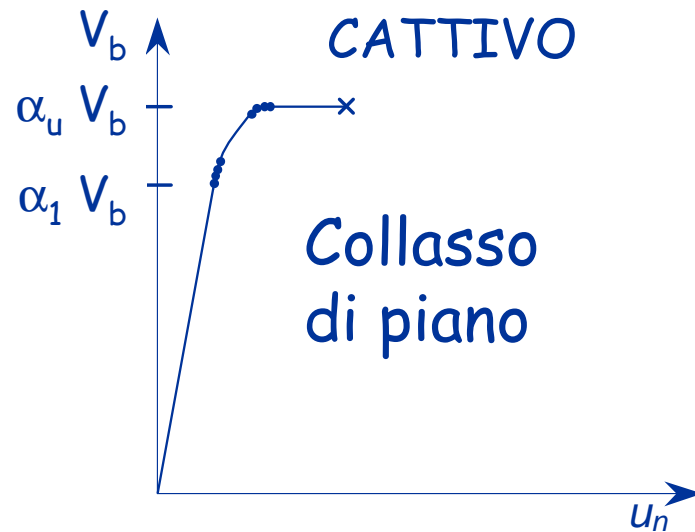
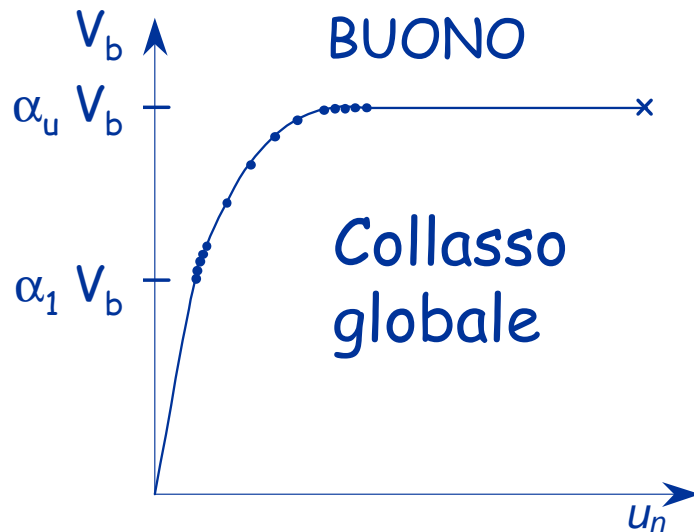
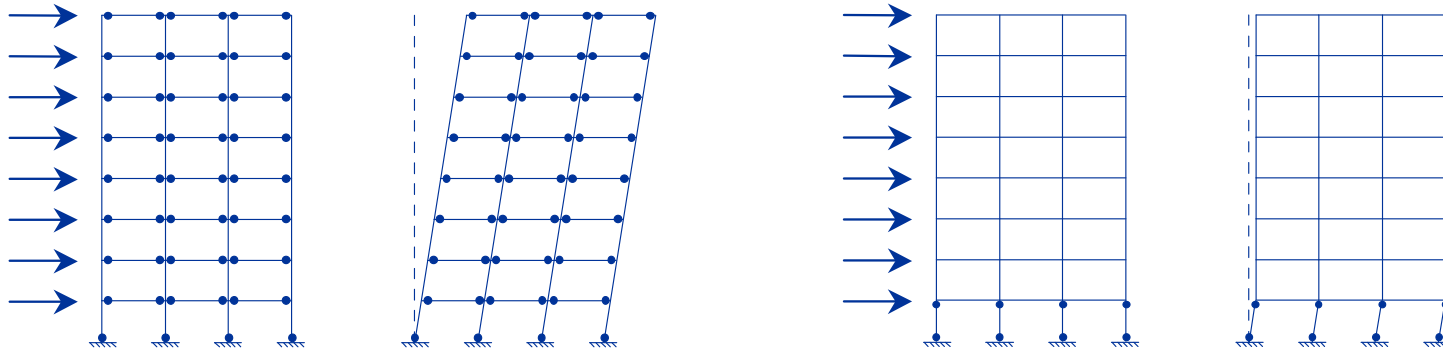
In altri casi, invece:

