

# Ordinanza 3274

## Progettazione di edifici in zona sismica

Azione sismica:  
spettri di progetto

Rimini, 16-17 aprile 2004

Aurelio Ghersi

# È possibile progettare le strutture in modo che rimangano in campo elastico?

L'accelerazione massima del suolo, per terremoti con elevato periodo di ritorno, è molto forte (0.35 g in zone ad alta sismicità)

Per strutture con periodo medio-bassi si ha una notevole amplificazione dell'accelerazione, rispetto a quella del suolo (circa 2.5 volte)

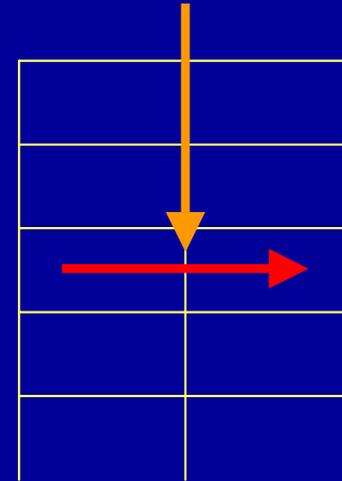
Le azioni inerziali (forze orizzontali indotte dal sisma) possono essere comparabili con le azioni verticali

È possibile progettare le strutture  
in modo che rimangano in campo elastico?

Azioni orizzontali comparabili  
con le azioni verticali

Le sollecitazioni provocate  
dalle azioni orizzontali sono  
molto forti

Non è economicamente conveniente progettare la  
struttura in modo che rimanga in campo elastico



# Possibili approcci per valutare la risposta elasto-plastica

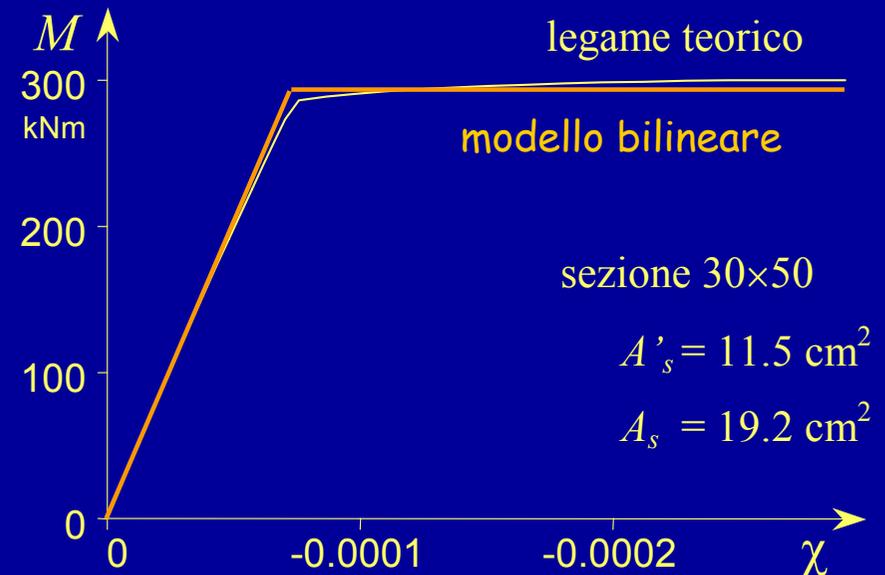
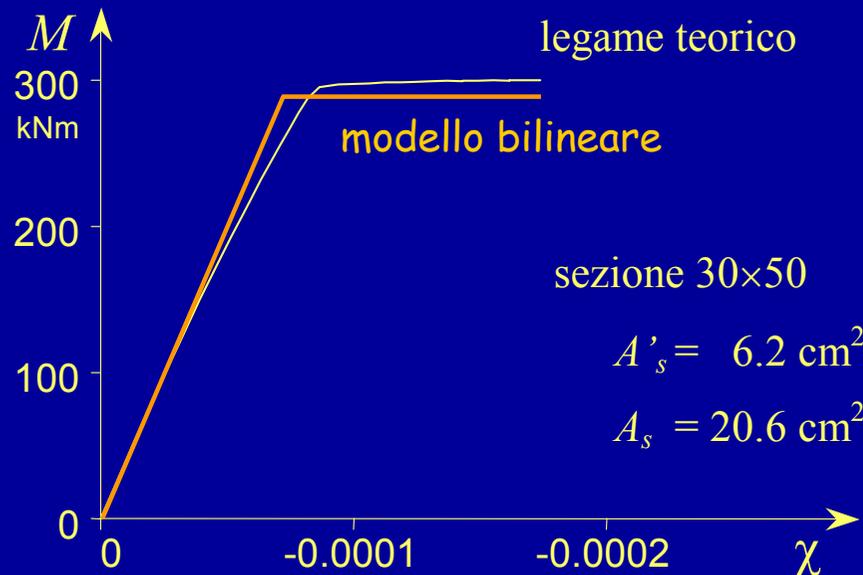
Analisi dinamica non lineare, con valutazione della storia della risposta (istante per istante)

Analisi elastica (modale o statica), con forze ridotte mediante il fattore di struttura  $q$

Analisi statica non lineare

# Comportamento oltre il limite elastico

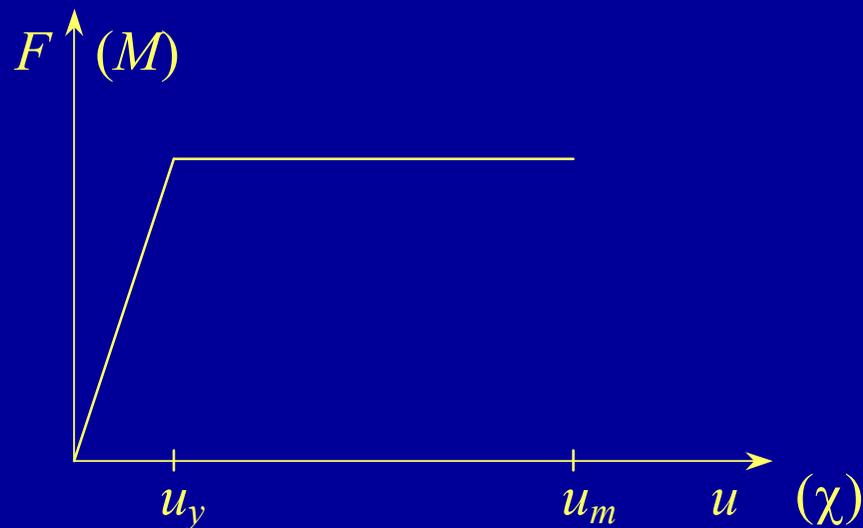
Occorre tener conto del comportamento non lineare delle singole sezioni



Il comportamento reale viene in genere rappresentato con un modello più semplice, bilineare (elastico-perfettamente plastico)

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico

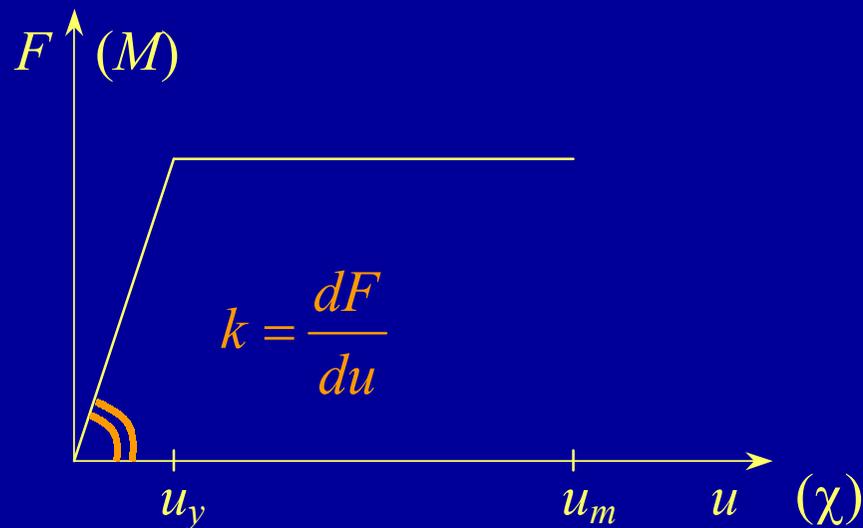


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



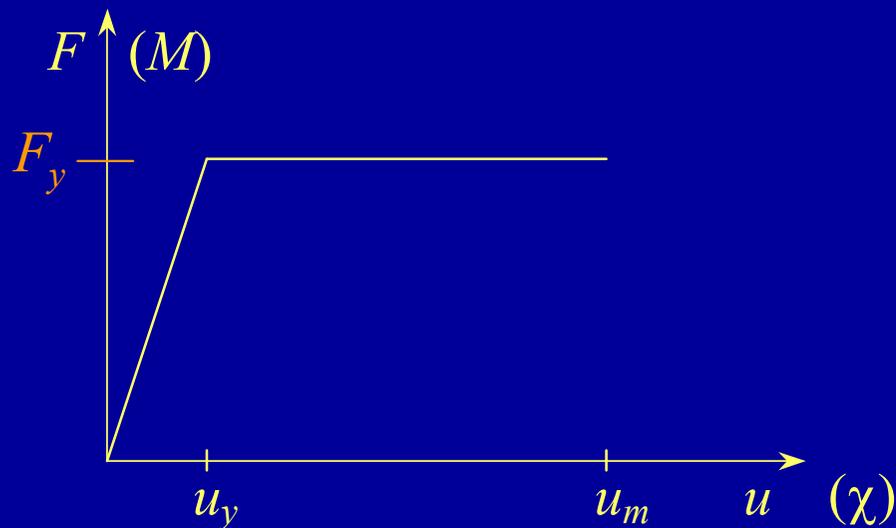
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



