

# Dalla dinamica alla normativa sismica

Sistemi a un grado di libertà:  
studio del comportamento non-lineare

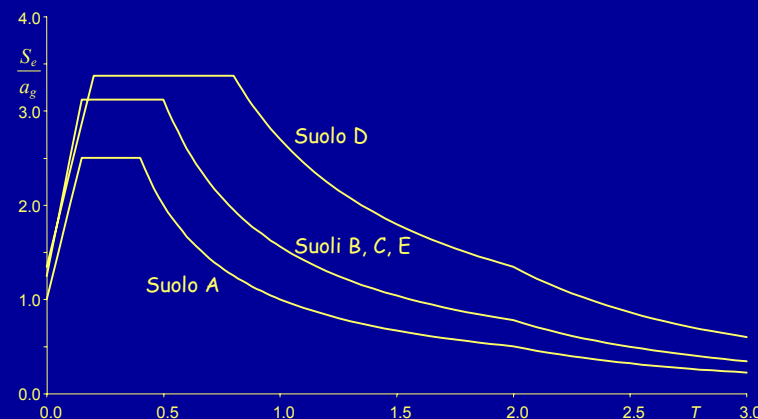
Caltagirone, 6 aprile 2004

Bruno Biondi

# 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 ( $a_g = 0.35 g$  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)



$$S_e \cong 0.88 g$$

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 ( $a_g = 0.35 g$  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)

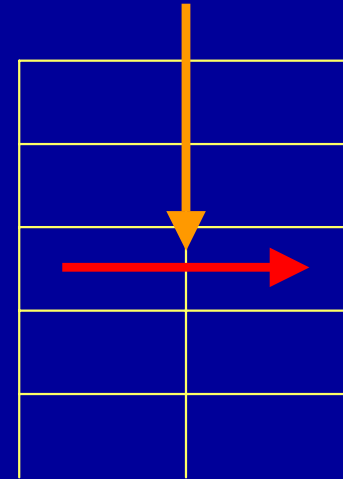
Le azioni inerziali (forze orizzontali indotte dal sisma) possono essere comparabili con le azioni verticali

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

Azioni orizzontali comparabili  
con le azioni verticali

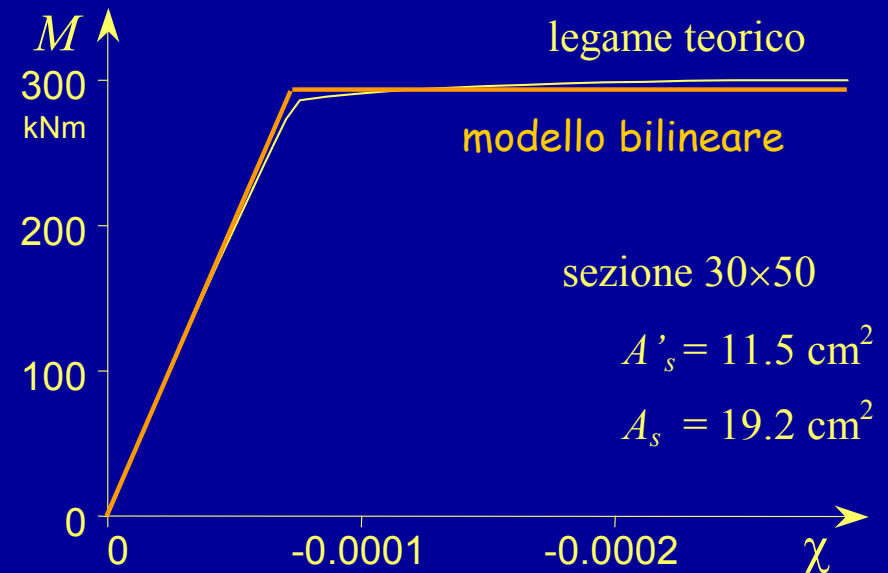
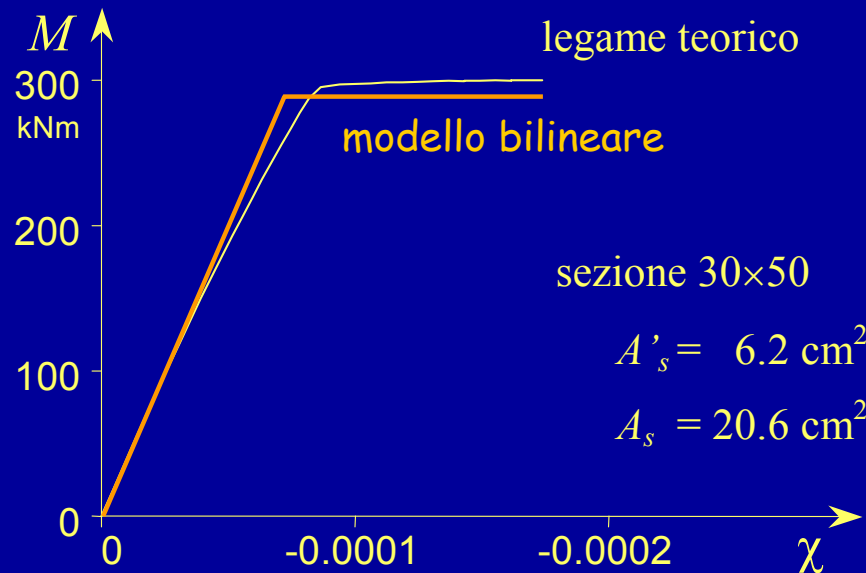
Le sollecitazioni provocate  
dalle azioni orizzontali sono  
molto forti

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



# Comportamento oltre il limite elastico

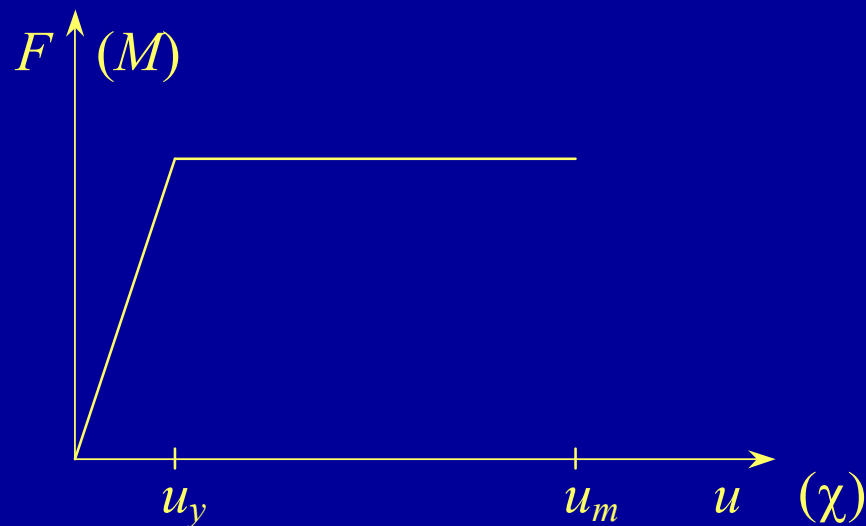
Occorre tener conto del comportamento non lineare delle singole sezioni



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

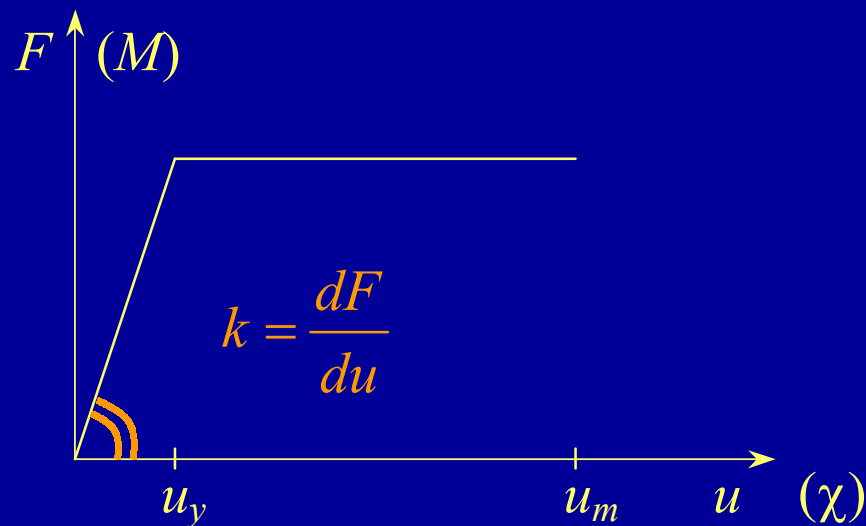


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



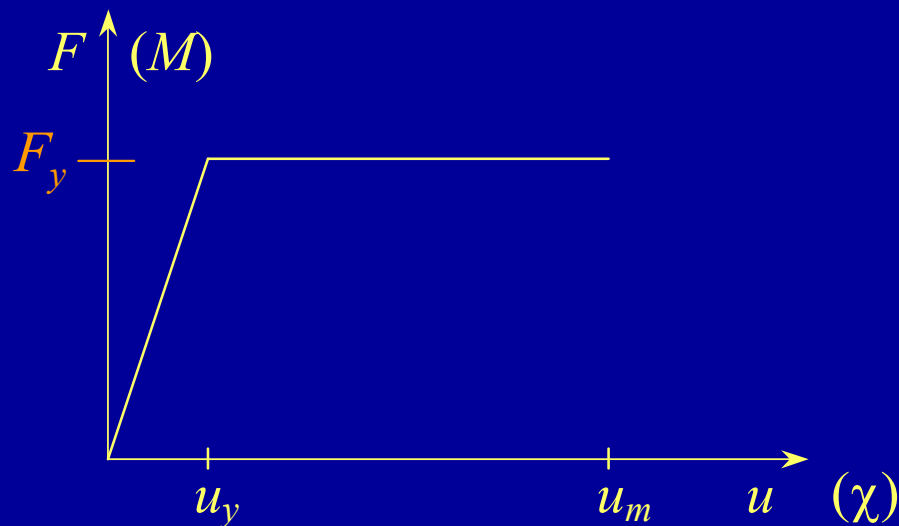
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

