

Corsi di aggiornamento

# Progettiamo insieme

## Teoria e pratica della progettazione strutturale

### 1. Risposta sismica delle strutture

04 - Risposta in campo plastico

Spoletto

18-19 marzo 2016

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)

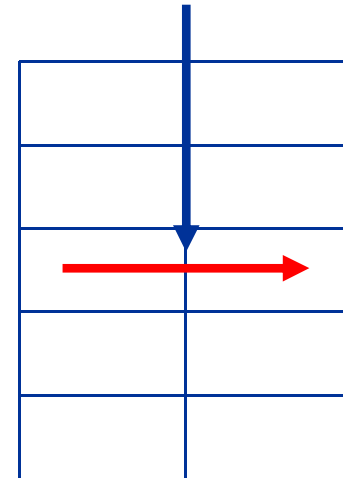
Per strutture con periodo medio-bassi si ha una  
notevole amplificazione dell'accelerazione, rispetto  
a quella del suolo (circa 2.5 volte)

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?

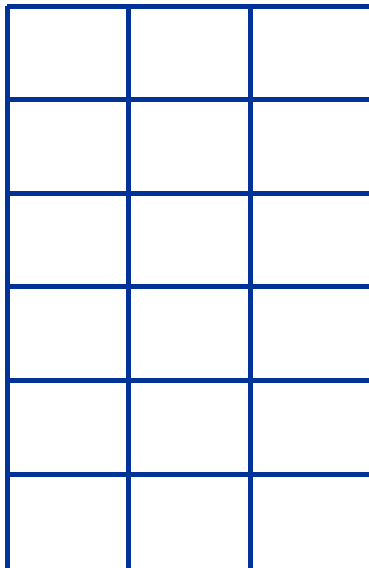
Azioni orizzontali comparabili  
con le azioni verticali

Le sollecitazioni provocate  
dalle azioni orizzontali sono  
molto forti



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

# Comportamento oltre il limite elastico



Modello per i materiali

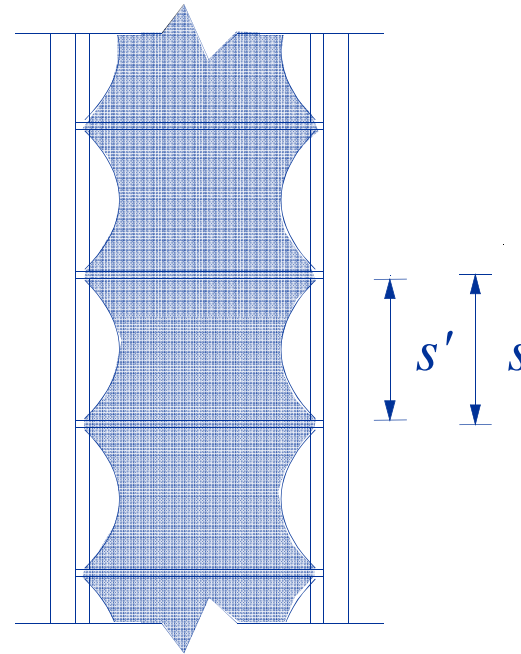
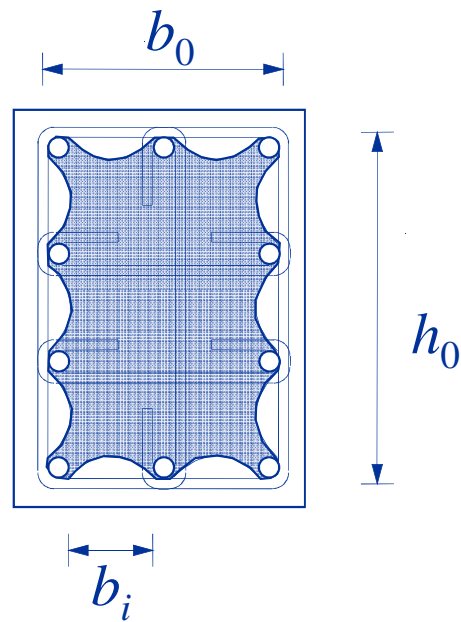


Legame momento-curvatura  
( $M-\chi$ ) per la sezione  
mediante modello a fibre

# Modello per i materiali calcestruzzo

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Efficacia del confinamento



# Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

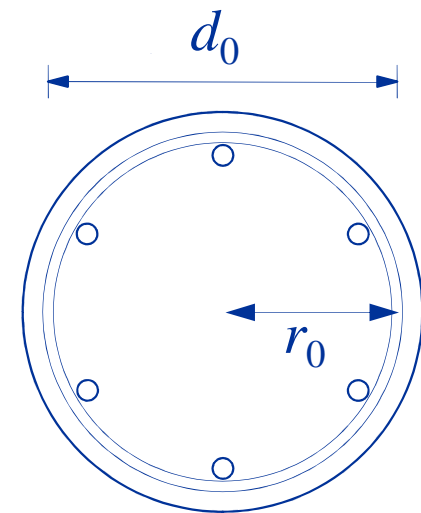
## Staffe in una sezione circolare

Quando il calcestruzzo compresso si dilata le staffe danno una compressione trasversale