Basso incremento della forza  
da prima plasticizzazione a  
collasso

Modesti spostamenti a  
collasso = ridotta duttilità  
globale

Modalità di collasso:  
di piano

# Meccanismi di collasso per schemi multipiano



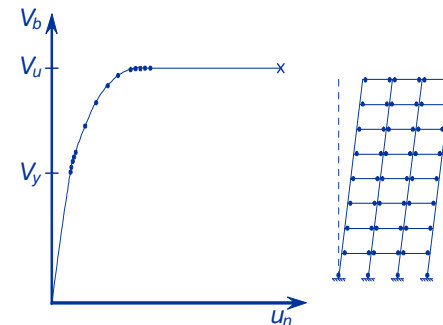
Per avere alta duttilità occorre un collasso globale



# Meccanismi di collasso per schemi multipiano

Nella progettazione, per ottenere una struttura ad alta duttilità occorre:

- garantire una buona duttilità locale (con particolare attenzione ai dettagli costruttivi)
- garantire un collasso globale, fornendo maggiore resistenza ai pilastri (criterio di gerarchia delle resistenze)
- evitare che la mancanza di regolarità porti a concentrazione della plasticizzazione



# Fattore di struttura

Le ordinate dello spettro di progetto sono ottenute dividendo quelle dello spettro di risposta elastica per il fattore di struttura  $q$

Il fattore di struttura tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale della struttura

# Fattore di struttura

$$q = q_0 K_R$$

Dipende da:

- Classe di duttilità dell'edificio
- Duttilità generale della tipologia strutturale
- Rapporto tra resistenza ultima e di prima plasticizzazione
- Regolarità dell'edificio

# Classe di duttilità (comportamento globale e duttilità locale)

## Classe di duttilità alta: CD"A"

Richiede maggiori accorgimenti e maggiori coefficienti di sicurezza nel calcolo ed impone dettagli costruttivi più severi

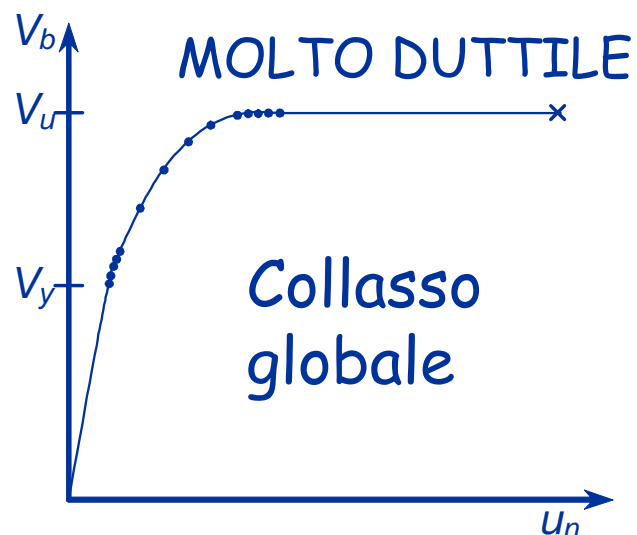
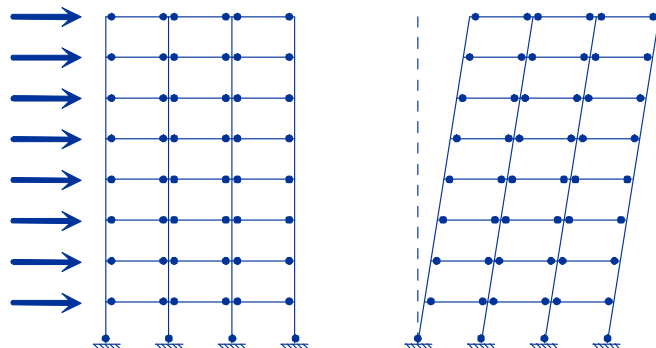
## Classe di duttilità bassa: CD"B"