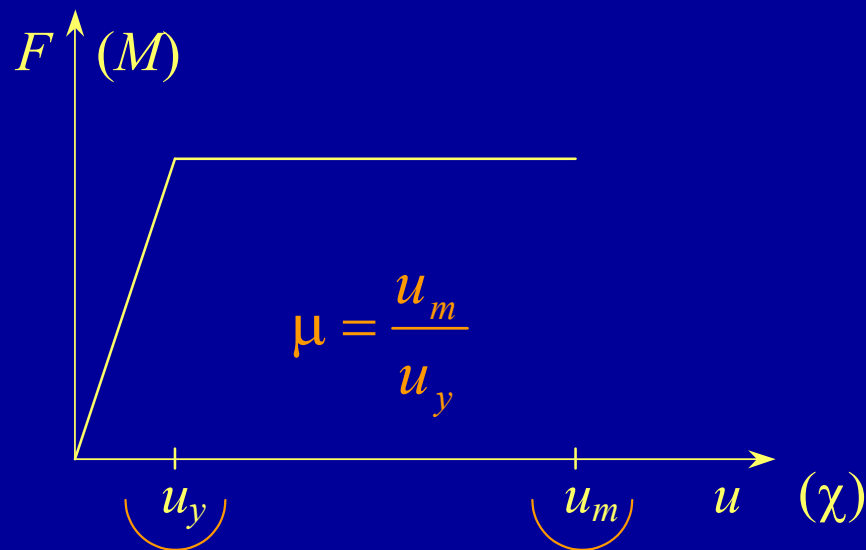
- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione



# Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



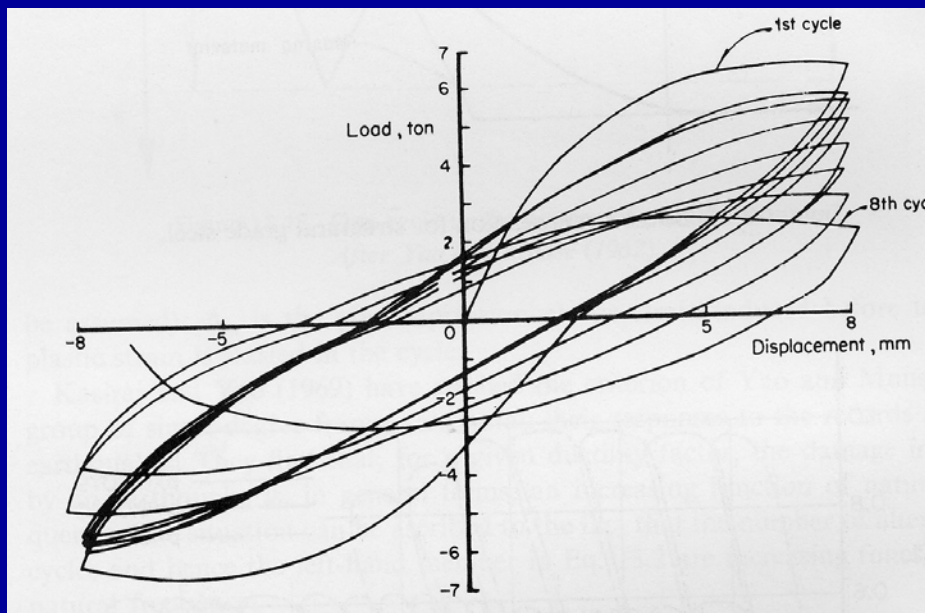
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente  
senza sostanziali riduzioni della resistenza

# Comportamento oltre il limite elastico

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



# Definizione di duttilità

## - Duttilità ciclica

$$\mu^{(ciclica)} = \frac{\bar{u}_{\max}}{u_y} \quad \bar{u}_{\max} = \text{massimo spostamento nei diversi cicli}$$

## - Duttilità cumulata (fatica per basso n° di cicli)

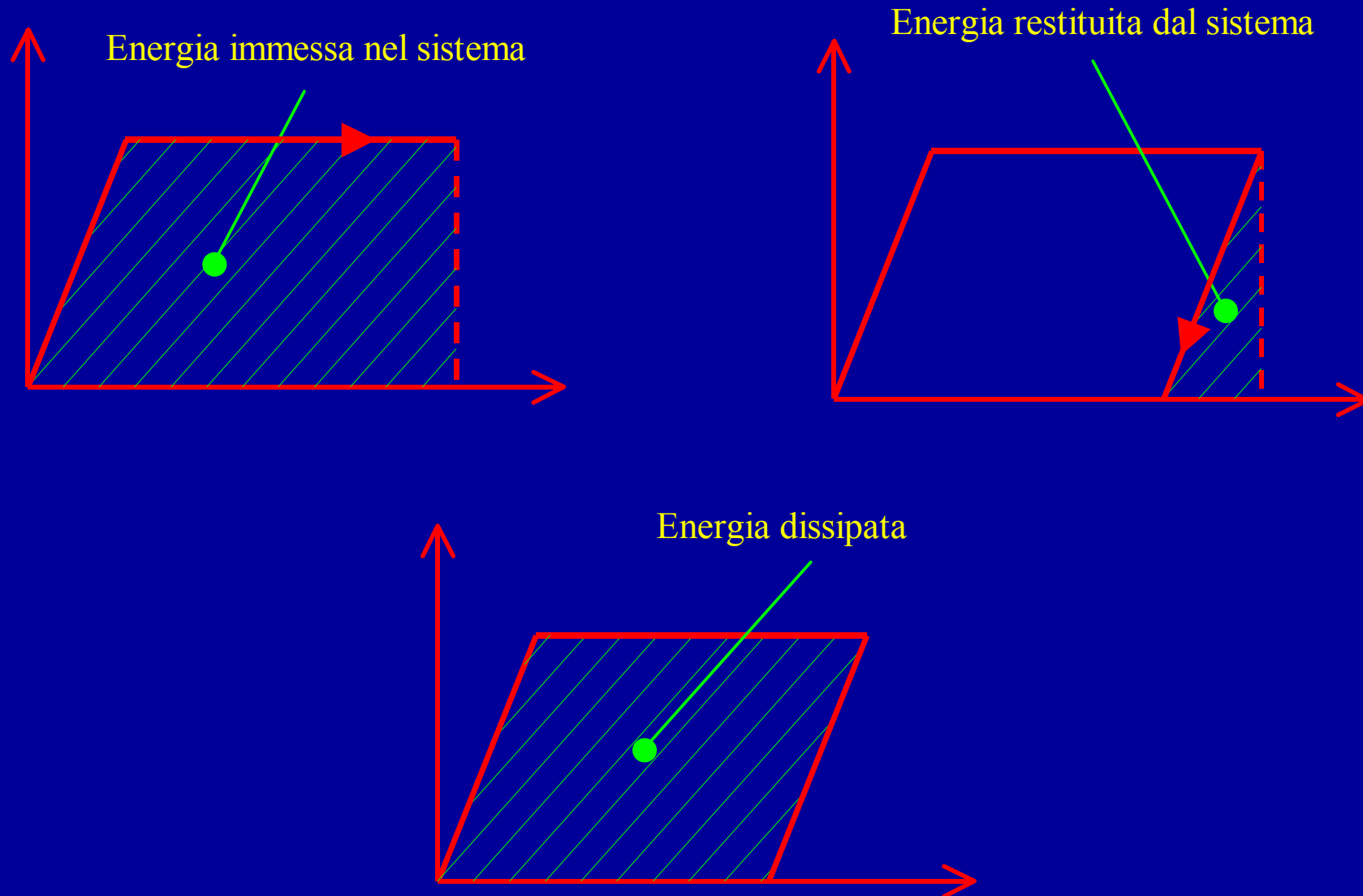
$$\mu^{(cumulata)} = 1 + \frac{\sum |u_{p,i}|}{u_y} \quad u_{p,i} = \text{spostamenti plastici nei diversi cicli}$$

## - Duttilità equivalente (degrado del materiale)

$$\mu^{(equivalente)} = 1 + \frac{E_W}{F_y u_y} \quad E_W = \text{energia dissipata dal sistema}$$

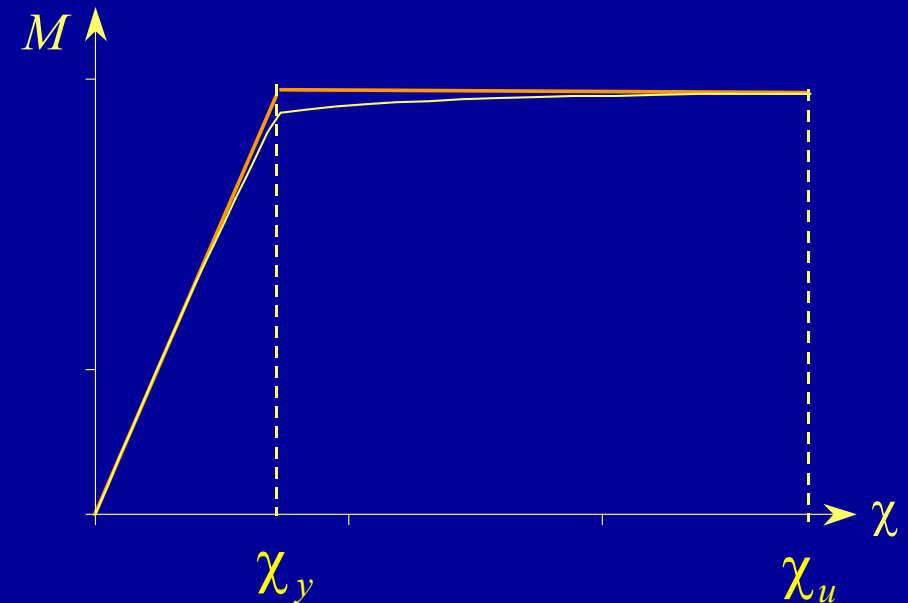
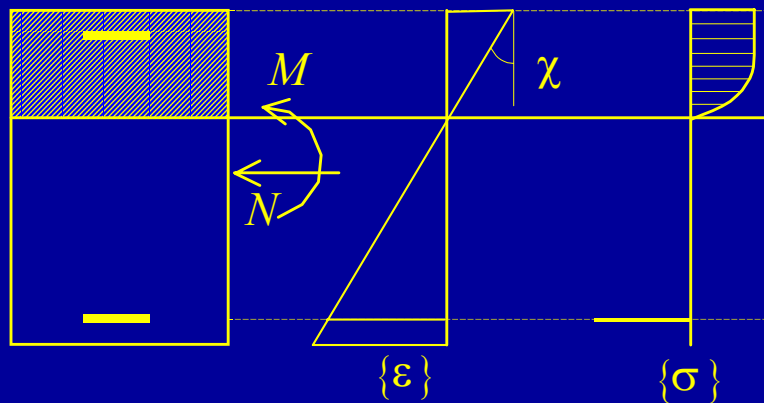
La duttilità misura la capacità di dissipare energia