$$\sigma_{c,trasv} = 0.5 \omega_{st} f_c$$

con

$$\omega_{st} = \frac{2 A_{st} f_y}{s r_0 f_c}$$



La compressione trasversale migliora il comportamento del calcestruzzo

# Calcestruzzo

## confinamento dovuto alle staffe

### Staffe in una sezione circolare

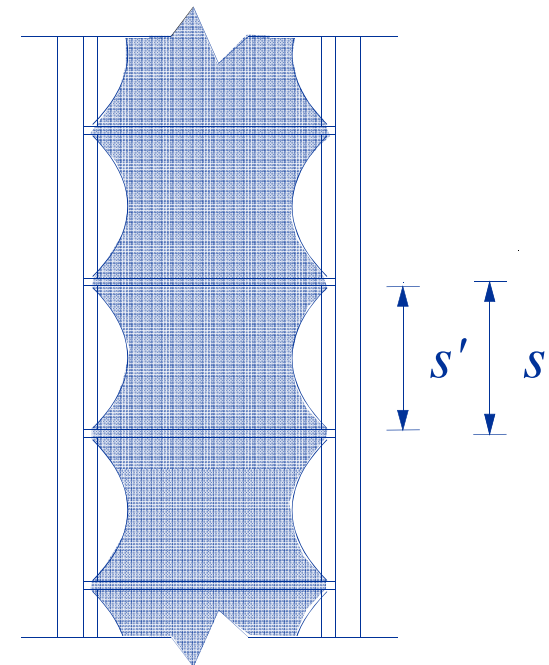
#### Efficacia del confinamento

Allontanandosi dalla staffa, la zona confinata si riduce

Si considera un coefficiente di efficacia pari al rapporto tra volume effettivamente confinato e volume idealmente racchiuso dalle staffe

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3 d_0}\right)^2$$

quindi  $\sigma_{c,transv} = 0.5 \alpha_s \omega_{st} f_c$



# Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

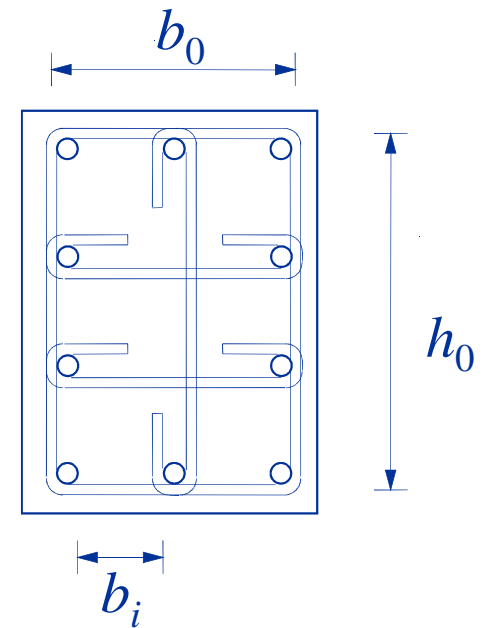
## Staffe in una sezione rettangolare

Quando il calcestruzzo compresso si dilata le staffe danno una compressione trasversale

$$\sigma_{c,trasv} = 0.5 \omega_{st} f_c$$

con

$$\omega_{st} = \frac{\sum A_{st} l_{st}}{b_0 h_0 s} \frac{f_y}{f_c}$$





# Calcestruzzo

## confinamento dovuto alle staffe

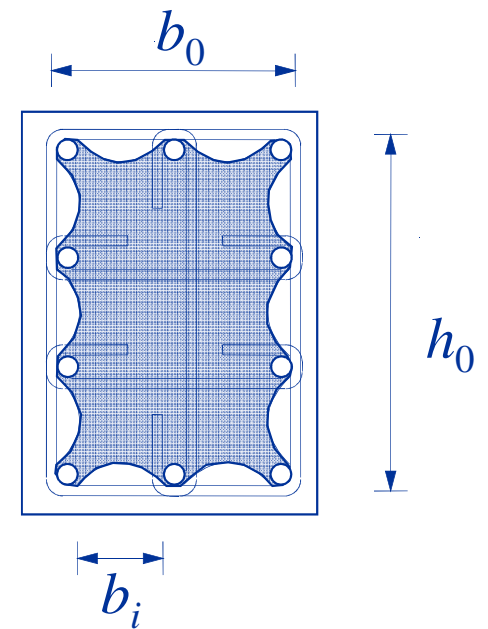
### Staffe in una sezione rettangolare

#### Efficacia del confinamento

Staffe e tirantini sono meno efficaci quando ci si allontana dai punti ben bloccati