Forze di calcolo maggiori

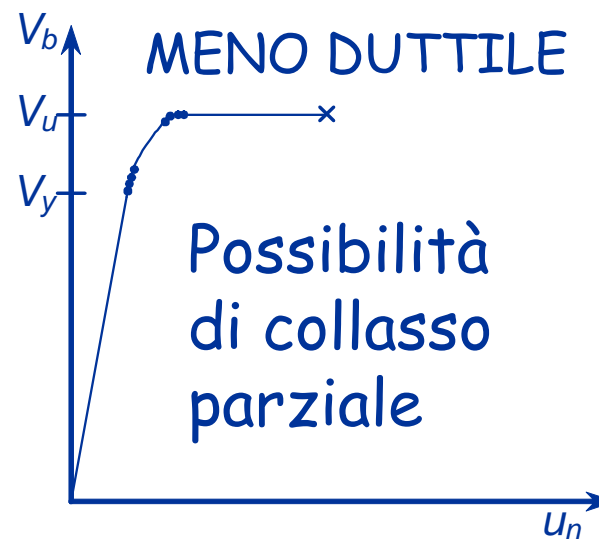
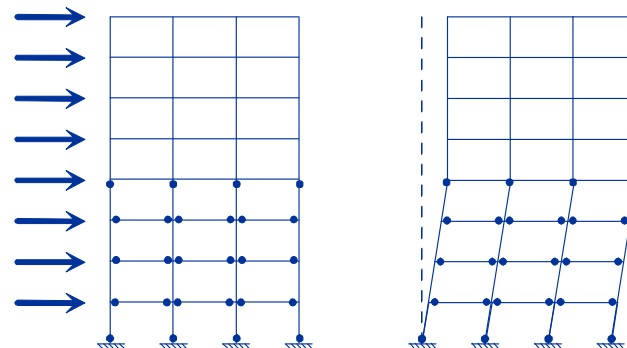
Il progettista deve scegliere, a priori, quale classe di duttilità adottare

# Scelte progettuali: alta o bassa duttilità

## ALTA DUTTILITÀ



## BASSA DUTTILITÀ



Attenzione: il grado di sicurezza deve essere uguale

# Scelte progettuali: alta o bassa duttilità

## ALTA DUTTILITÀ

- Forze sismiche minori (minore resistenza)
- Dettagli costruttivi più curati
- Progetto dei pilastri col criterio di gerarchia delle resistenze
- Evitare irregolarità strutturali per evitare forti concentrazioni della plasticizzazione

## BASSA DUTTILITÀ

- Forze sismiche maggiore (maggiore resistenza)
- Dettagli costruttivi meno curati
- Il criterio di gerarchia delle resistenze si usa ma con coefficienti minori

# Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

$q_0$

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura a telaio*, nella quale le azioni verticali ed orizzontali sono sopportate da un insieme di travi e pilastri che costituiscono un telaio spaziale; si può parlare di struttura a telaio anche in presenza di pareti di modeste dimensioni, a condizione che la gran parte della resistenza ad azioni orizzontali (almeno il 65%) sia garantita dagli elementi a telaio;

# Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

$q_0$

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura a pareti*, nella quale le azioni verticali ed orizzontali sono sopportate principalmente da pareti ; si può parlare di struttura a pareti anche in presenza di pilastri e travi, a condizione che la gran parte della resistenza ad azioni orizzontali (almeno il 65%) sia garantita dalle pareti;



# Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

$q_0$

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura mista telaio-pareti*, nella quale le azioni verticali sono sopportate prevalentemente da un telaio spaziale, mentre quelle orizzontali sono affidate sia al telaio che a pareti in c.a.; in particolare, se almeno il 50% dell'azione orizzontale è affidata a pareti si parla di *struttura mista equivalente a pareti*, nel caso contrario di *struttura mista equivalente a telaio*;