# Definizione di duttilità



# Duttilità di sezioni in c.a.

-Si determina costruendo un legame ( $M - \chi$ )  
momento-curvatura della sezione

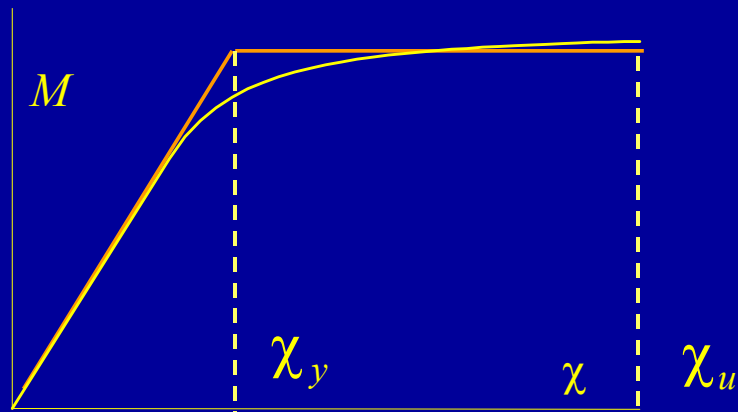
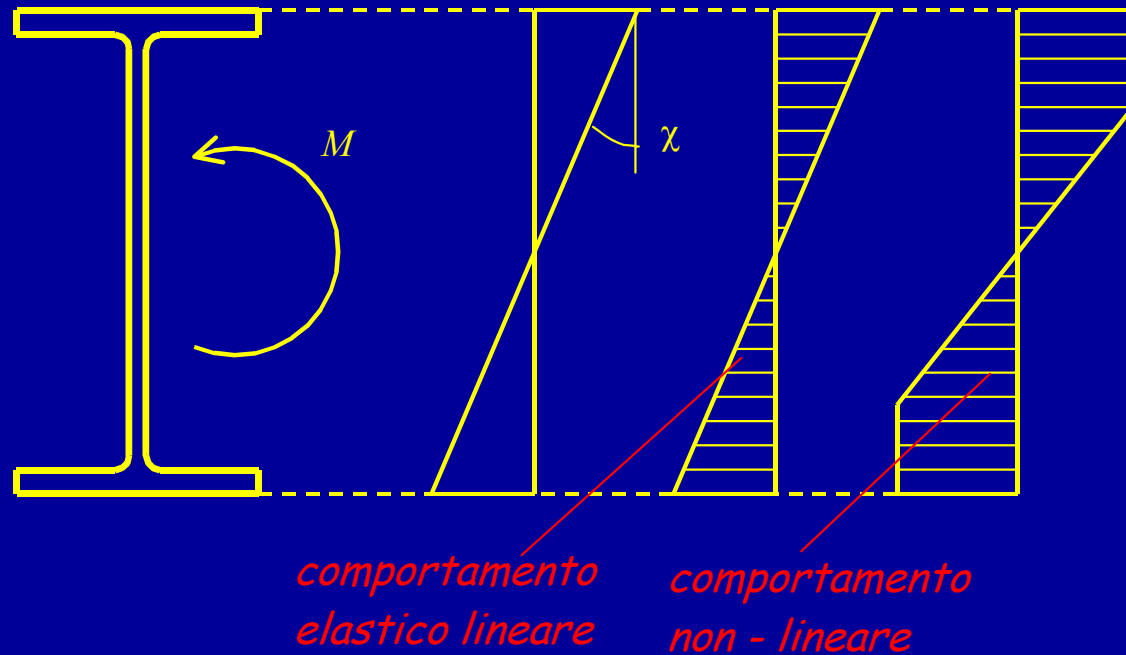


$$\mu_{\chi} = \frac{\chi_u}{\chi_y}$$

## Duttilità di sezioni in c.a.

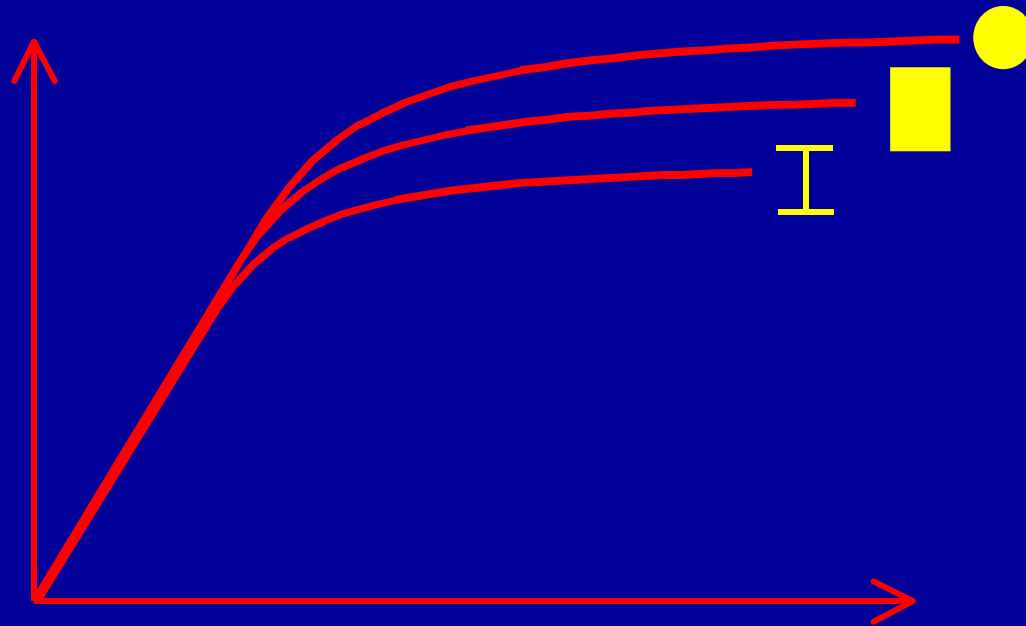
- Cresce al diminuire della percentuale di armatura tesa
- Cresce al crescere dell'armatura compressa
- Decresce al crescere dello sforzo assiale
- Cresce al crescere del grado di confinamento del calcestruzzo
- E' maggiore per sezioni di forma compatta

# Duttilità di sezioni in acciaio



$$\mu_{\chi} = \frac{\chi_u}{\chi_y}$$

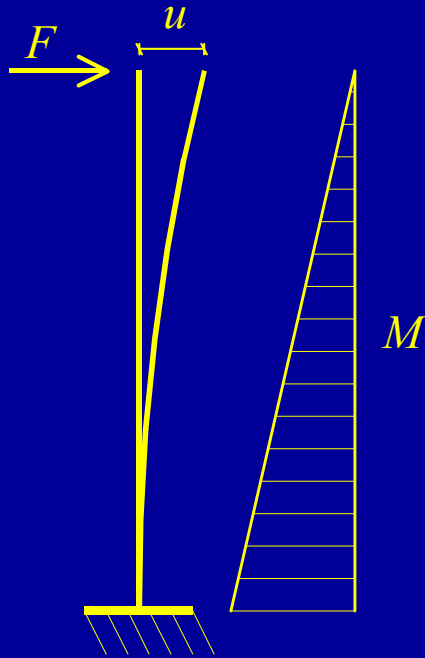
# Duttilità di sezioni in acciaio



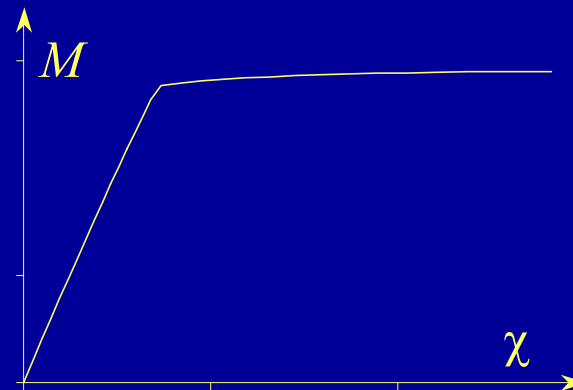
Dipende dalla geometria della sezione e dallo sforzo assiale