Si considera un coefficiente di efficacia

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 b_0 h_0}$$



# Calcestruzzo

## confinamento dovuto alle staffe

### Staffe in una sezione rettangolare

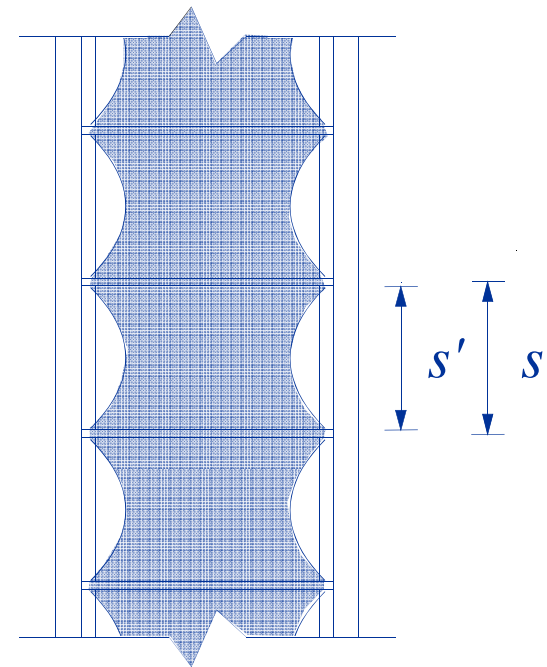
#### Efficacia del confinamento

Anche in senso longitudinale c'è una riduzione dell'efficacia del confinamento

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3b_0}\right) \left(1 - \frac{s'}{3h_0}\right)$$

quindi  $\sigma_{c,trasv} = 0.5 \alpha \omega_{st} f_c$

con  $\alpha = \alpha_s \alpha_n$



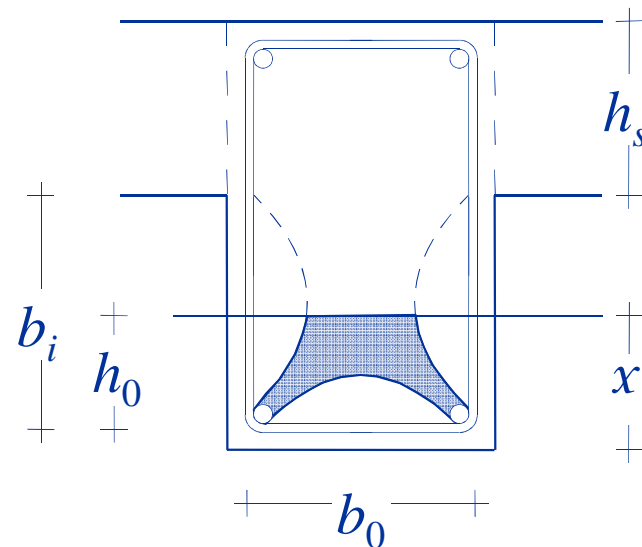
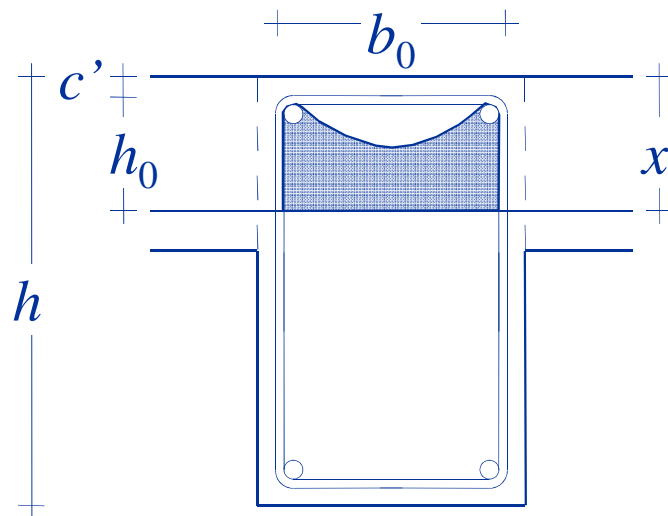
# Calcestruzzo