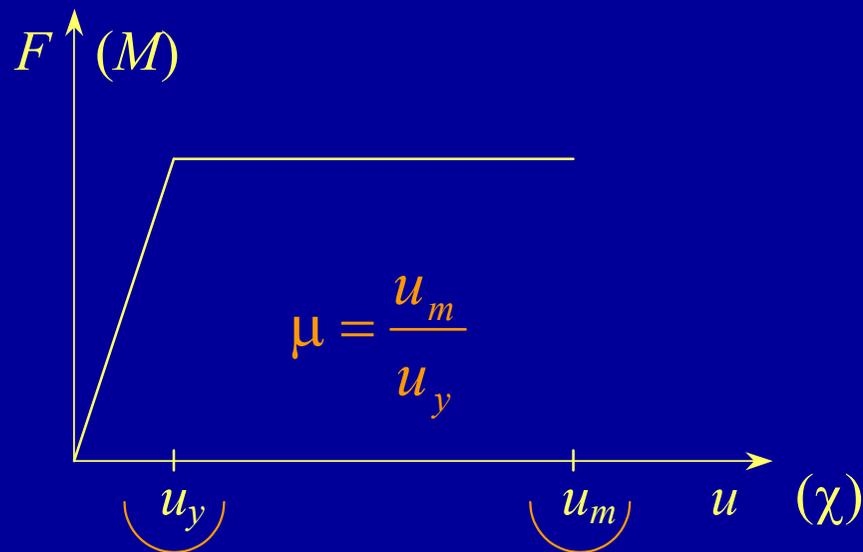
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



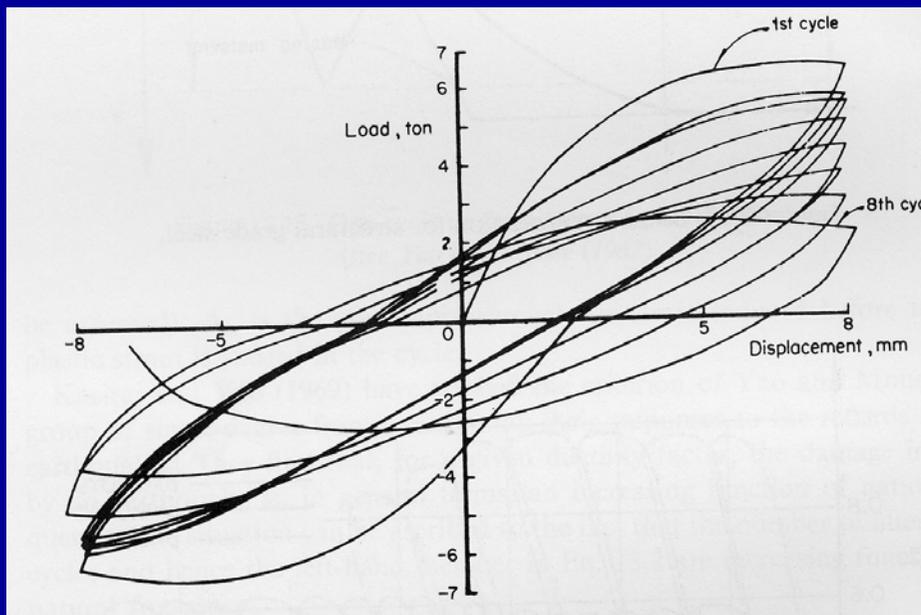
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

# Comportamento oltre il limite elastico

Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



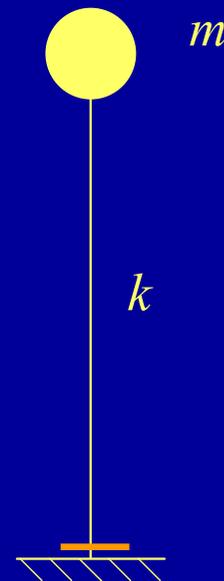
# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

L'analisi della risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico consente di valutare la richiesta di duttilità, conseguente al sisma, e confrontarla con la duttilità disponibile

# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

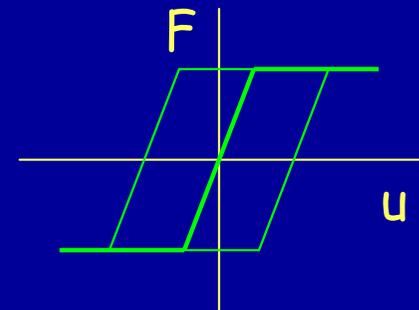


Foto

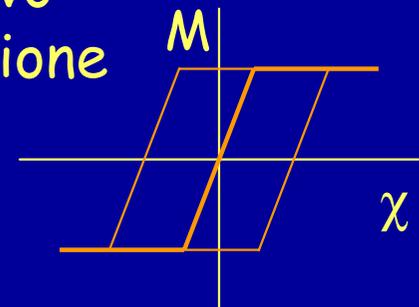


Modello  
di calcolo

Legame costitutivo  
della struttura



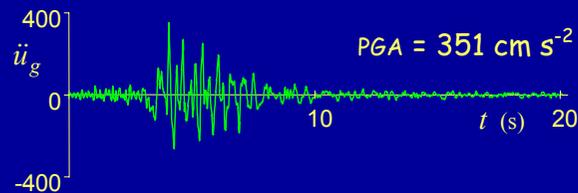
Legame  
costitutivo  
della sezione



# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

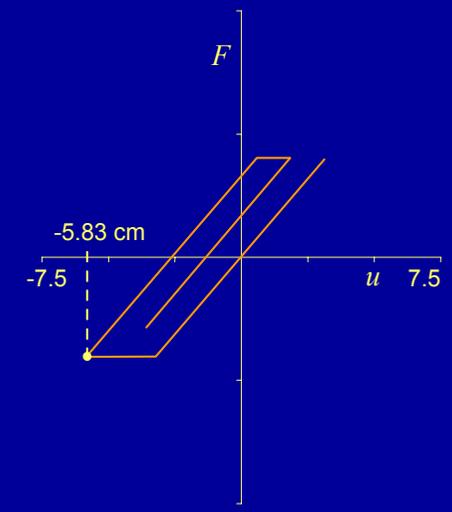
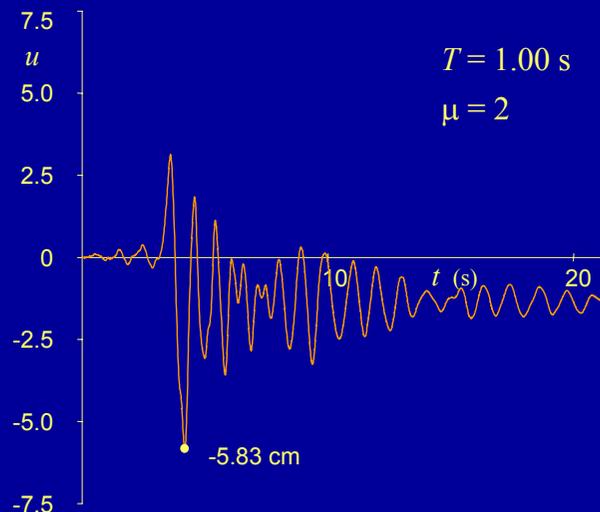
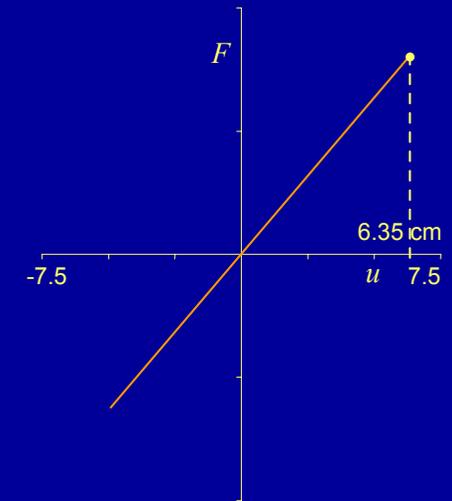
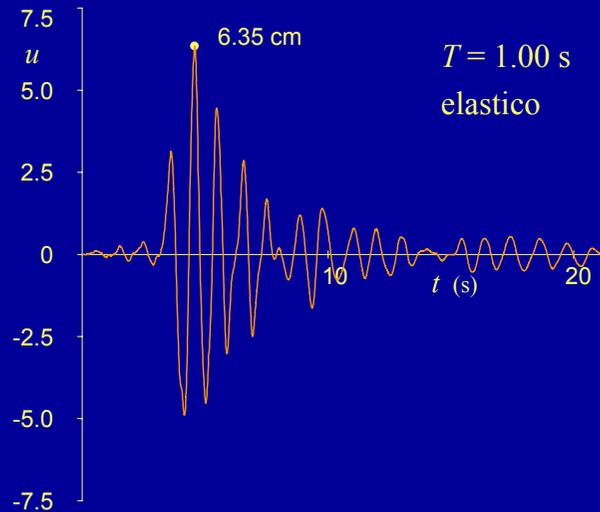
Risposta  
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta  
elasto-plastica