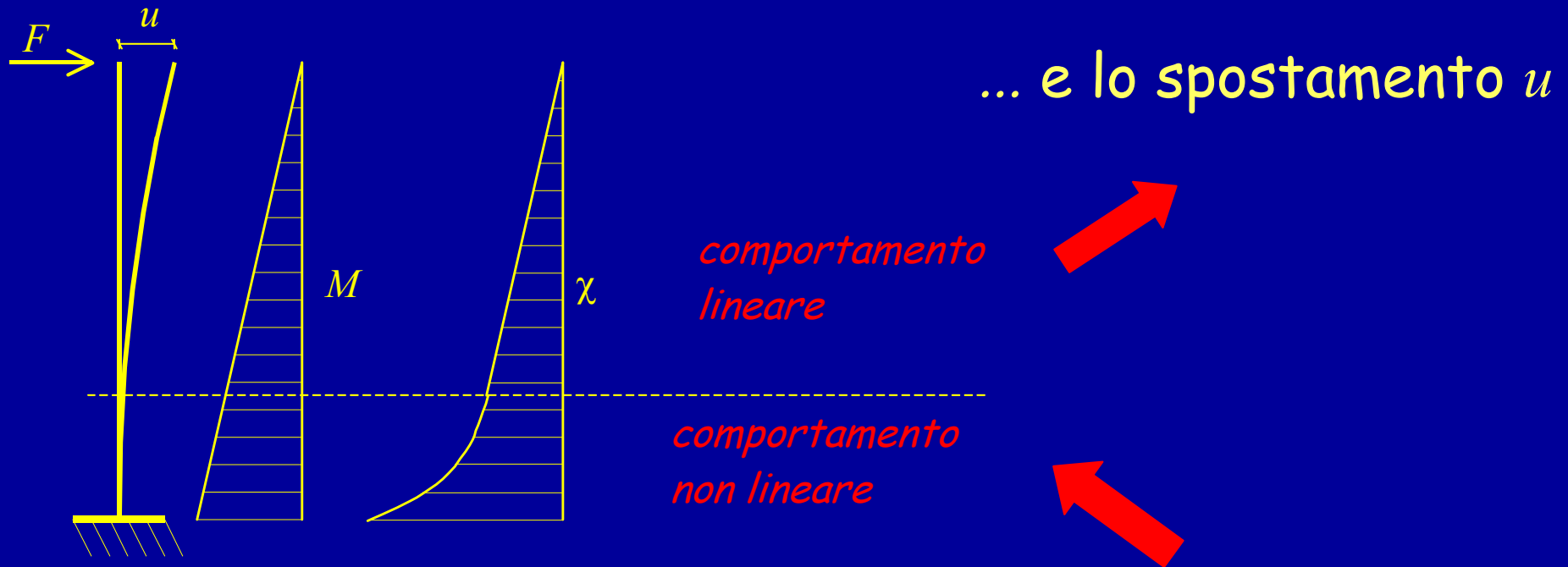
# Duttilità di un elemento strutturale



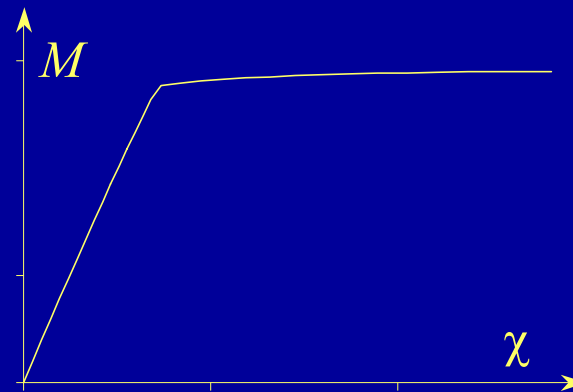
Noto il legame ( $M-\chi$ )  
della sezione si ricava  
il diagramma di  $\chi$



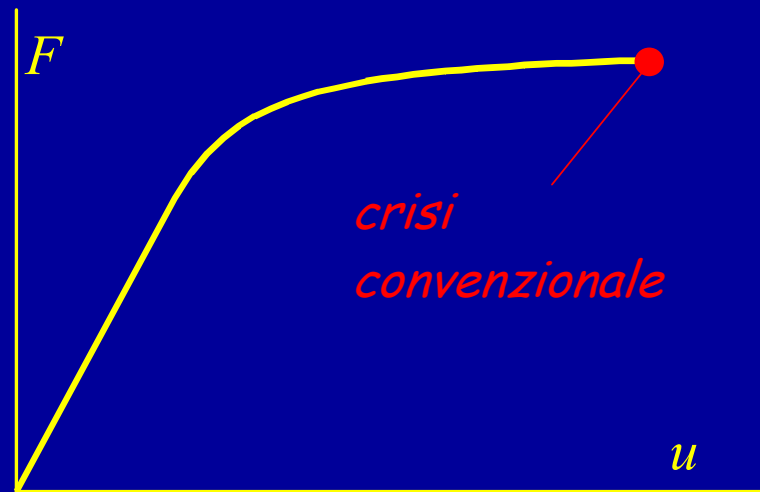
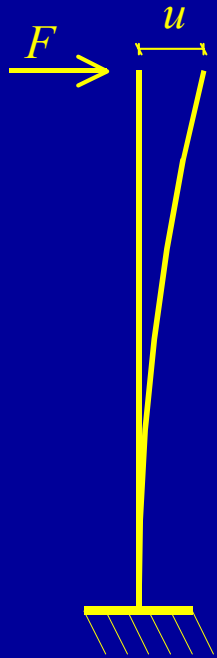
# Duttilità di un elemento strutturale



Noto il legame ( $M-\chi$ )  
della sezione si ricava  
il diagramma di  $\chi$  ...

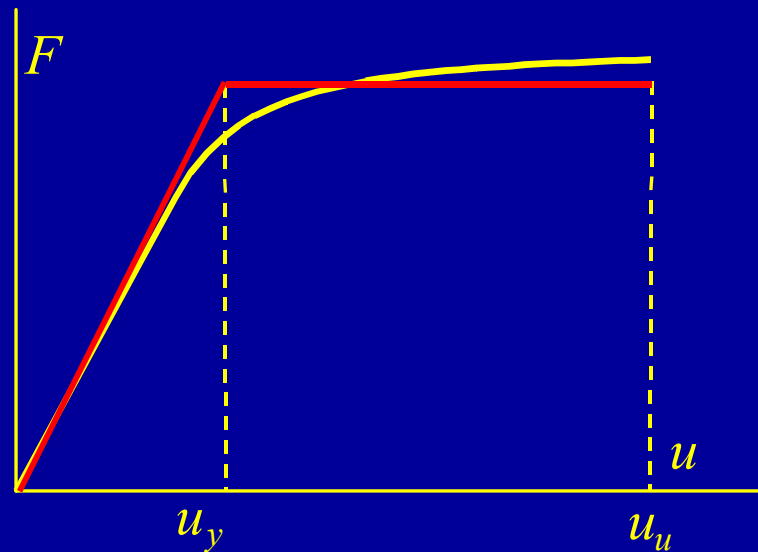
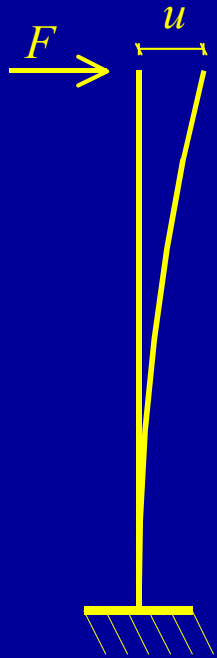


# Duttilità di un elemento strutturale



Si ottiene quindi il legame  $F-u$  dell'elemento

# Duttilità di un elemento strutturale

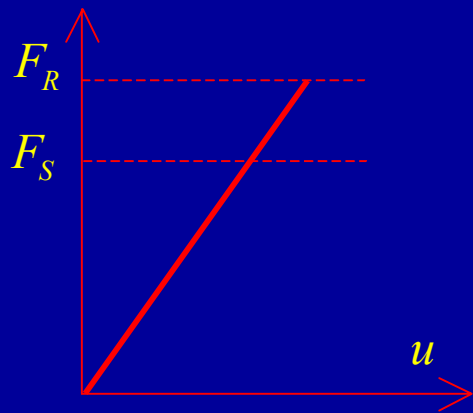


Si ottiene quindi il legame  $F-u$  dell'elemento

e la duttilità allo spostamento  $\mu_u = \frac{u_u}{u_y}$

# Verifica in termini di duttilità

Per sistemi lineari la verifica è fatta sulle forze

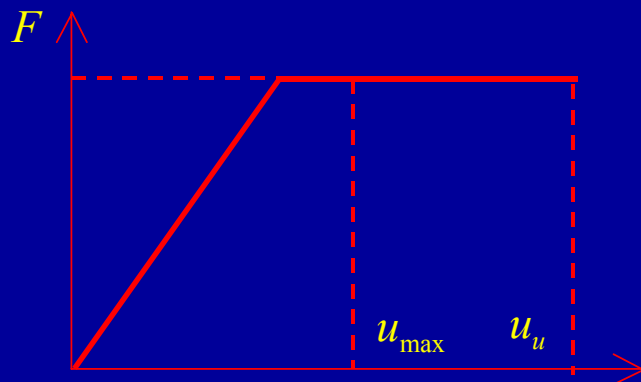


$$F_R \geq F_S$$

$F_R$  = forza resistente

$F_S$  = forza sollecitante

Per sistemi non lineari la verifica è fatta sugli spostamenti



$$u_u \geq u_{\max}$$

$u_u$  = spostamento ultimo

$u_{\max}$  = spostamento impresso

$$\mu_d \geq \mu_r$$

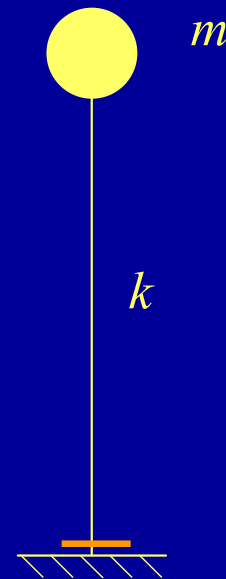
$\mu_d$  = duttilità disponibile

$\mu_r$  = duttilità richiesta

# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

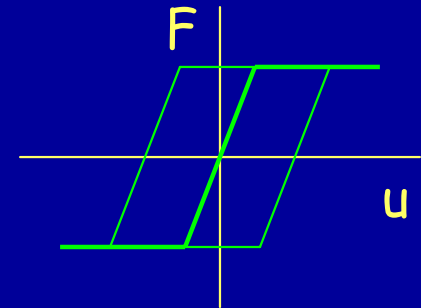


Foto

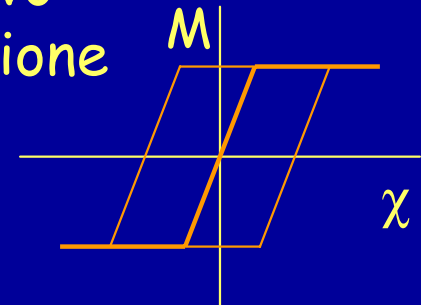


Modello  
di calcolo

Legame costitutivo  
della struttura



Legame  
costitutivo  
della sezione



# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

L'equazione del moto è formalmente la stessa, ma la rigidità non è più una costante