## confinamento dovuto alle staffe

### Staffe in una trave a sezione rettangolare

#### Efficacia del confinamento

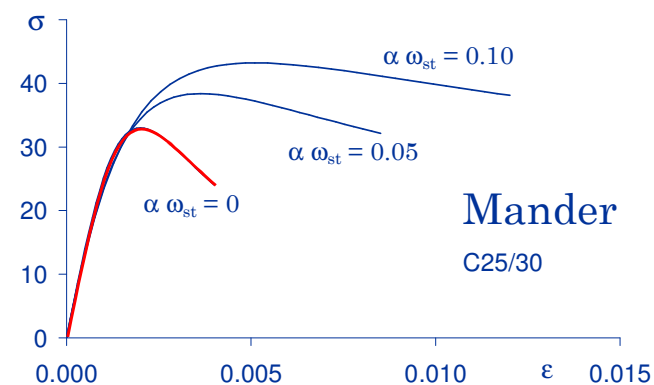
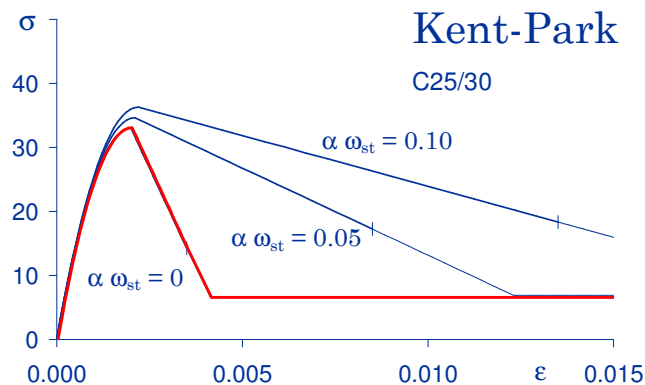
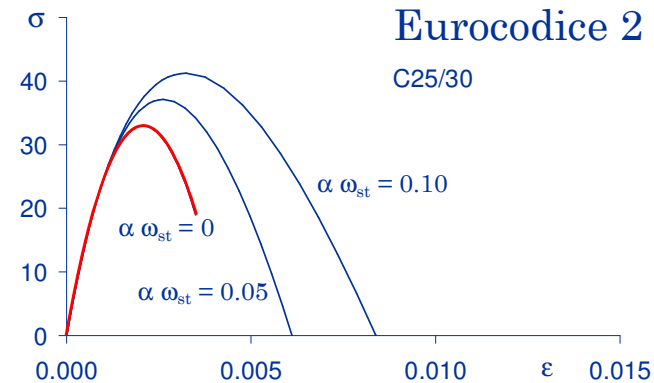
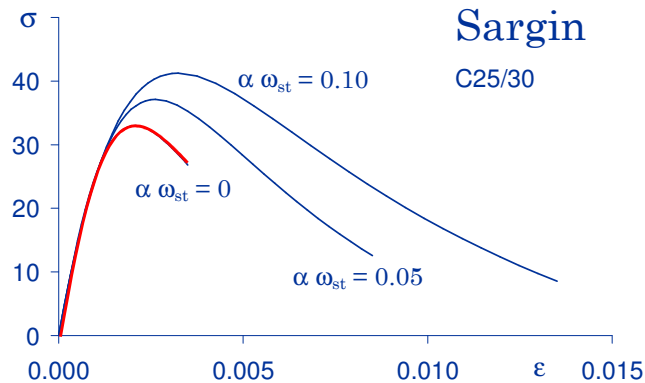
Nel valutare l'efficacia del confinamento bisogna tener conto di qual è la parte compressa e come viene confinata



# Modello per i materiali calcestruzzo

Modelli:

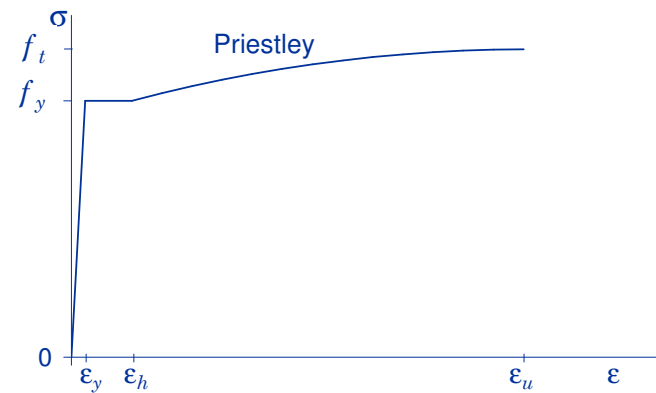
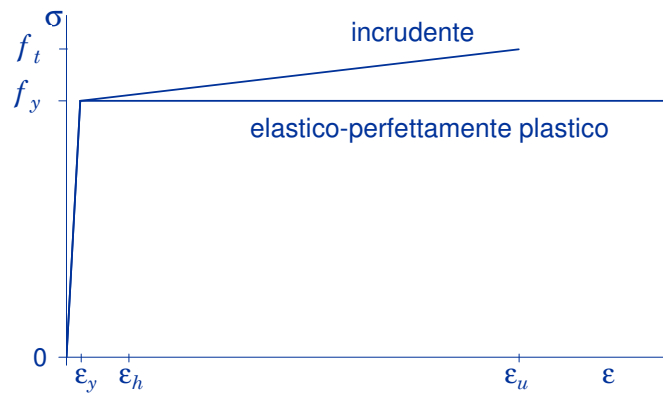
- Esistono numerose proposte, molto diverse