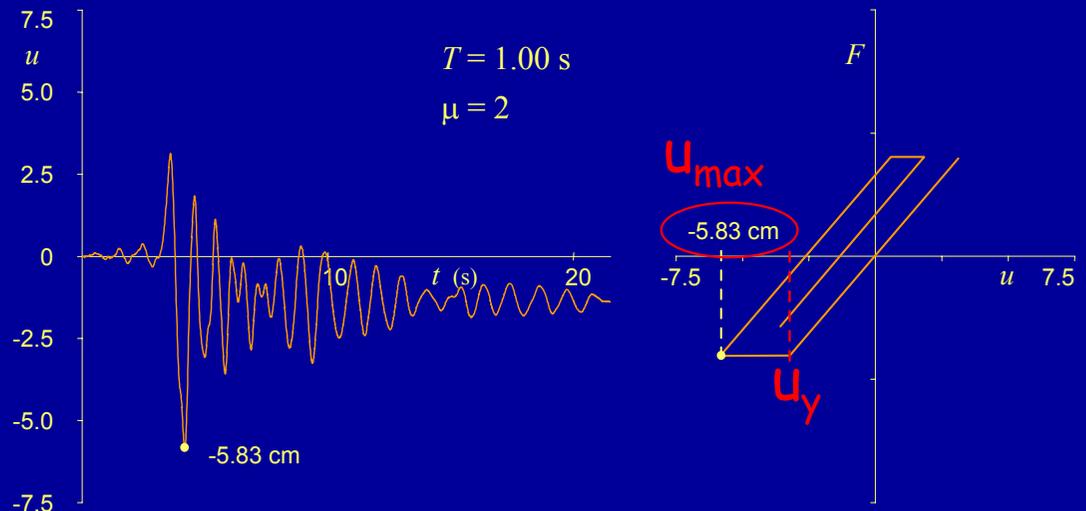


# Richiesta di duttilità

Il rapporto tra lo spostamento massimo  $u_{max}$  ottenuto come risposta al sisma e lo spostamento massimo  $u_y$  di plasticizzazione è la duttilità necessaria al sistema per non collassare (richiesta di duttilità)

In genere, abbassando la resistenza aumenta la richiesta di duttilità

Risposta elasto-plastica



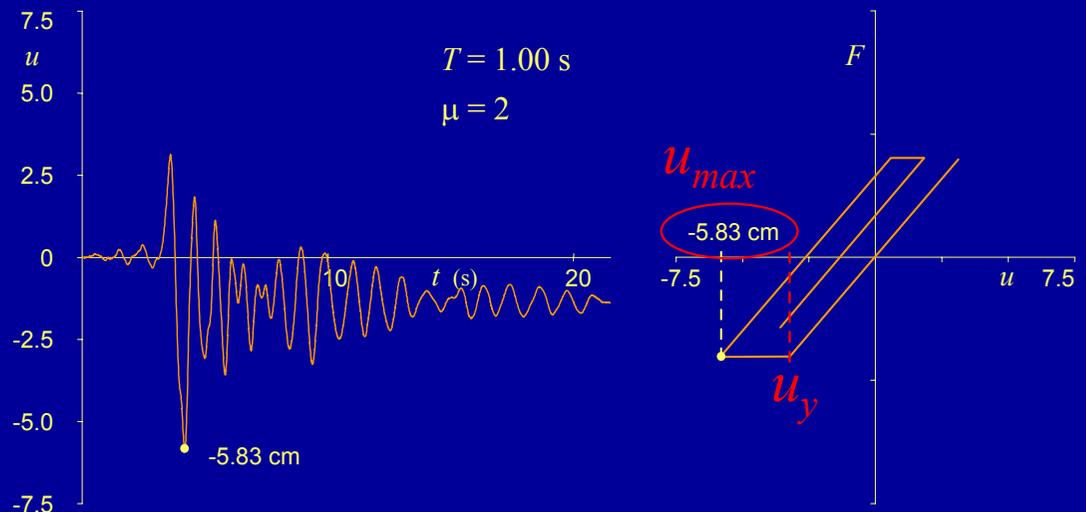
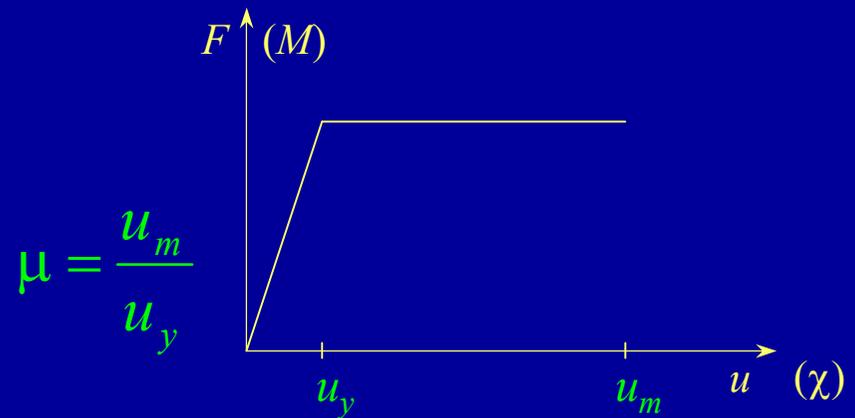
# Progettazione di strutture elasto-plastiche

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile

sia maggiore di quella richiesta

$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y}$$

Risposta  
elasto-plastica



# Progettazione di strutture elasto-plastiche

La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta

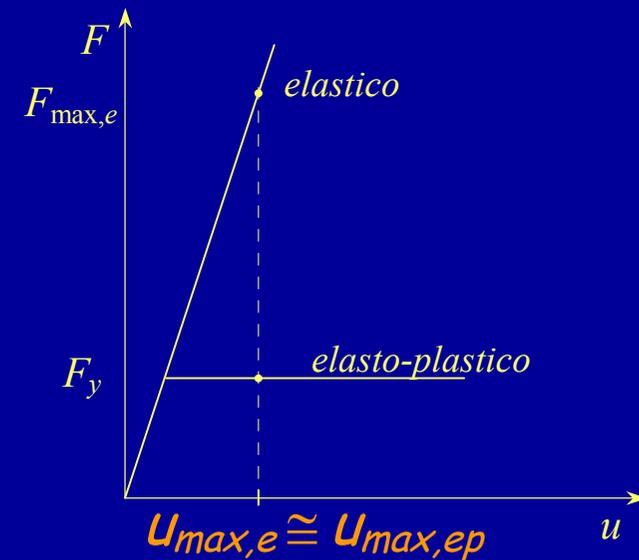
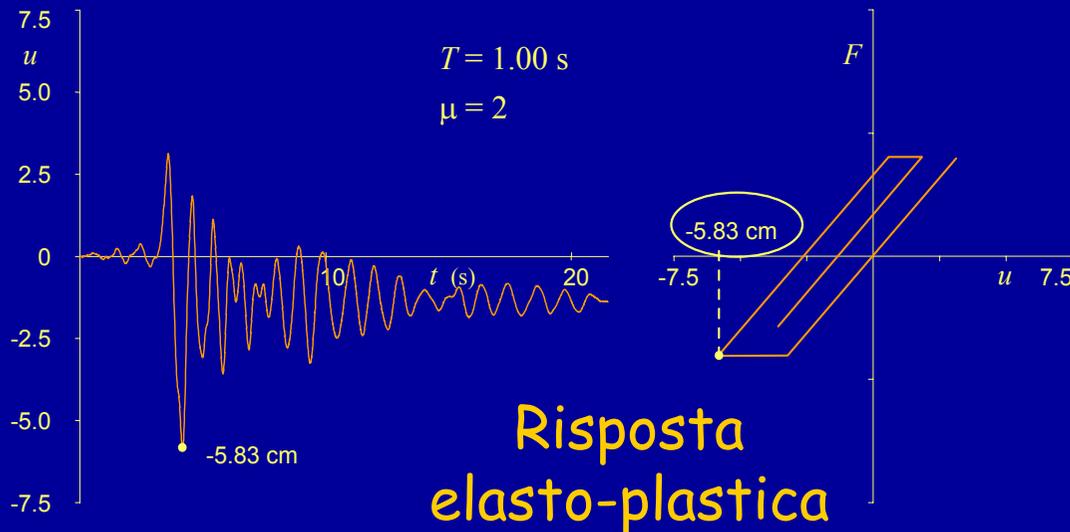
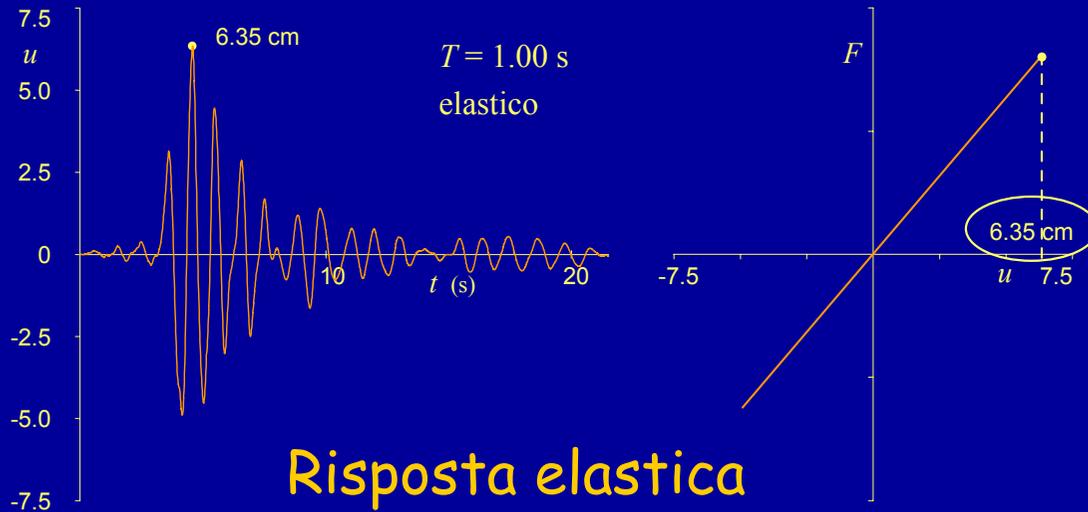