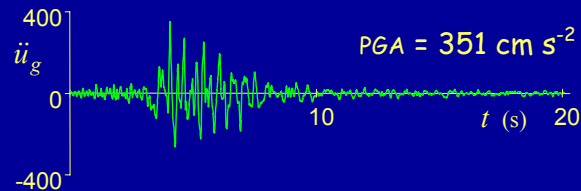
$$m \ddot{u} + c \dot{u} + f(u) = -m \ddot{u}_g \quad f(u) \neq k u$$

La risoluzione avviene per via numerica, in maniera analoga a quanto si fa per un oscillatore semplice elastico (ma con qualche complicazione in più)

# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

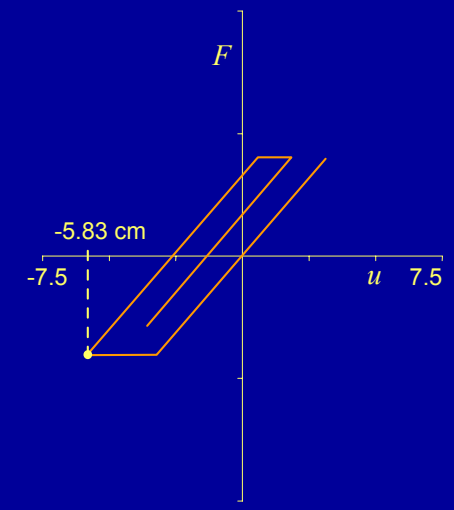
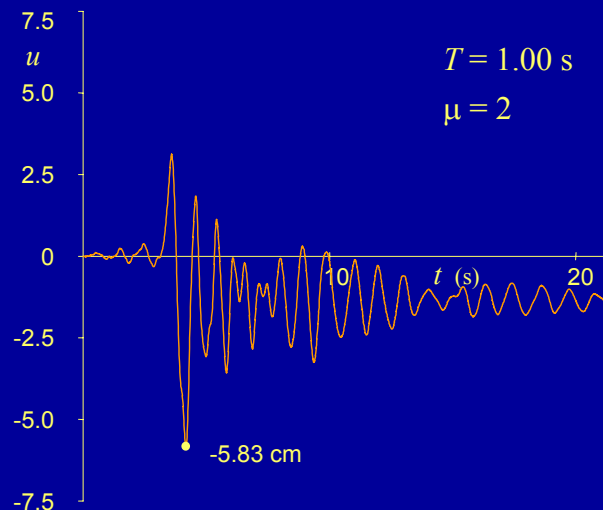
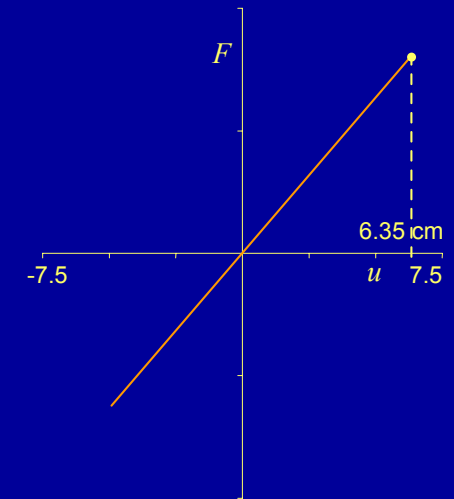
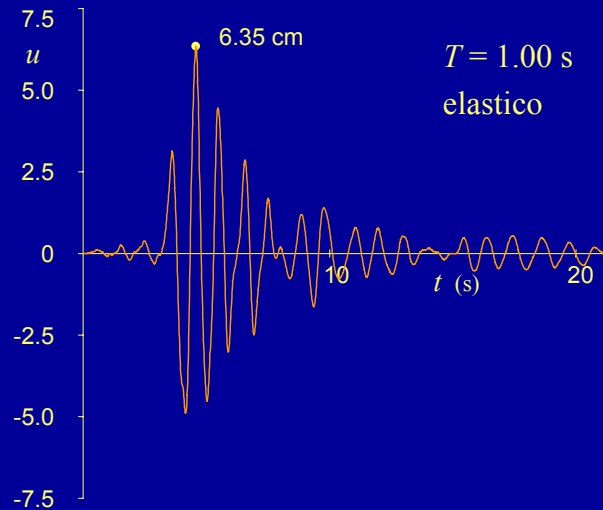
Risposta  
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta  
elasto-plastica



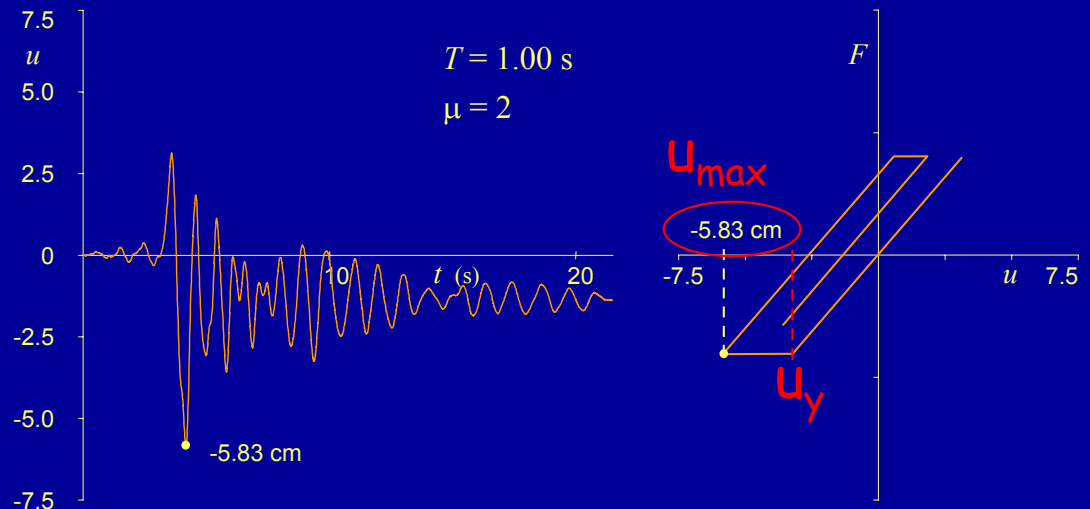


# Richiesta di duttilità

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

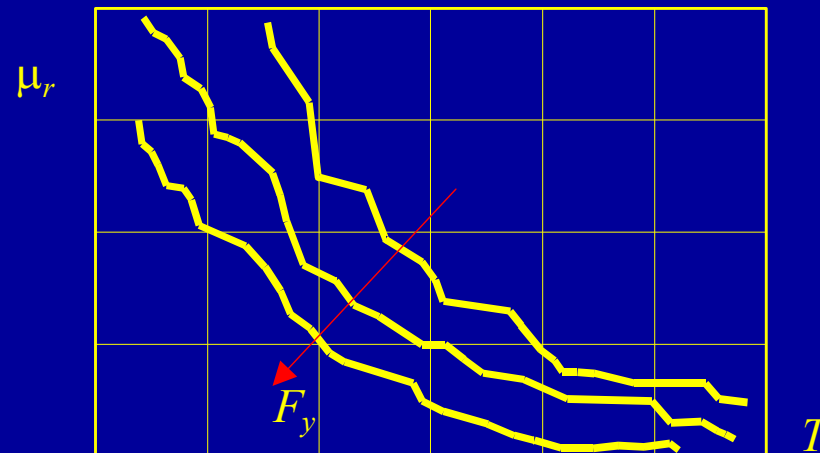
In genere, abbassando la resistenza aumenta la richiesta di duttilità

Risposta elasto-plastica



# Richiesta di duttilità

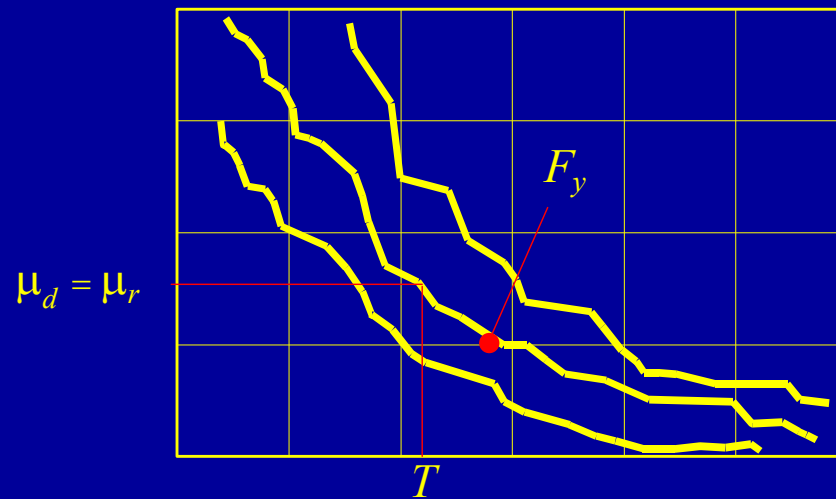
La duttilità richiesta è la minima duttilità che il sistema deve avere per sopravvivere al sisma