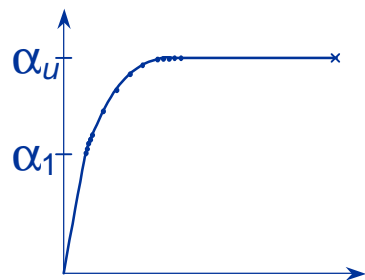
# Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

$q_0$

Tipologia	CD"B"	CD"A"
Strutture a telaio, strutture miste telaio-pareti, strutture a pareti accoppiate	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture a pareti non accoppiate	3.0	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Strutture torsionalmente deformabili	2.0	3.0
Strutture a pendolo inverso	1.5	2.0

- *struttura a pendolo inverso*, nella quale il 50%, o più, della massa è concentrato nel terzo superiore dell'altezza della struttura, o nella quale la dissipazione è localizzata alla base di un singolo elemento dell'edificio;
- *struttura torsionalmente deformabile*, nella quale la rigidezza rotazionale è nettamente inferiore rispetto a quella traslazionale.

# Rapporto tra resistenza ultima e di prima plasticizzazione



$\alpha_u / \alpha_1$

Strutture a telaio o strutture miste equivalenti a telaio	
– ad un solo piano	1.1
– a più piani ma ad una sola campata	1.2
– a più piani e più campate	1.3
Strutture a pareti o strutture miste equivalenti a pareti	
– solo due pareti non accoppiate per ogni direzione	1.0
– più pareti non accoppiate	1.1
– pareti accoppiate o strutture miste equivalenti a pareti	1.2

Nota: valori minori per strutture non regolari in pianta

Oppure effettuare analisi statica non lineare

# Regolarità dell'edificio

	$K_R$
Edifici regolari in altezza	1.0
Edifici non regolari in altezza	0.8

La regolarità in altezza deve essere valutata a priori, guardando la distribuzione delle masse e le sezioni degli elementi resistenti, ma anche controllata a posteriori

# Esempio (casi estremi)

Edificio multipiano (e più campate) con struttura a telaio, **regolare** in altezza e ad **alta duttilità**