Ricordando che  $F = m a$ ,  
si può diagrammare in  
funzione del periodo  
l'accelerazione da usare  
nel progetto,  
per assegnati valori  
della duttilità  $\mu$

Spettro di risposta a duttilità assegnata

# Progettazione di strutture elasto-plastiche

Le analisi numeriche mostrano che lo spostamento di schemi elastici ed elasto-plastici è più o meno lo stesso



# Progettazione di strutture elasto-plastiche

La forza di progetto  
può essere ottenuta  
dividendo

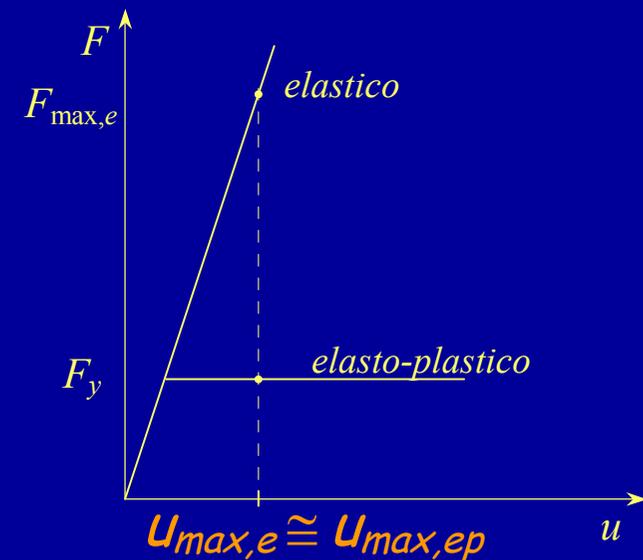
la forza necessaria  
per mantenere la  
struttura in campo  
elastico

per la duttilità

 $F_d$  $F_{max,e}$  $\mu$ 

$$F_d = F_y = \frac{F_{max,e}}{\mu}$$

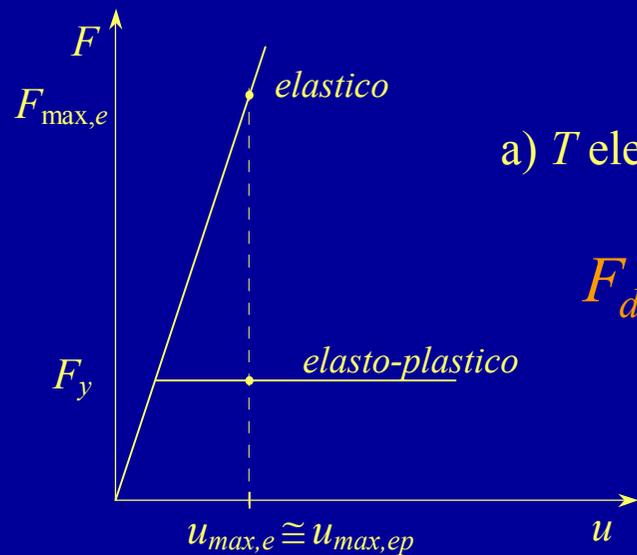
Le analisi numeriche  
mostrano che lo  
spostamento di  
schemi elastici ed  
elasto-plastici è più  
o meno lo stesso



# Progettazione di strutture elasto-plastiche

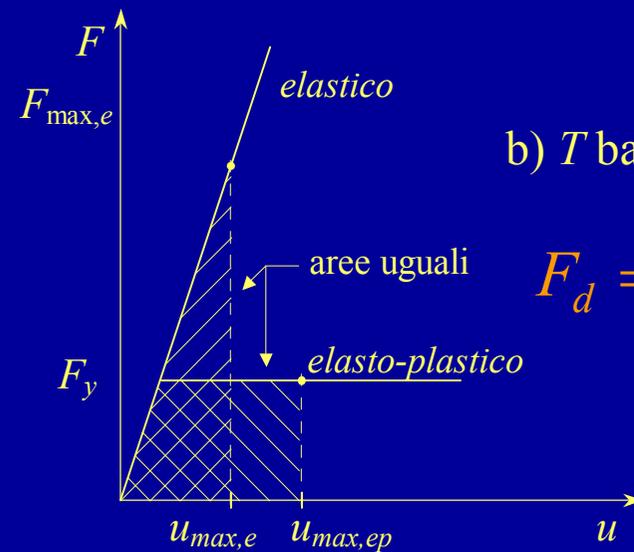
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo per strutture con periodo medio-alto

Per strutture con periodo basso si può pensare ad una uguaglianza in termini energetici