Dipende dal limite elastico e dal periodo al sisma

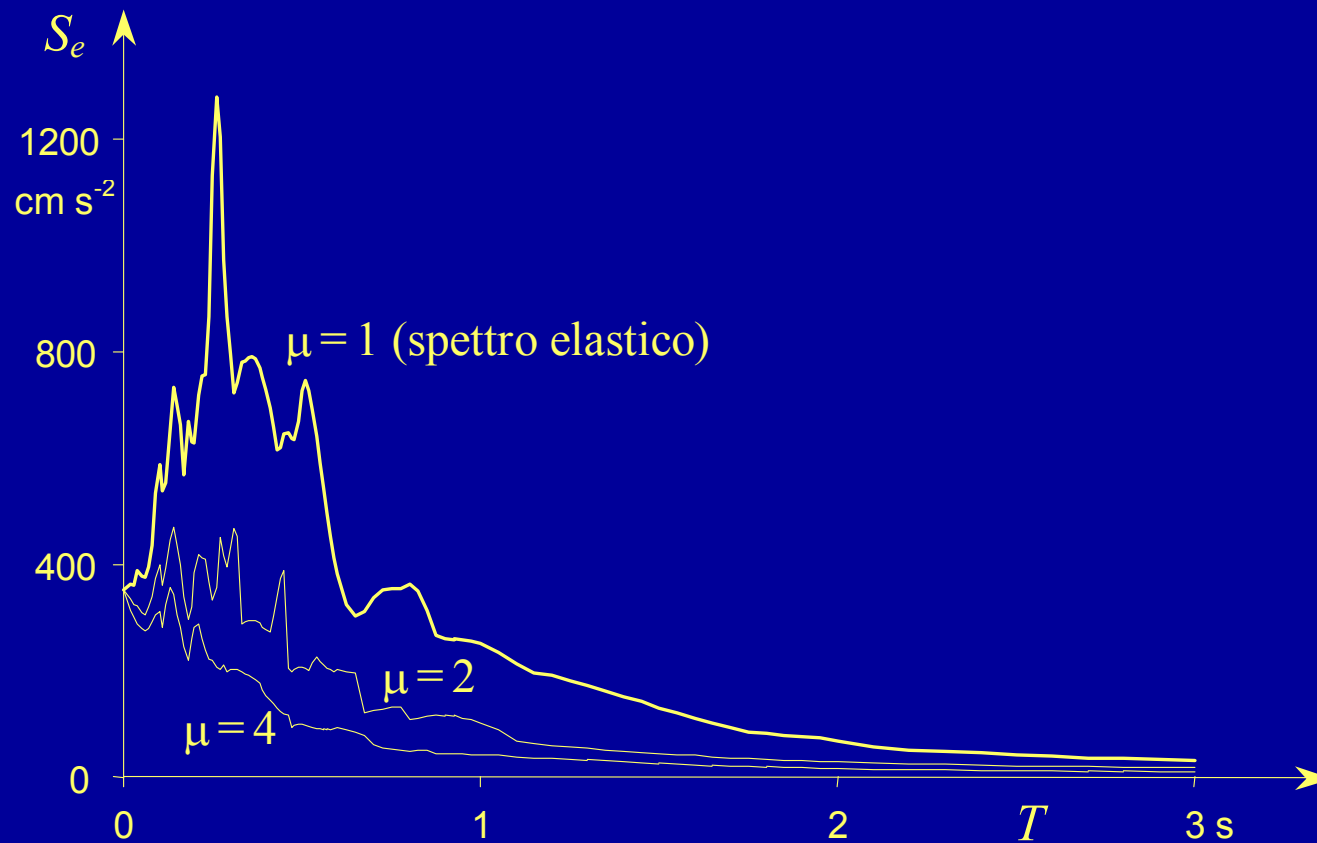
# Richiesta di duttilità

Fissata la duttilità del sistema e noto il periodo può essere ricavata la forza di progetto



Ricordando che  $F = m a$ , possono essere costruite curve  $S_e-T$  a duttilità fissata

# Spettri di risposta non-lineari

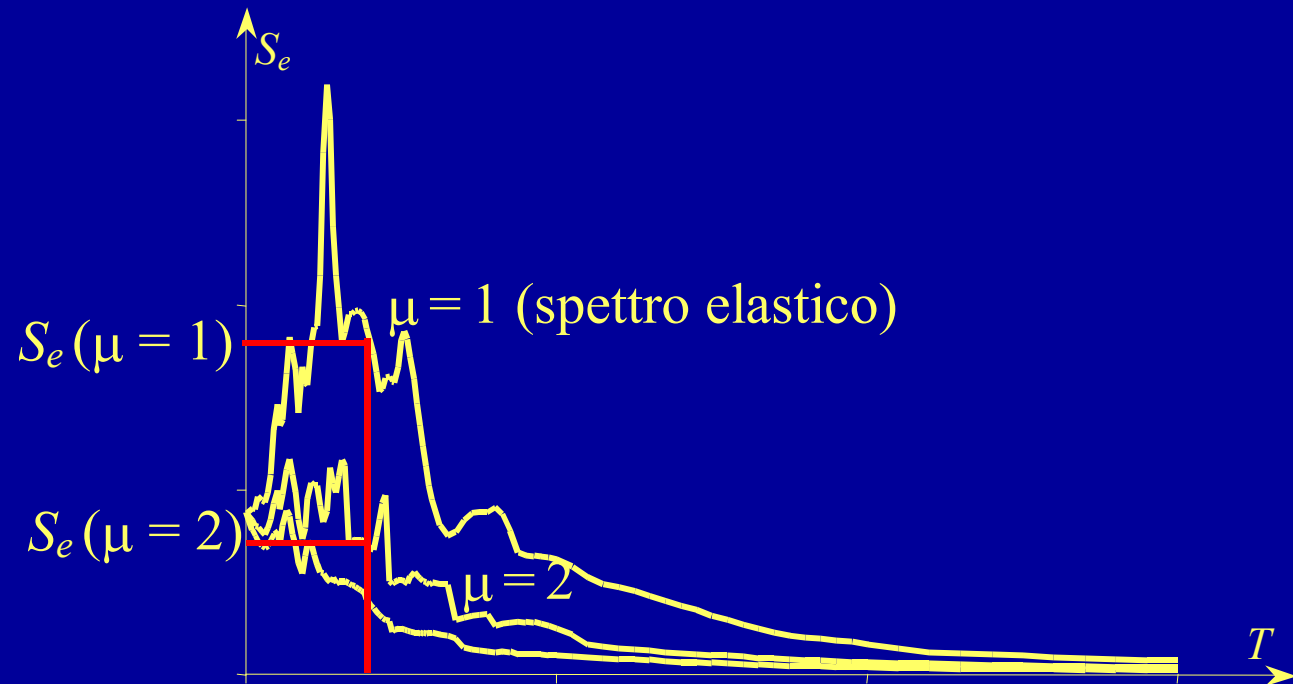


Spettro di risposta a duttilità assegnata

Per  $\mu = 1$  si ottiene lo spettro di risposta elastico

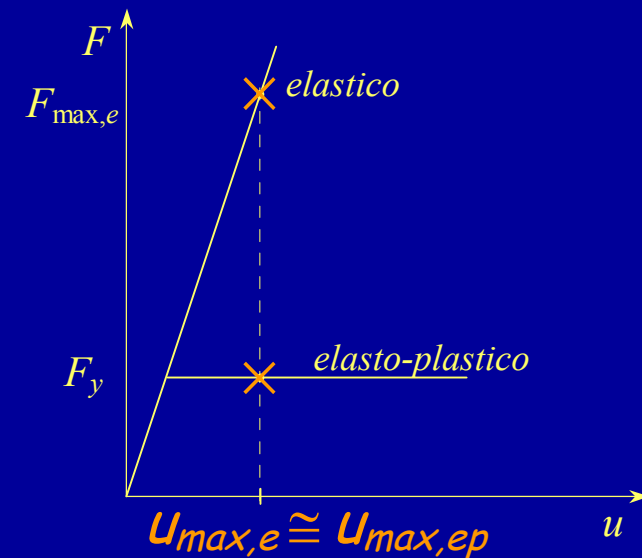
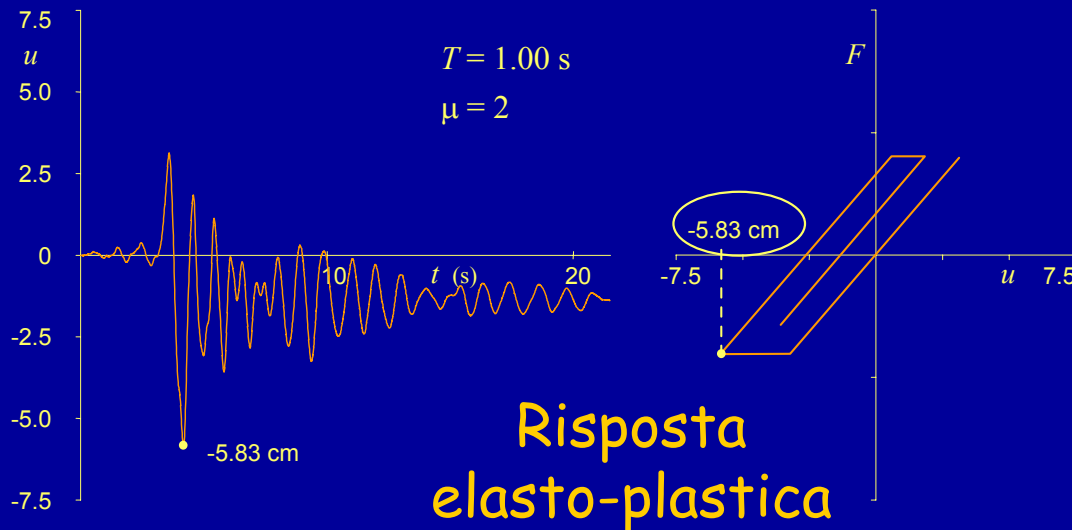
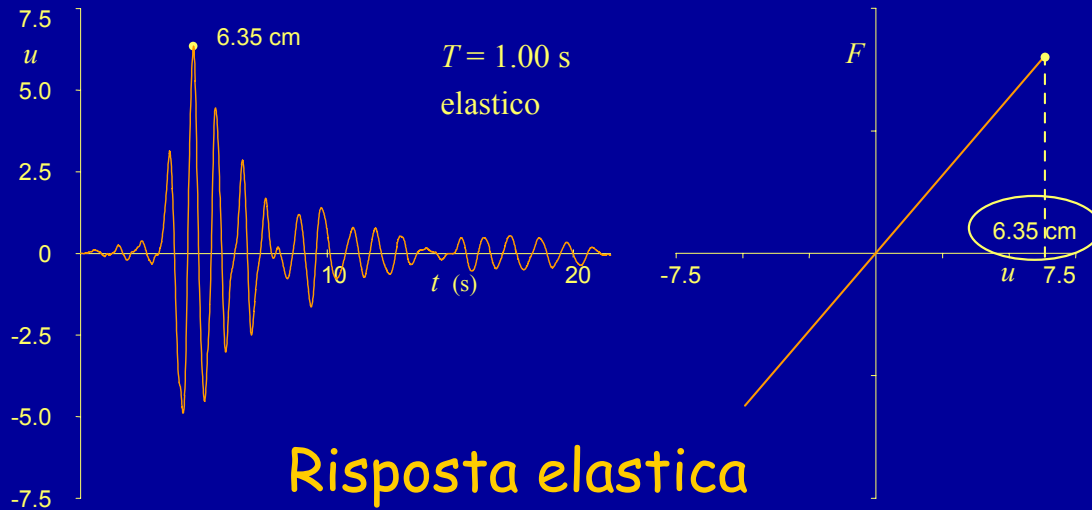
# Progettazione di strutture elasto-plastiche