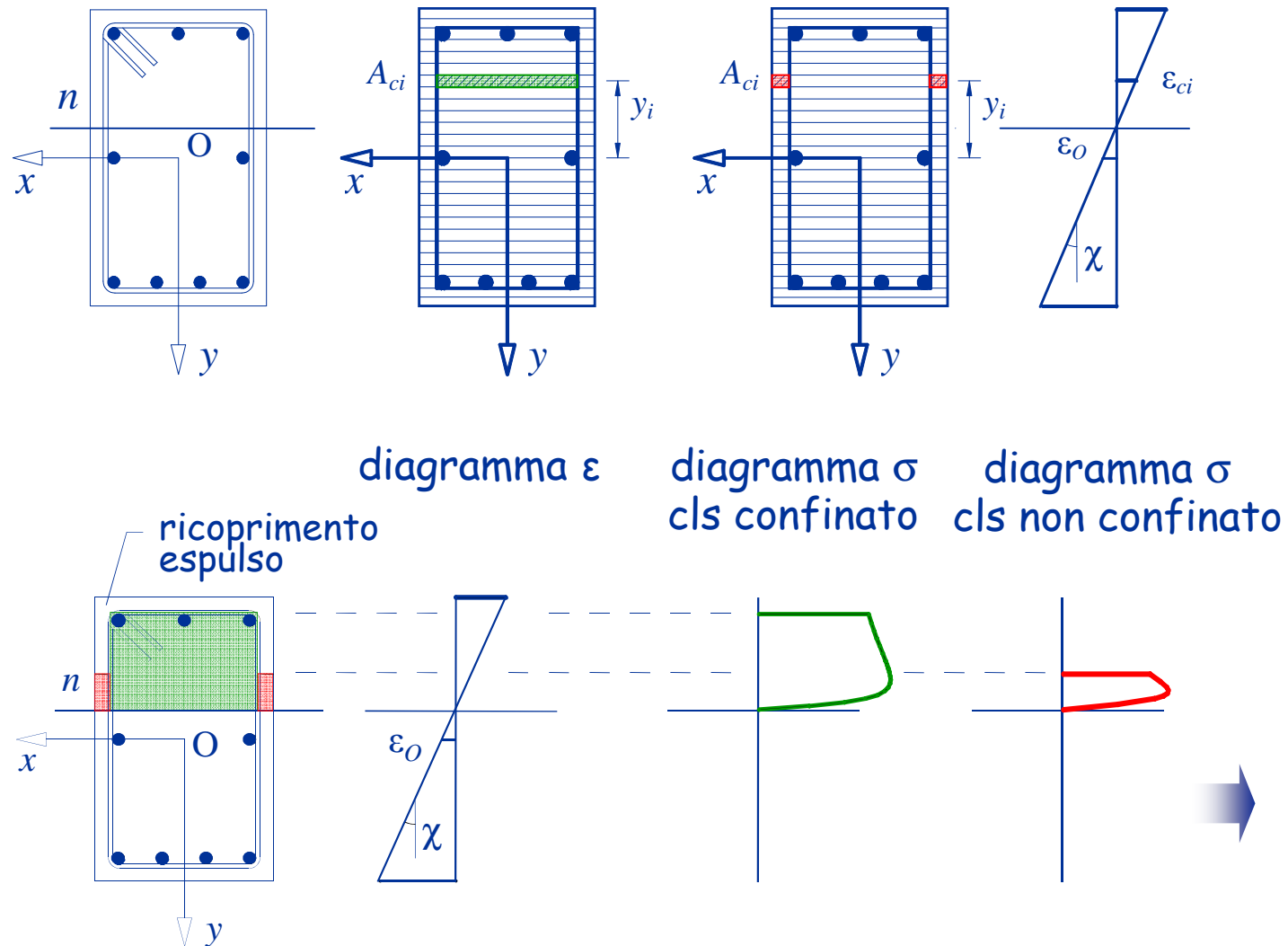
# Modello per i materiali acciaio

Modelli:

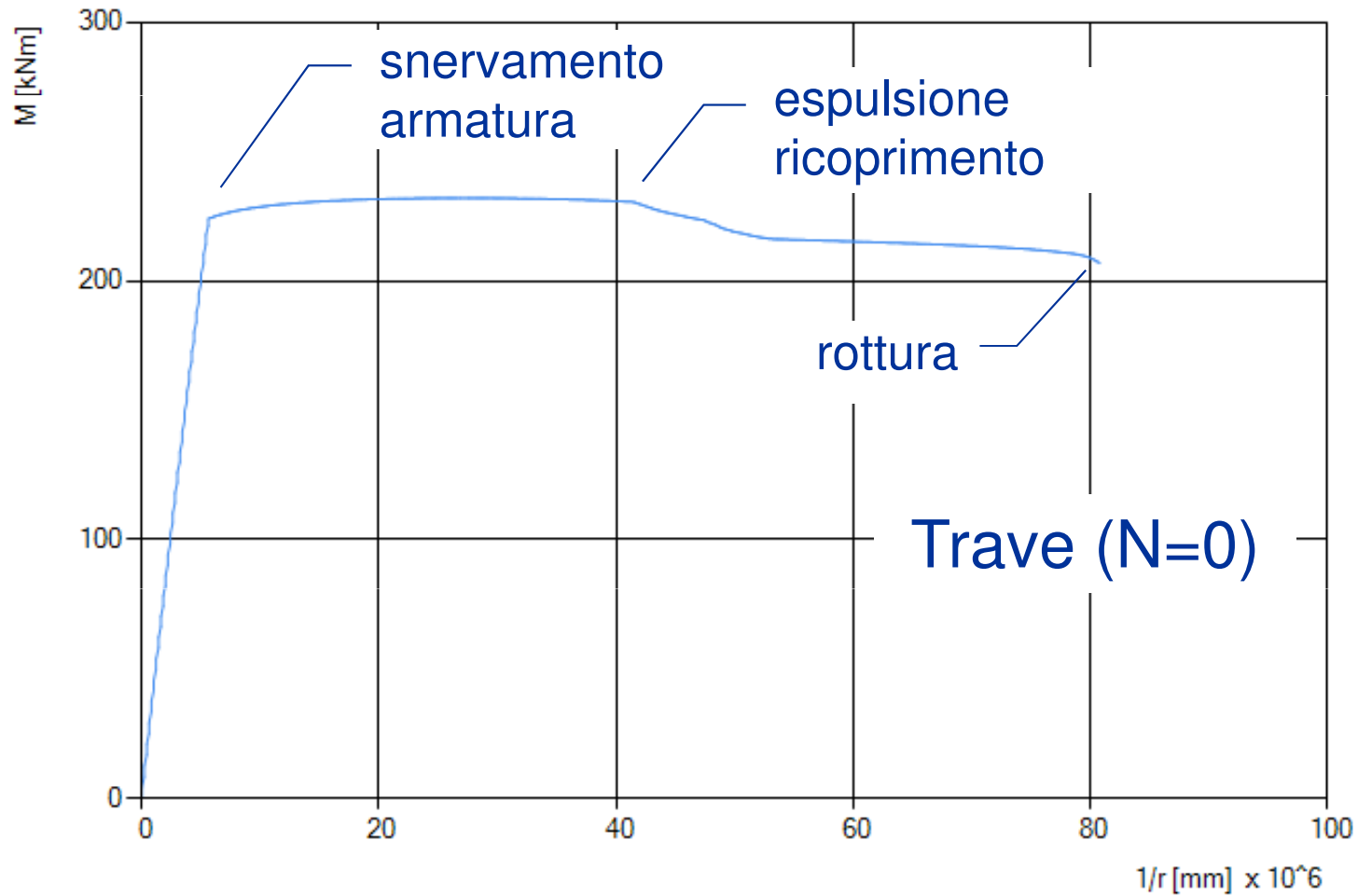
- Esistono alcune proposte, leggermente diverse



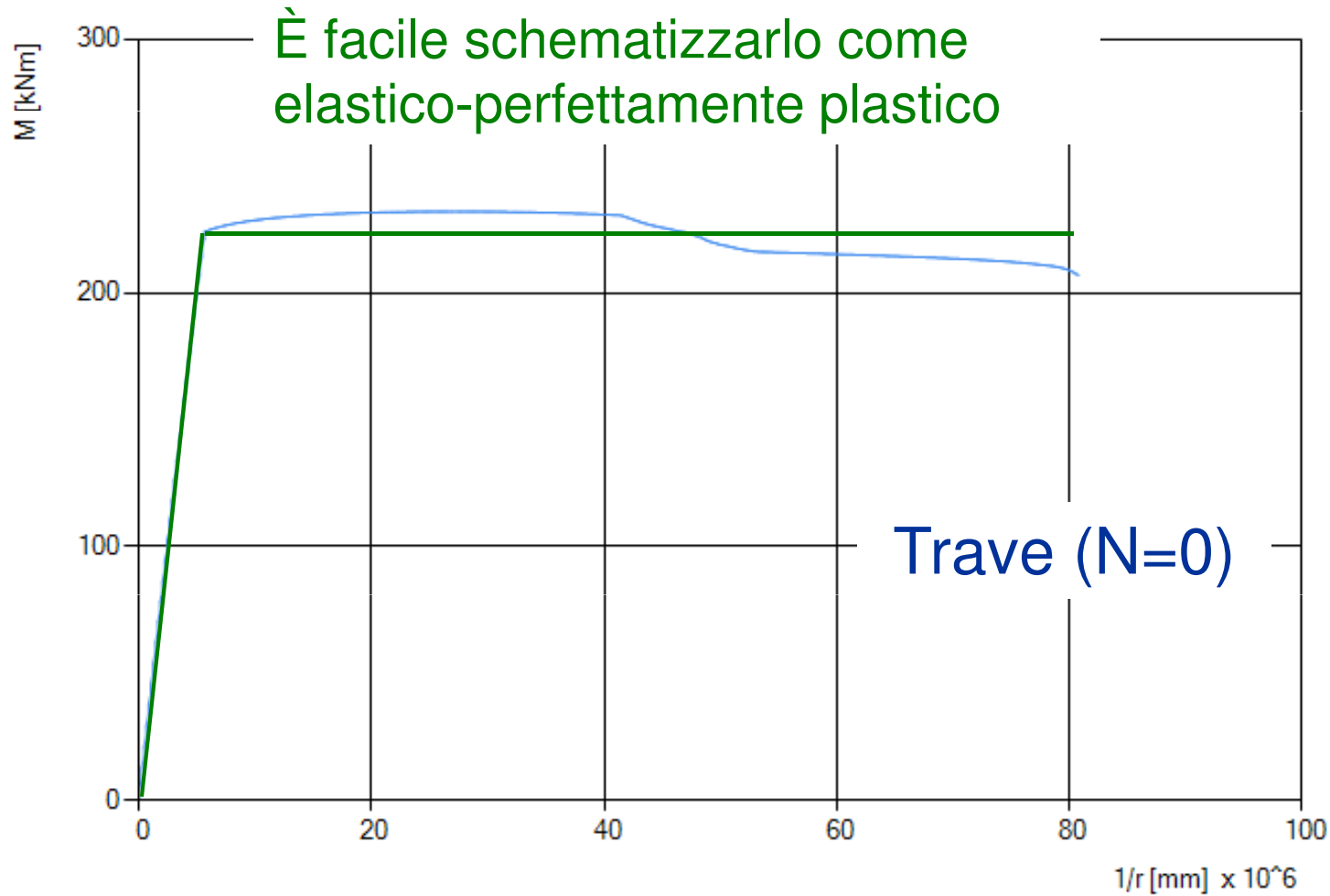
# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