a)  $T$  elevato

$$F_d = \frac{F_{max,e}}{\mu}$$

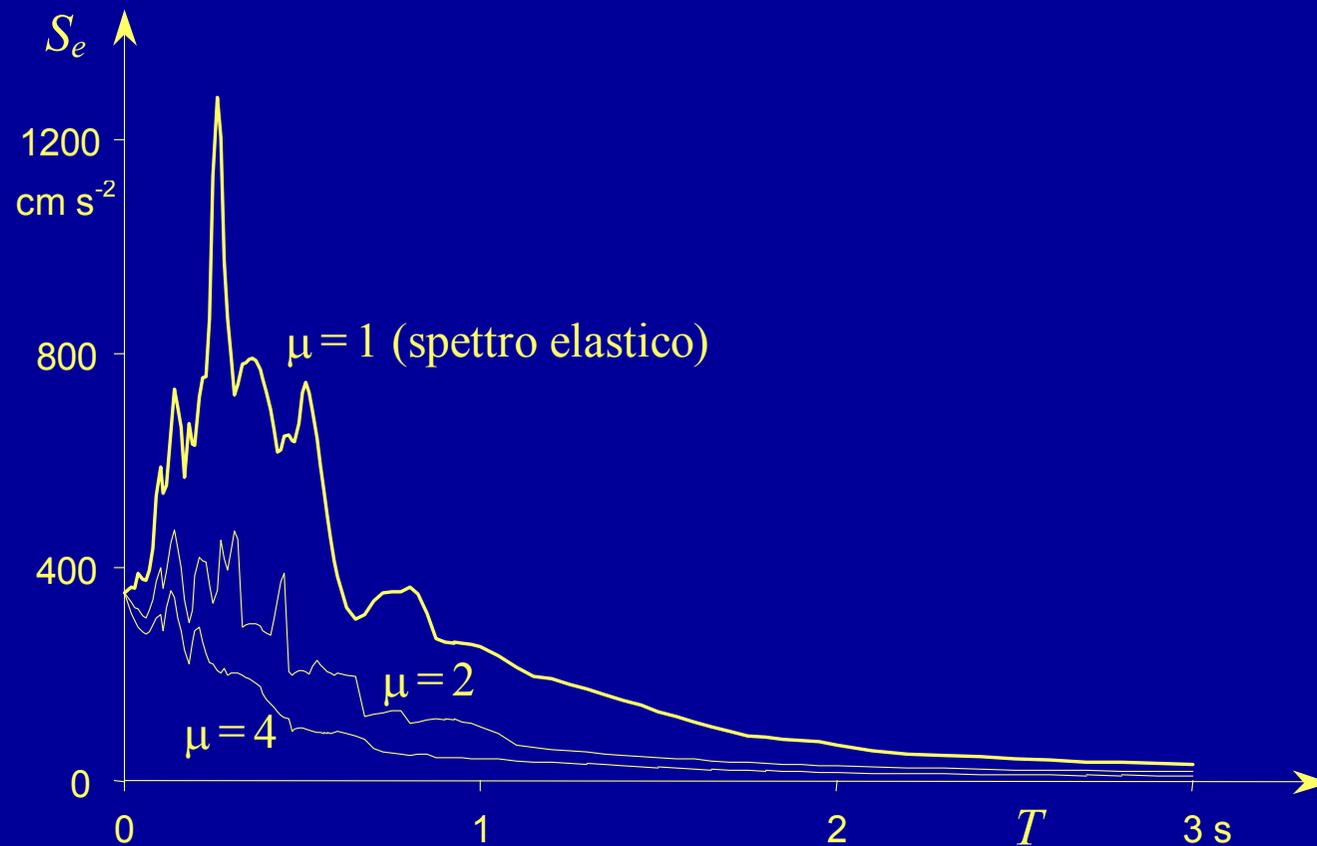


b)  $T$  basso

$$F_d = \frac{F_{max,e}}{\sqrt{2\mu - 1}}$$

# Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



# Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



si passa a spettri di progetto,  
forniti dalla normativa

# Spettri di progetto di normativa

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

$q$  = fattore di struttura

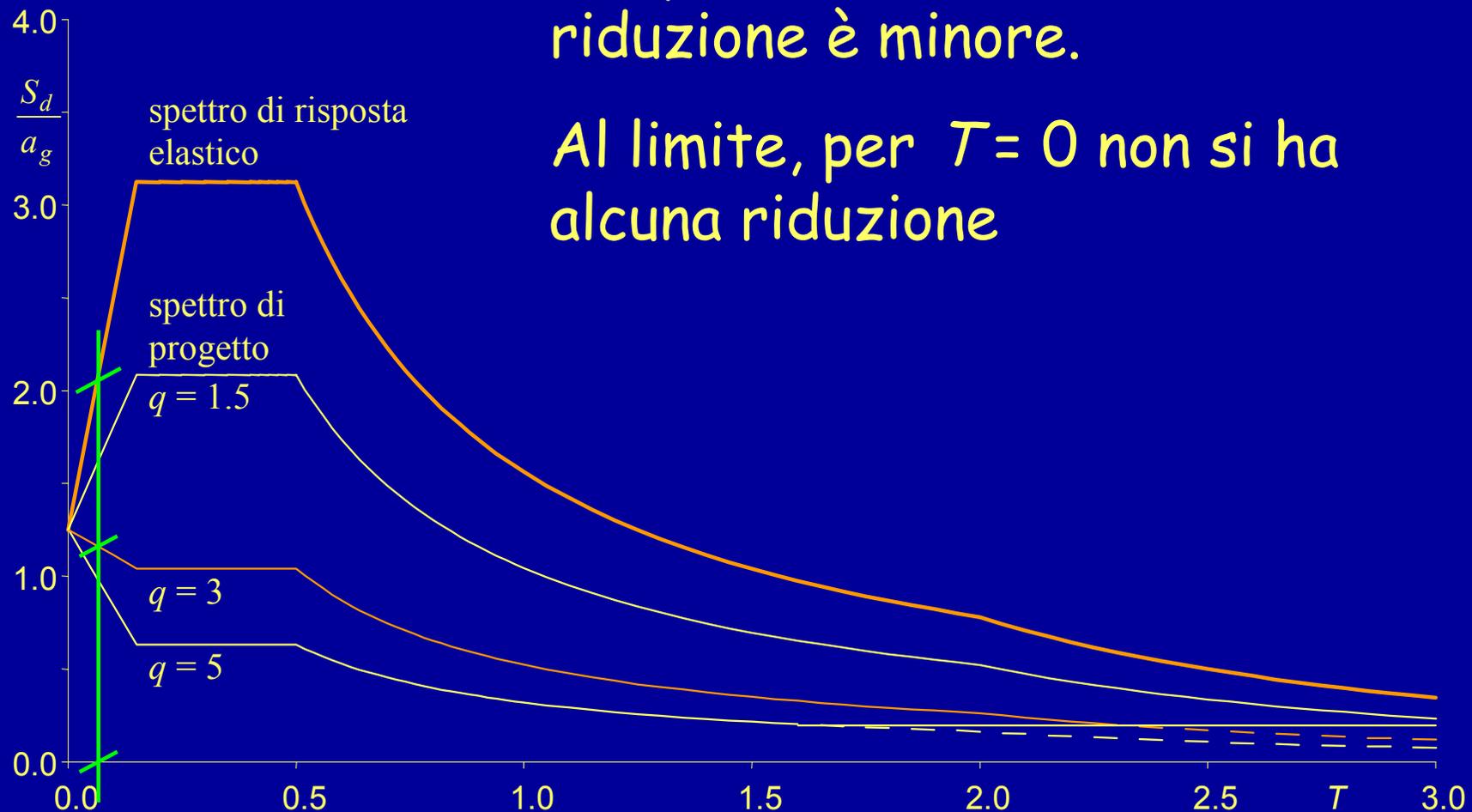
tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale



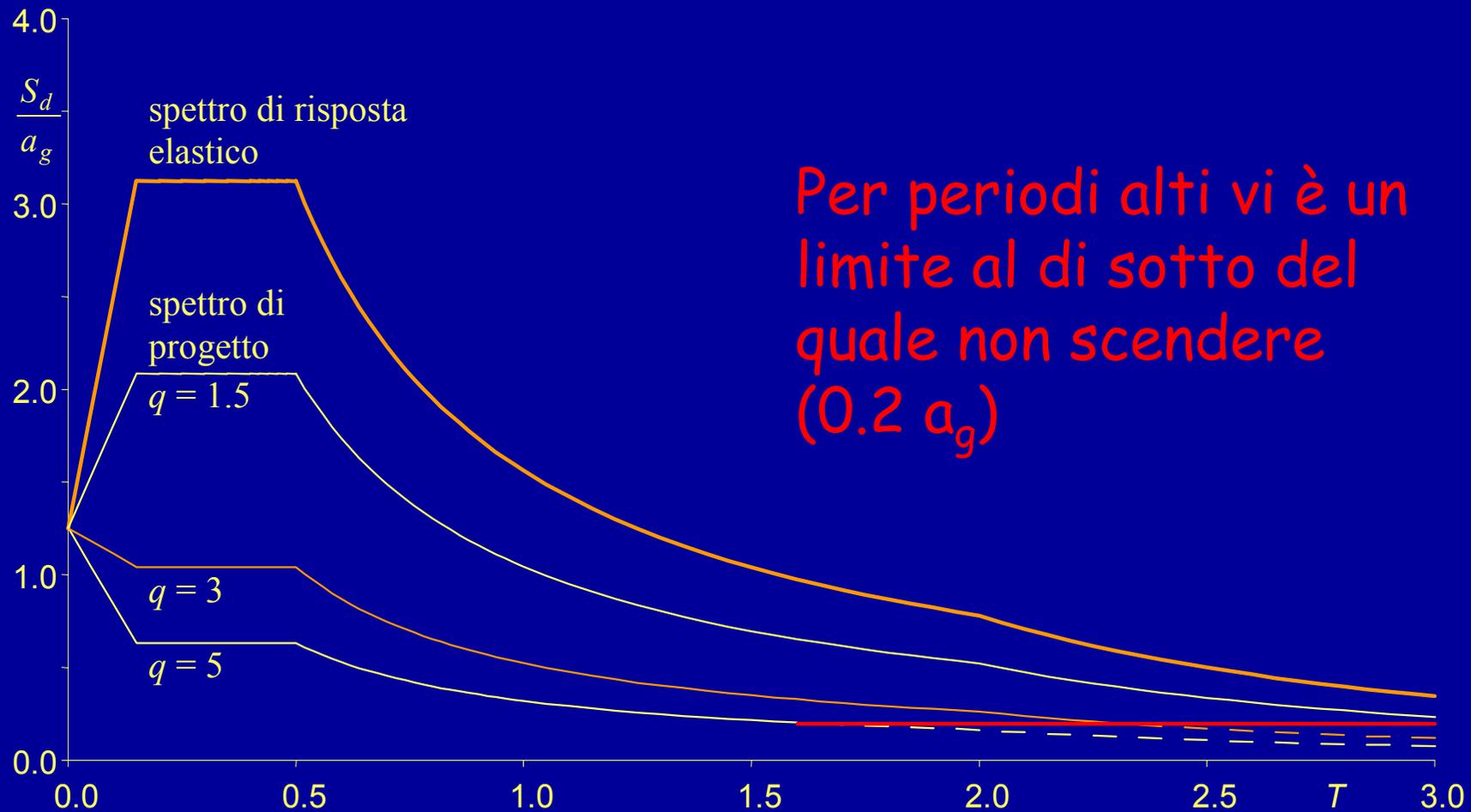
# Spettri di progetto di normativa

Per periodi molto bassi la riduzione è minore.