È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile sia maggiore di quella richiesta



# 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

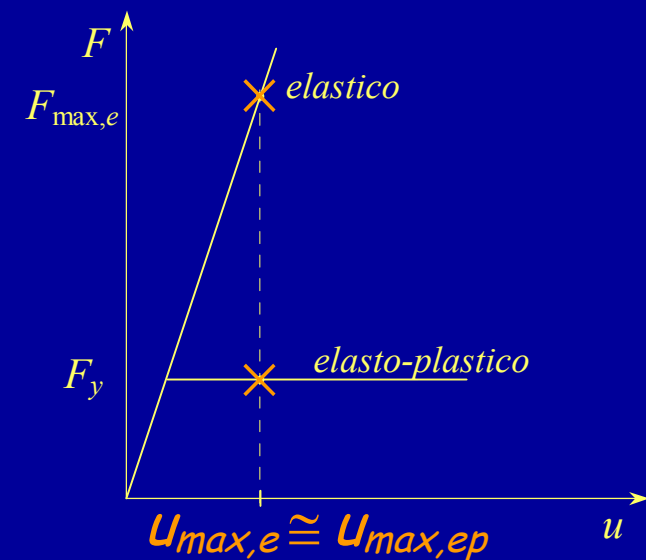
la forza necessaria  
per mantenere la  
struttura in campo  
elastico

per la duttilità

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

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

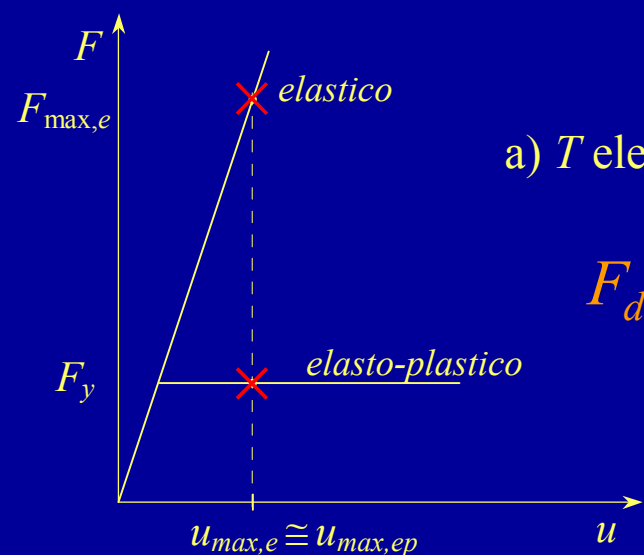
Le analisi numeriche  
mostrano che lo  
spostamento di  
schemi elastici ed  
elasto-plastici è più  
o meno lo stesso



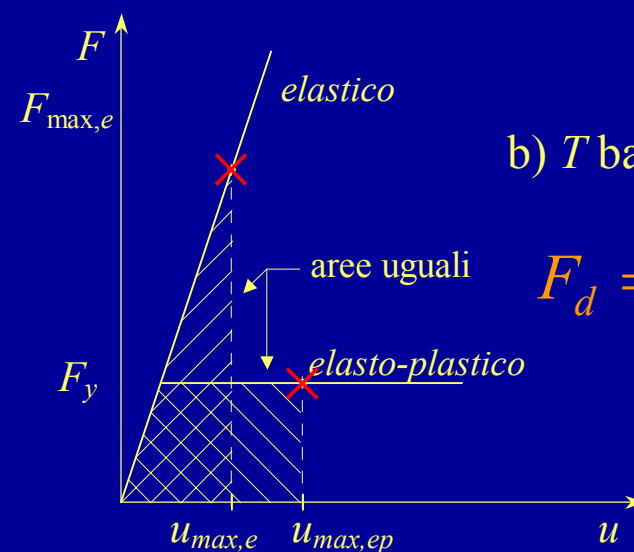
# Progettazione di strutture elasto-plastiche

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



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

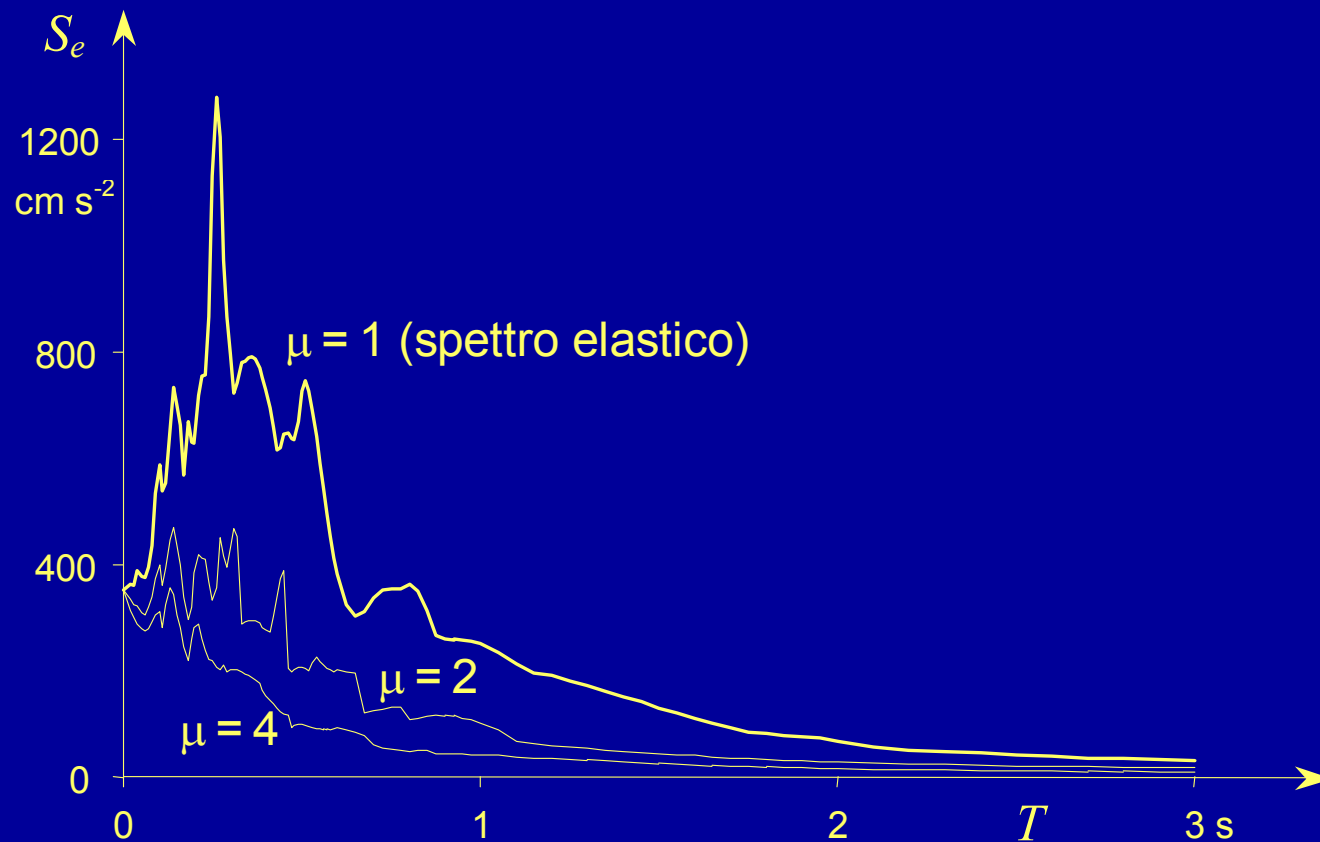


$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\sqrt{2\mu - 1}}$$



# 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

Ordinanza 3274, punto 3.2.5

# 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

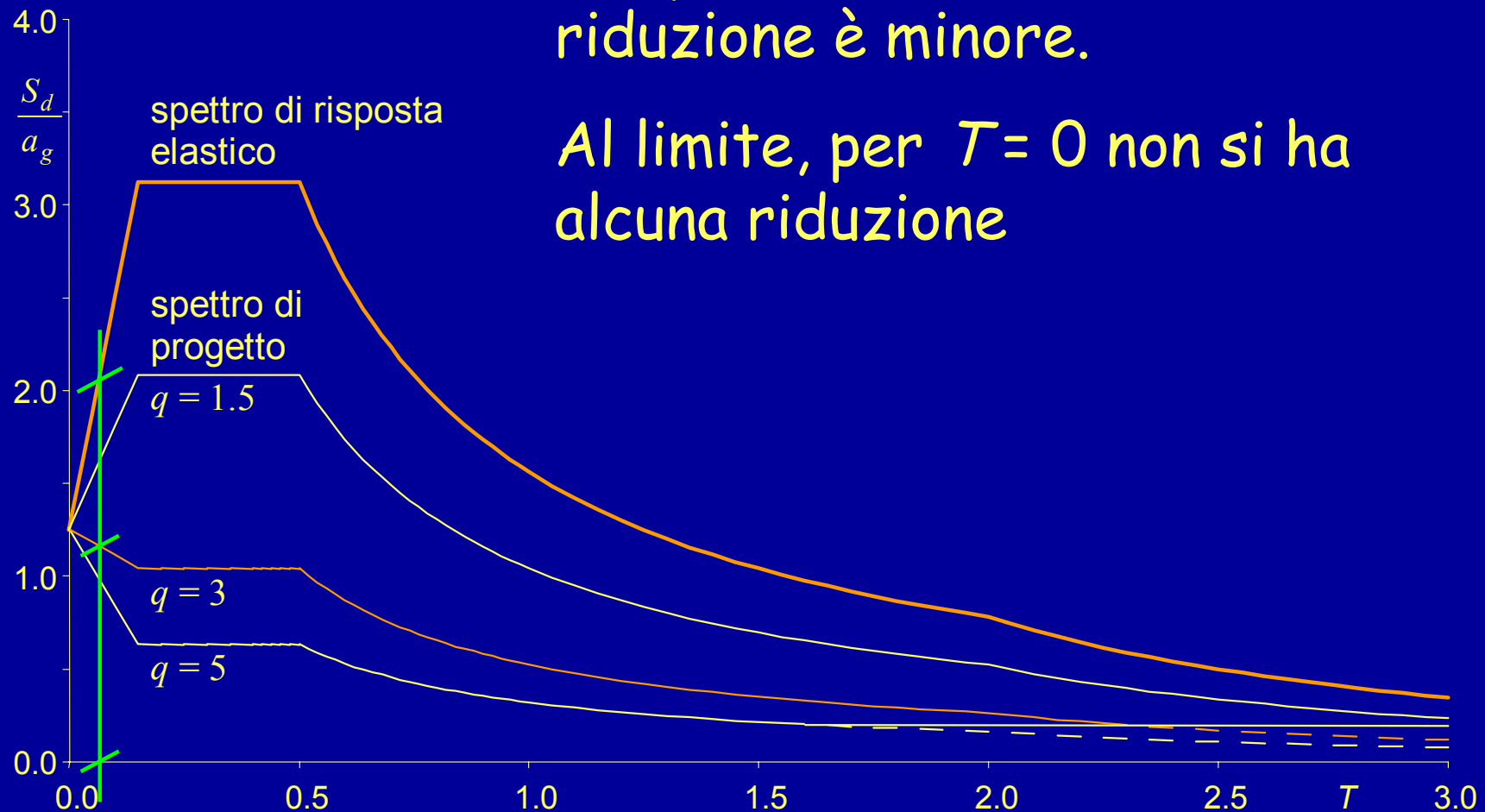
tiene conto della duttilità delle sezioni ma anche del comportamento globale