$$q = 4.5 \times 1.3 \times 1.0 = 5.85$$

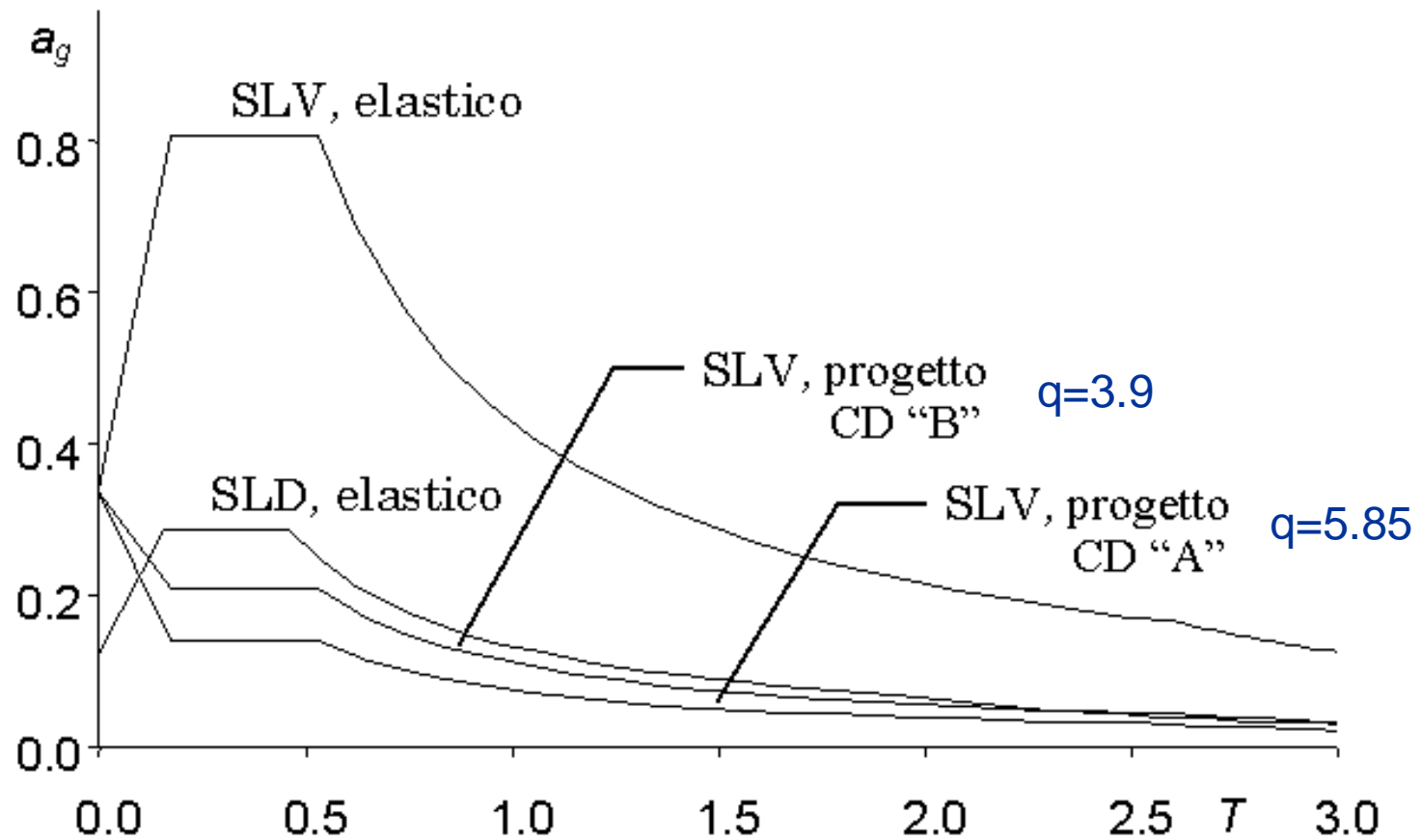
Stesso edificio, ma **non regolare** in altezza ed a **bassa duttilità**

$$q = 3.0 \times 1.3 \times 0.8 = 3.12$$

Quindi le forze sono maggiori di oltre l'80%

Attenzione: in ogni caso bisogna evitare un collasso con meccanismo di piano, perché la riduzione di duttilità globale sarebbe anche maggiore

# Confronto tra spettri



Valori riferiti a Messina, Piazza Cairolì, suolo C

# Regolarità in altezza

I sistemi resistenti verticali si estendono per tutta l'altezza dell'edificio

Massa e rigidezza non variano bruscamente da un piano all'altro

Il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza di calcolo non varia molto da un piano all'altro

Principi generali = prestazione richiesta

# Regolarità in altezza

Andando dal basso verso l'alto:

- le variazioni di massa sono, al massimo, il 25%
- la rigidezza non si riduce più del 30% e non aumenta più del 10%
- il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza di calcolo varia di  $\pm 20\%$

Regole applicative = prescrizioni (obbligatorie?)



# Regolarità in altezza

Si noti inoltre che:

- il controllo delle masse può essere effettuato *a priori*, all'inizio del calcolo
- il controllo sulla rigidezza e sulla resistenza può essere effettuato solo *a posteriori*, dopo aver effettuato il calcolo e la disposizione delle armature

# Regolarità in pianta

- configurazione compatta e approssimativamente simmetrica
- rapporto tra i lati di un rettangolo in cui è inscritta la pianta inferiore a 4
- rientri o sporgenze non superiori al 25% della dimensione della pianta nella stessa direzione
- impalcati infinitamente rigidi nel loro piano

Criteri poco significativi e quasi non utilizzati

# Azioni

Cenno a problemi  
che verranno approfonditi più avanti

# 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 x 1.5 per SLU]

Nuova norma

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

# 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

Ma sostanzialmente portano un incremento di  
sollecitazione nei telai più esterni