Al limite, per  $T=0$  non si ha alcuna riduzione

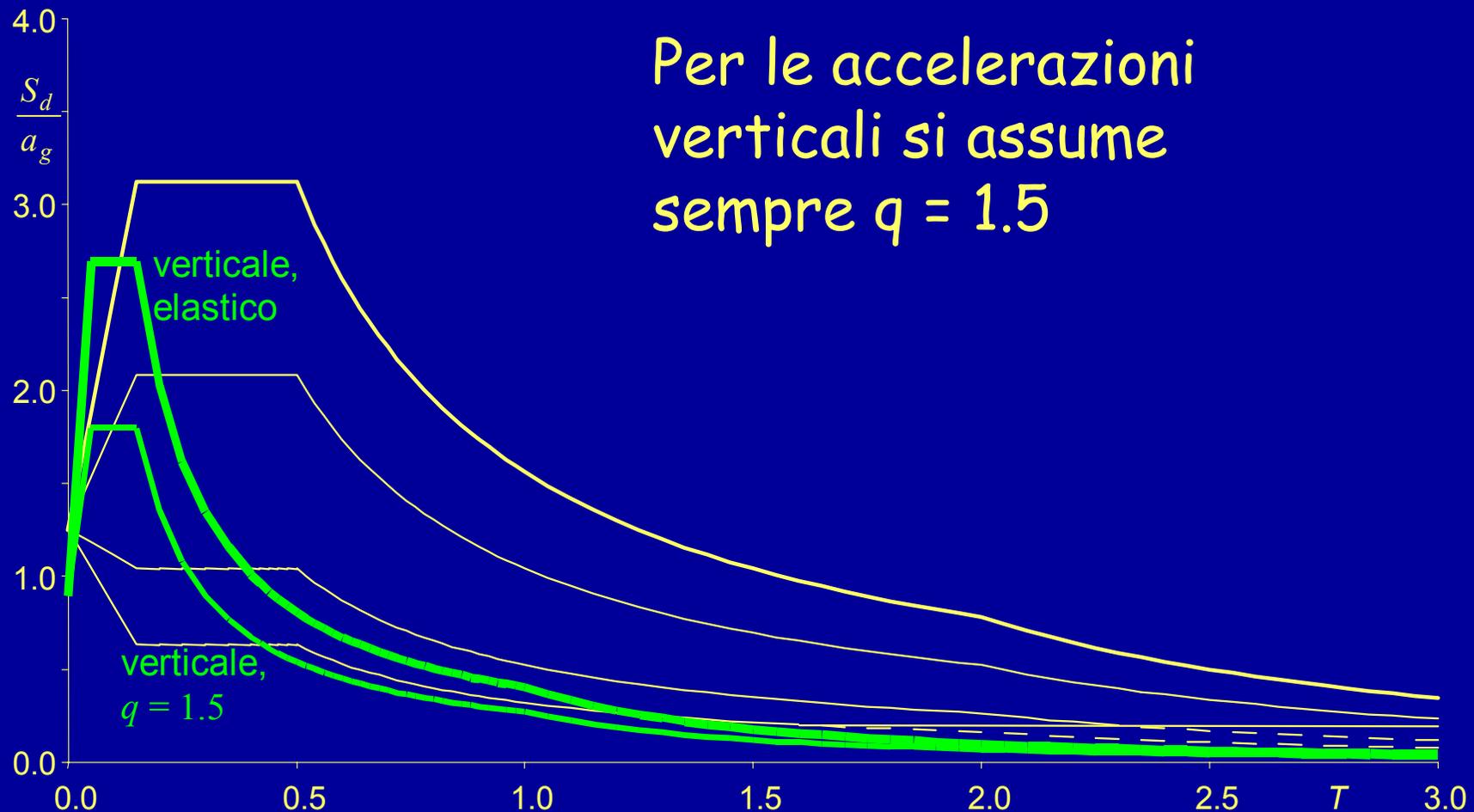


# Spettri di progetto di normativa



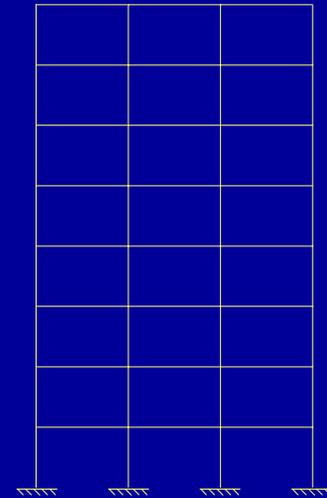
Per periodi alti vi è un limite al di sotto del quale non scendere ( $0.2 a_g$ )

# Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali e verticali



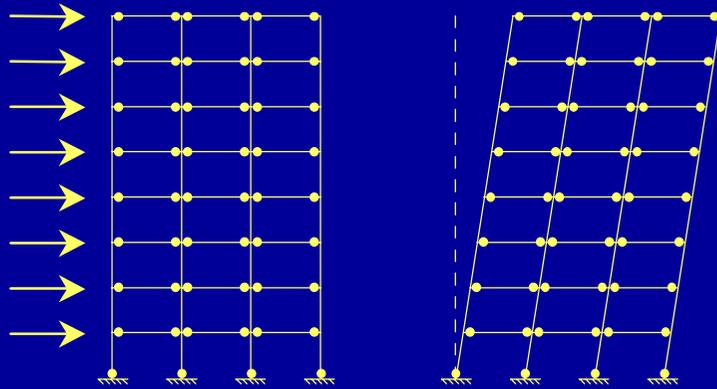
# Dalla sezione alla struttura

Per schemi a più gradi di libertà



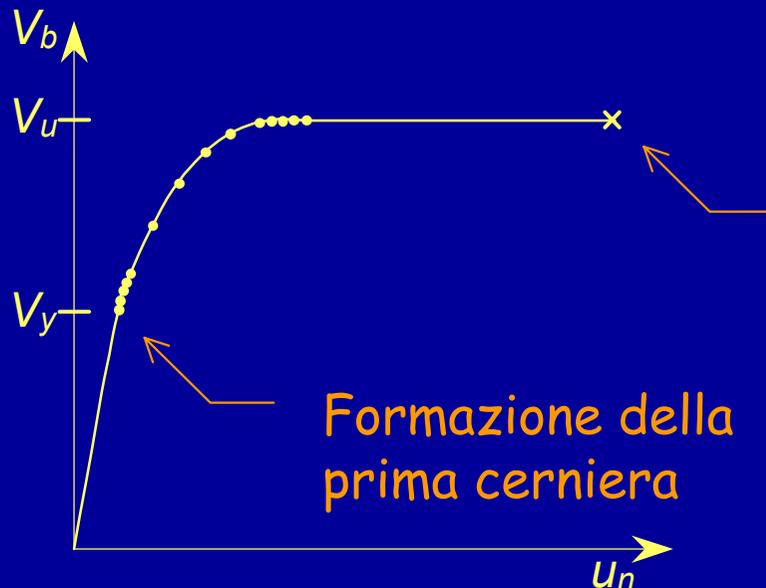
il passaggio tra comportamento della sezione e comportamento globale è molto più complesso

# Meccanismi di collasso per schemi multipiano



Notare:

Buon incremento della forza da prima plasticizzazione a collasso

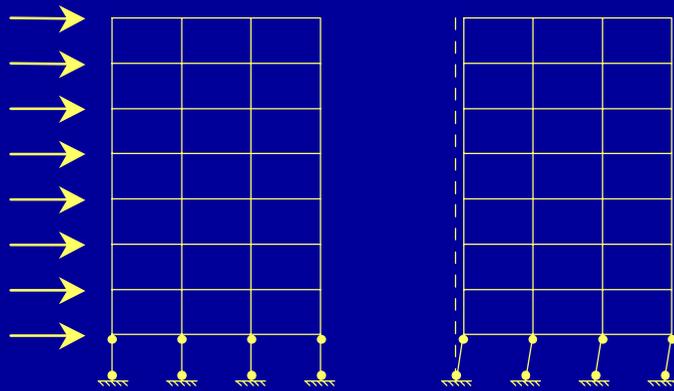


Collasso (rottura di una sezione)

Forti spostamenti a collasso = elevata duttilità globale

Modalità di collasso: globale

# Meccanismi di collasso per schemi multipiano



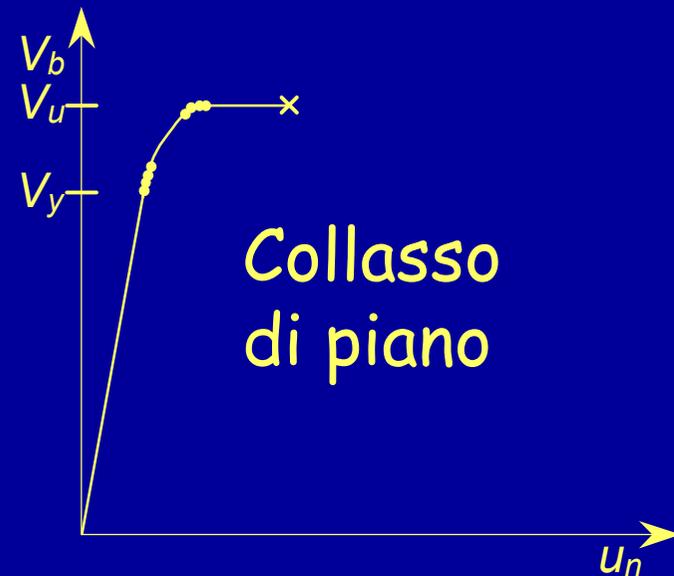
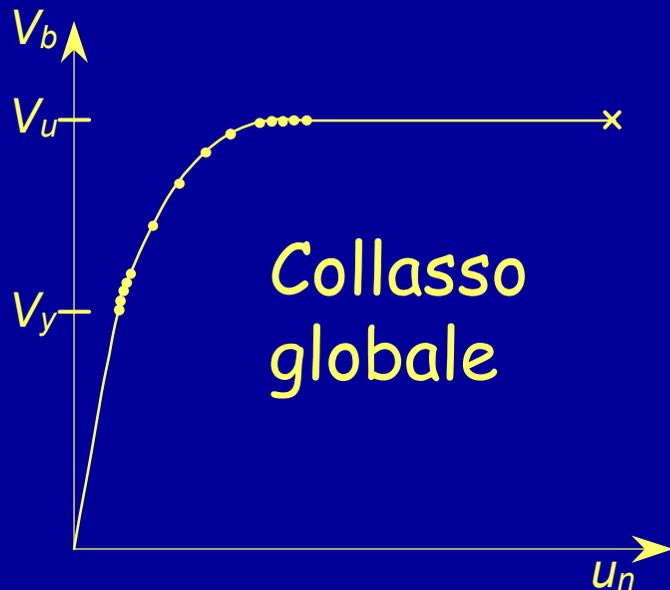
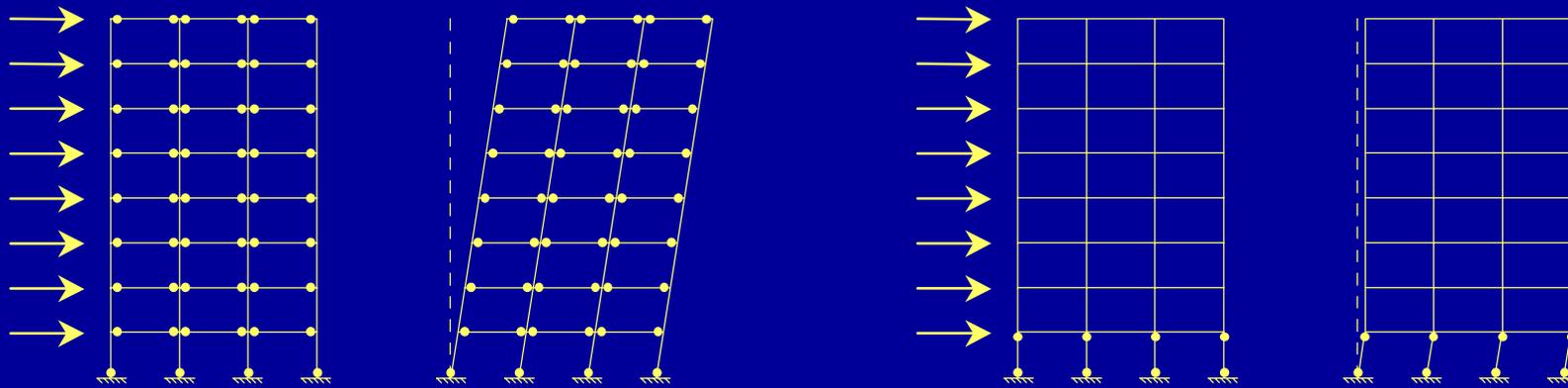
Notare:

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

# Fattore di struttura

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

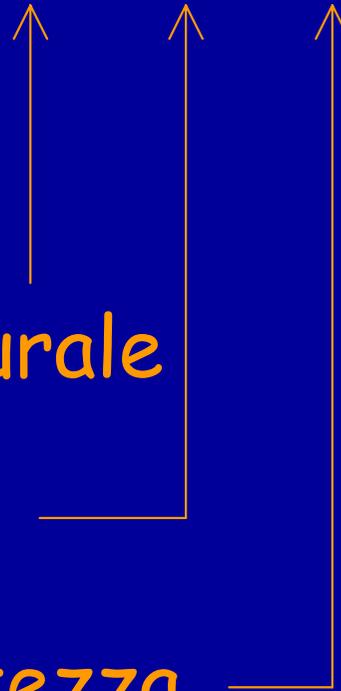
Il fattore di struttura tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale della struttura

# Fattore di struttura

$$q = q_0 K_D K_R$$

Dipende da:

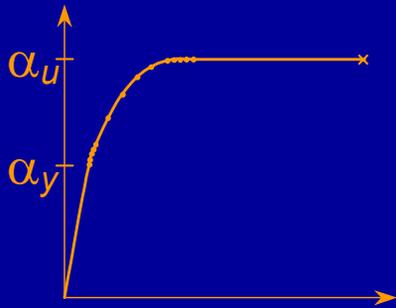
- Tipologia strutturale
- Duttilità locale
- Regolarità in altezza



# Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)

	$q_0$
Struttura a telaio	4.5 $\alpha_u / \alpha_1$
Struttura a pareti	4.0 $\alpha_u / \alpha_1$
Struttura mista telai-pareti	4.0 $\alpha_u / \alpha_1$
Struttura a nucleo	3.0

# Tipologia strutturale (edifici in cemento armato)



	$\alpha_u / \alpha_1$
Telaio a 1 piano	1.1
Telaio a più piani, una campata	1.2
Telaio a più piani, più campate	1.3
Pareti non accoppiate	1.1
Pareti accoppiate	1.2

Oppure effettuare analisi statica non lineare

# Duttività locale

$K_D$

Classe di duttilità A

1.0

Richiede accorgimenti  
particolari nel calcolo ed impone  
dettagli costruttivi più severi

Classe di duttilità B

0.7

Forze di calcolo maggiori

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

# Duttilità locale - Considerazioni

Per strutture in cemento armato:

“Strutture aventi i telai resistenti all'azione sismica composti con travi a spessore, anche in una sola delle direzioni principali, devono essere progettate per la classe di duttilità B”  
[punto 5.3.2]

E se c'è solo un telaio con travi a spessore?

Riflessione: in un telaio con tante travi emergenti, si può ritenere che il telaio con travi a spessore sia “resistente all'azione sismica”?

## Regolarità in altezza (edifici in cemento armato)

	$K_R$
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**

## Commento

Se la struttura è progettata in modo da essere regolare in altezza e ad alta duttilità (rispettando il criterio di gerarchia delle resistenze)

$$K_R \times K_D = 1.00$$

Se la struttura non è regolare in altezza ed è a bassa duttilità

$$K_R \times K_D = 0.8 \times 0.7 = 0.56$$

Quindi le forze sono maggiori di quasi l'80%

Attenzione: se il collasso è con meccanismo di piano la riduzione di duttilità globale può essere anche maggiore

# Possibili approcci per valutare la risposta elasto-plastica

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

Analisi elastica (modale o statica), con forze ridotte mediante il fattore di struttura  $q$

Analisi statica non lineare

# 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 con specifici accelerogrammi (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

# Analisi elastica (modale o statica)

È l'approccio tradizionale:

- Si calcolano le forze (modali o statiche) usando uno spettro ridotto mediante il fattore  $q$
- Si controlla che le sollecitazioni conseguenti siano accettabili

Force based design

Progettazione basata sulle forze

# Analisi elastica (modale o statica)

È utilizzata comunemente, per la semplicità d'uso.

Ma:

- Quanto è affidabile il valore del fattore di struttura  $q$  utilizzato?

La vecchia norma italiana dava forze ridotte, ma senza alcuna indicazione

La nuova norma fornisce indicazione più dettagliate su come calcolare  $q$  e prescrizioni che dovrebbero garantire la duttilità necessaria

Sono sufficienti?

# Analisi statica non lineare

È un approccio proposto abbastanza di recente:

- Si calcolano gli spostamenti massimi della struttura soggetta a forze crescenti (analisi non lineare o analisi pushover)
- Si valutano gli spostamenti che la struttura subirà durante il sisma e si controlla se sono inferiori a quelli di collasso

Displacement based design

Progettazione basata sugli spostamenti

# Applicazione dell'analisi statica non lineare

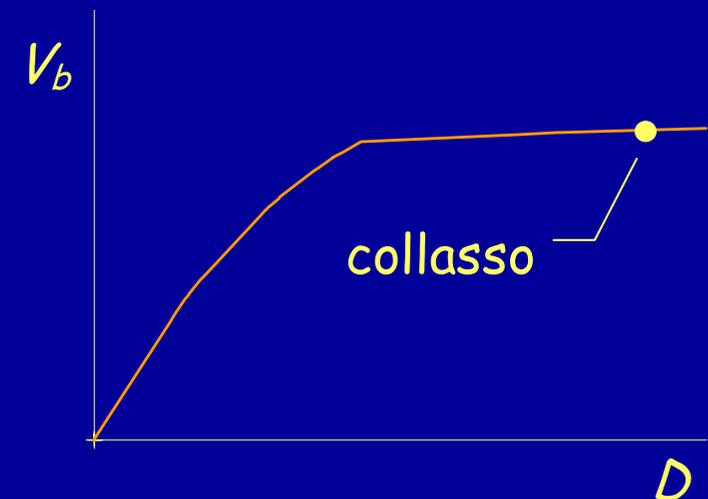
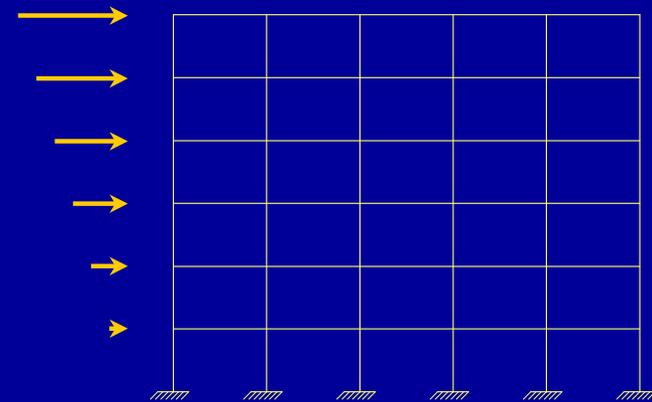
## 1 - Valutazione degli spostamenti di collasso