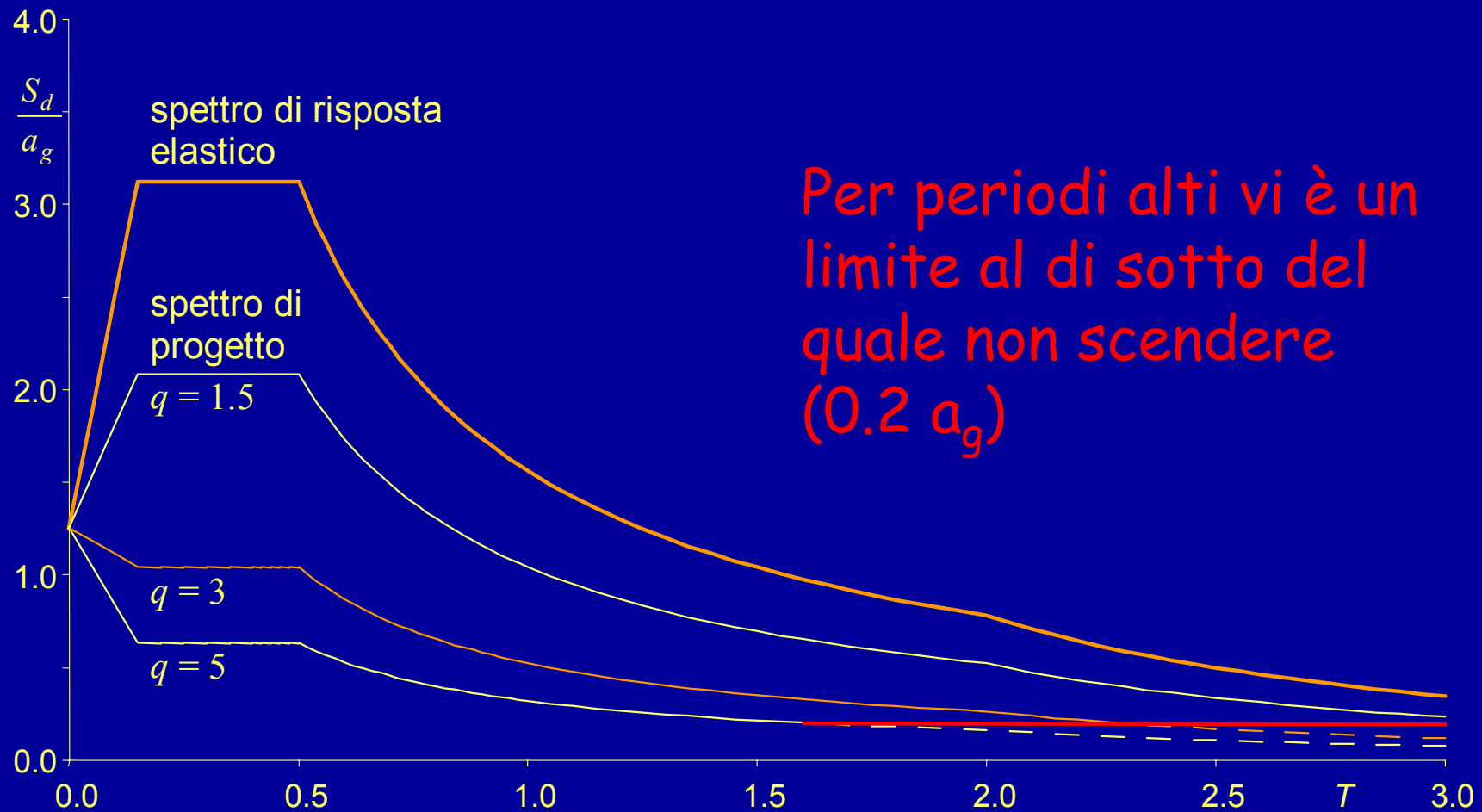
# Spettri di progetto di normativa

Per periodi molto bassi la riduzione è minore.

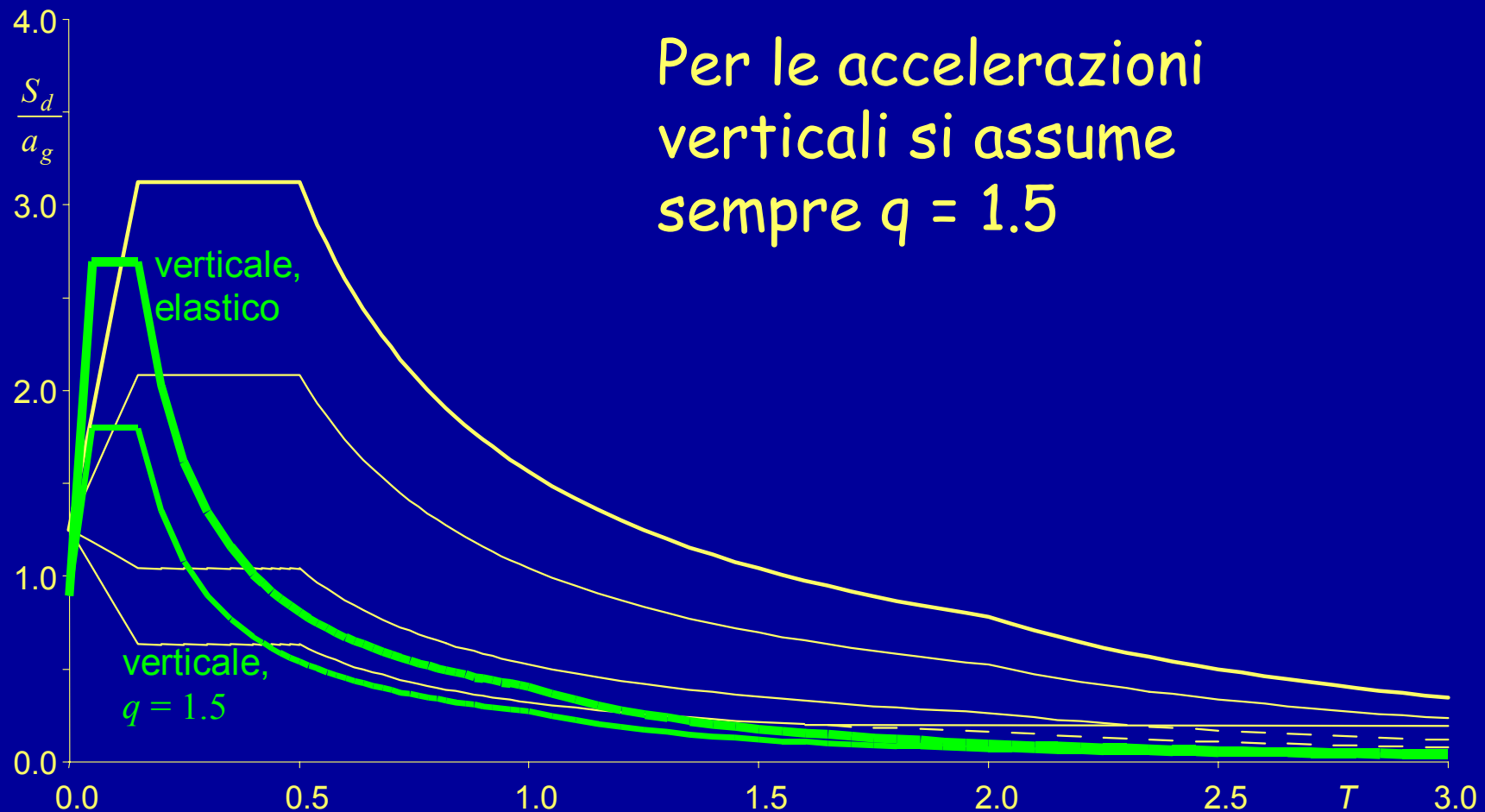
Al limite, per  $T=0$  non si ha alcuna riduzione



# Spettri di progetto di normativa



# Spettri di progetto di normativa accelerazioni orizzontali e verticali



FINE

Tratto dalla presentazione  
Azioni - 6

Con qualche modifica e aggiunta fatte da  
B. Biondi

Per questa presentazione:

coordinamento

A. Ghersi

realizzazione

A. Ghersi

ultimo aggiornamento

6/03/2004