Si sceglie una opportuna distribuzione di forze

$$F_i = m_i \Phi_i$$

Si fanno crescere le forze fino al collasso

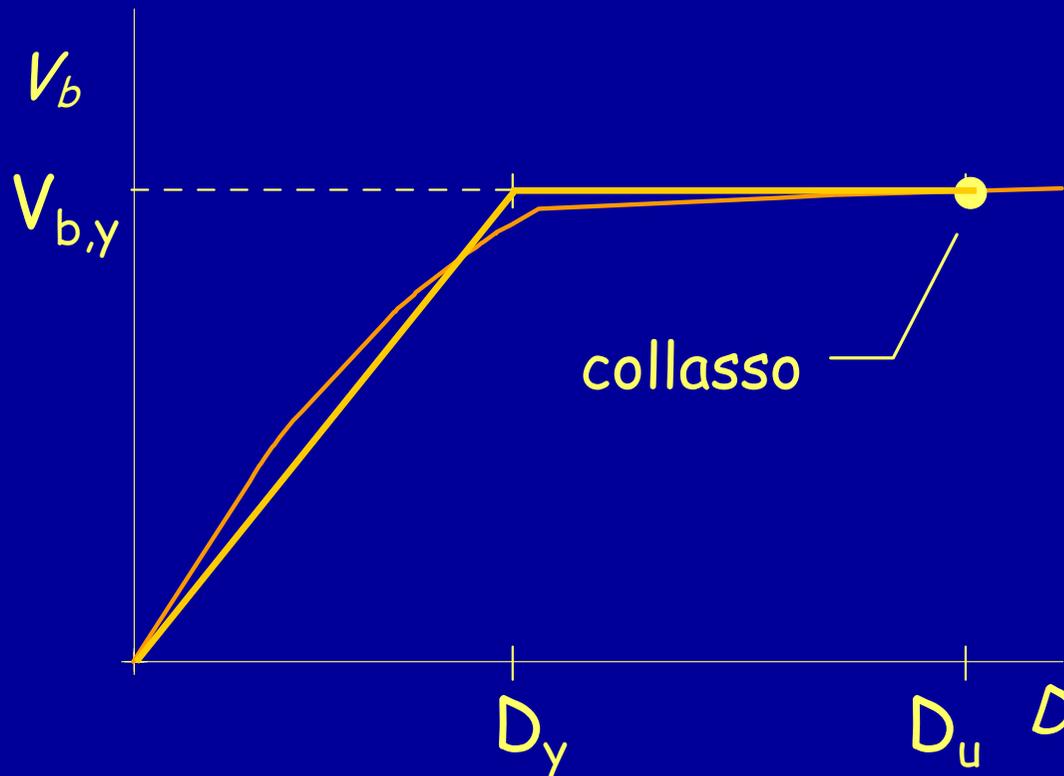
Nel diagramma:  
ascisse = spostamento in testa  $D$   
ordinate = taglio alla base  $V_b$



# Applicazione dell'analisi statica non lineare

## 2 - Idealizzazione della curva $V_b-D$

Si sostituisce la curva reale con una bilatera equivalente

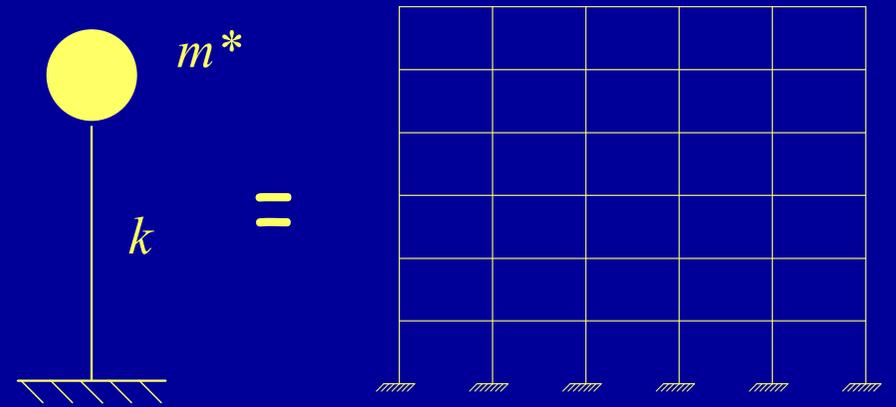


L'area sottesa dalla bilatera deve essere uguale all'area sottesa dalla curva

# Applicazione dell'analisi statica non lineare

## 3 - Oscillatore semplice equivalente

Si individua l'oscillatore semplice equivalente alla struttura reale



rigidezza  $k = \frac{V_{b,y}}{D_y}$

massa  $m^* = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Phi_i}{\Phi_n}$

periodo  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k}}$

# Applicazione dell'analisi statica non lineare

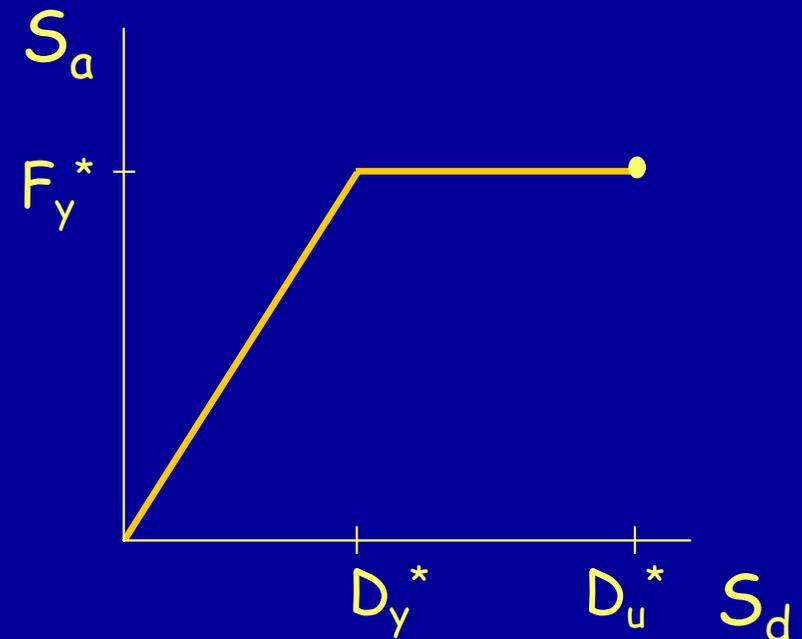
## 3 - Oscillatore semplice equivalente

Si scala il diagramma forze - spostamenti in modo da renderlo comparabile con un diagramma spettro accelerazioni - spettro spostamenti

$$F^* = \frac{V_b}{m^* \Phi_n \Gamma} \quad D^* = \frac{D}{D_n \Gamma}$$

con

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Phi_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Phi_i^2}$$



# Applicazione dell'analisi statica non lineare

## 4 - Confronto con spostamento richiesto

Si valuta lo spostamento massimo provocato dal sisma

Lo spostamento (per oscillatore elastico) è legato all'accelerazione dalla relazione

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$$

Se il periodo è sufficientemente alto si può ritenere che lo spostamento dell'oscillatore elasto-plastico coincida con quello dell'oscillatore elastico

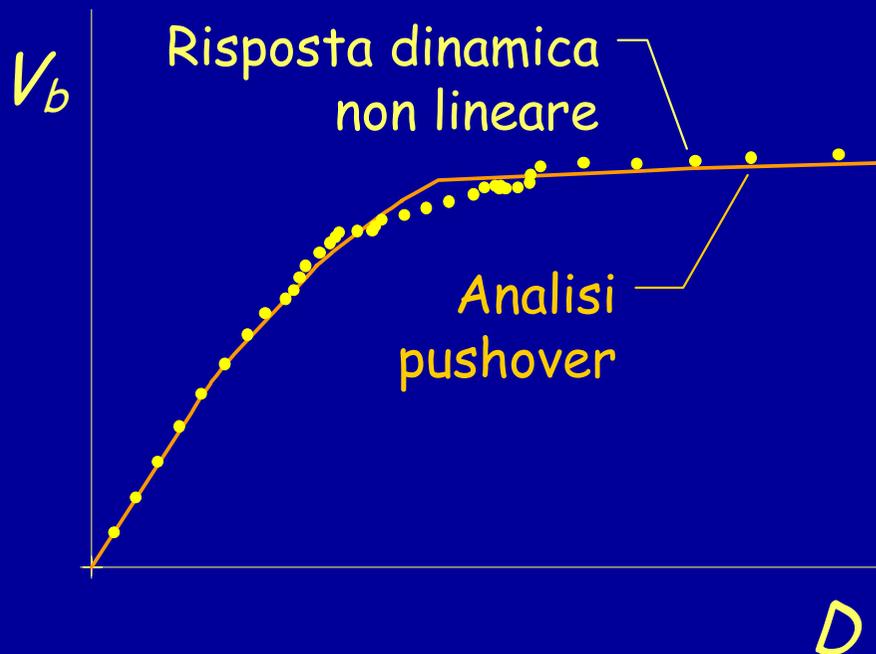
In caso contrario, esistono formule che li mettono in relazione

Si confronta lo spostamento da sisma con quello di collasso

# Analisi statica non lineare

L'idea è ottima, perché supera le incertezze legate alla valutazione di  $q$ . Ma:

- Gli spostamenti di collasso valutati con forze statiche coincidono con quelli dinamici?



Nell'esempio qui a fianco sì, ma non è sempre vero

# Analisi statica non lineare

L'idea è ottima, perché supera le incertezze legate alla valutazione di  $q$ . Ma:

- Gli spostamenti di collasso valutati con forze statiche coincidono con quelli dinamici?
- Quanto è affidabile la previsione degli spostamenti che la struttura subirà durante un terremoto?

Inoltre, essa può essere usata solo per verifica (richiede una preliminare definizione delle resistenze)

# FINE

Diapositive tratte dalle presentazioni  
"Azioni - 5" e "Azioni - 7", preparate  
per Teramo e Catania

Immagini tratte dal libro (in preparazione):  
A. Gherzi, P. Lenza  
Edifici antisismici in c.a.

Per questa presentazione:

coordinamento

A. Gherzi

realizzazione

A. Gherzi

ultimo aggiornamento

16/04/2004