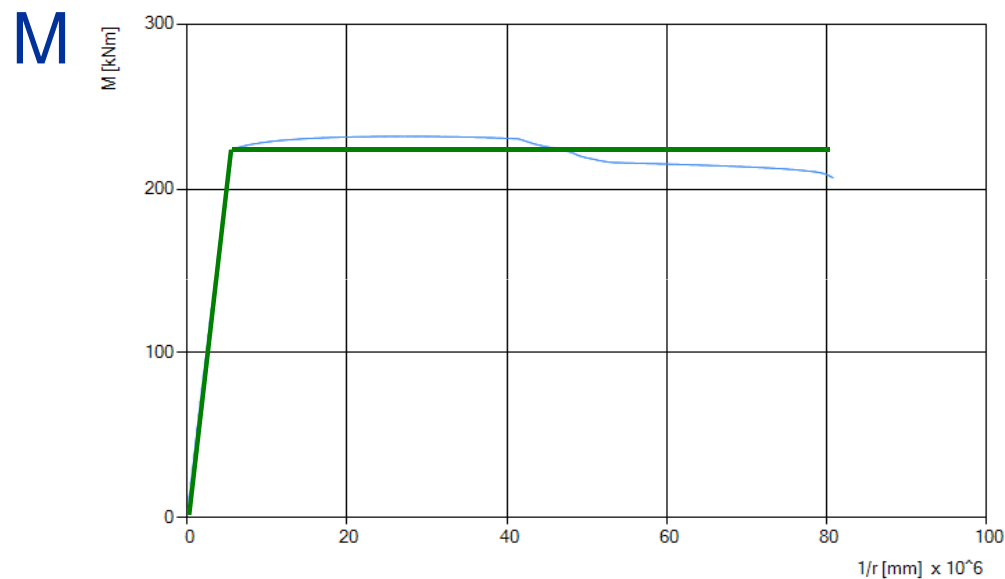
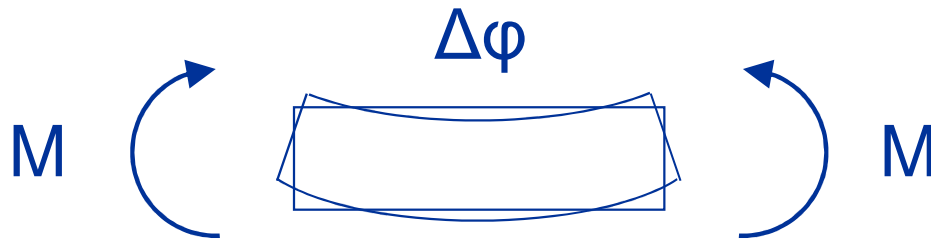


# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre





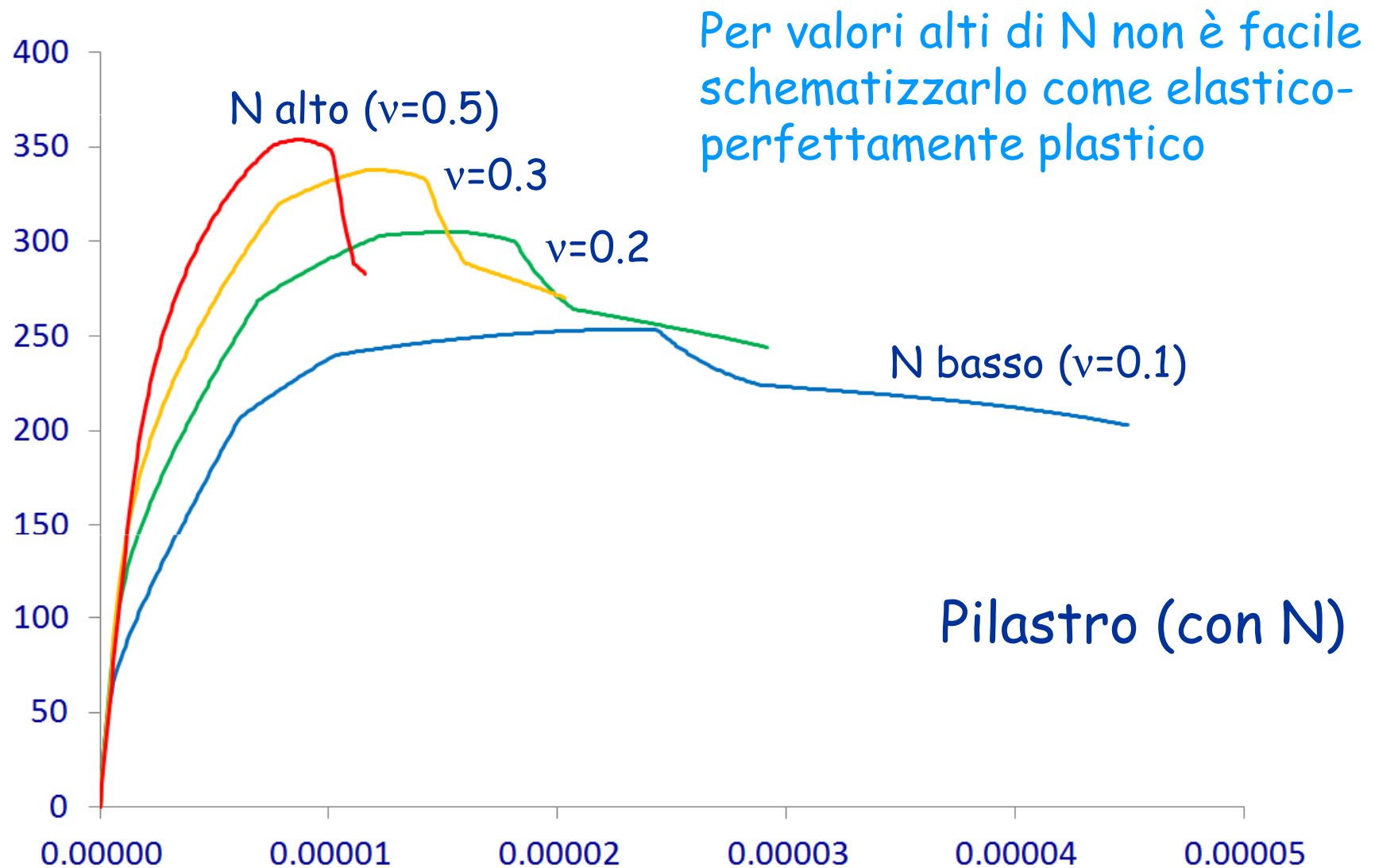
# Cerniera plastica concio di trave



$$1/r \Rightarrow \Delta\varphi$$

Trave ( $N=0$ )

# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



# Legame momento-curvatura

## Applicazioni

Per applicazioni numeriche è messo a disposizione il programma RC\_NL (versione 2.5a), che determina il legame momento curvatura per una qualsiasi sezione

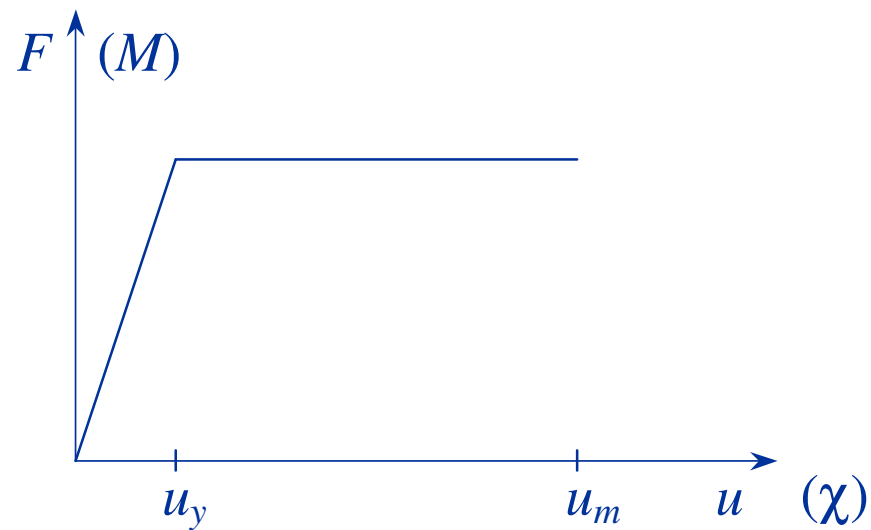
- È fornito il programma di installazione (cartella RC\_NL-25a\_setup): eseguire il file Setup per installare il programma
- È fornita una documentazione con istruzioni per l'uso e alcuni esempi (cartella RC\_NL-25a\_documentazione)

# Risposta sismica

Schemi a un grado di libertà  
in campo plastico

# Comportamento oltre il limite elastico

## Legame elastico-perfettamente plastico

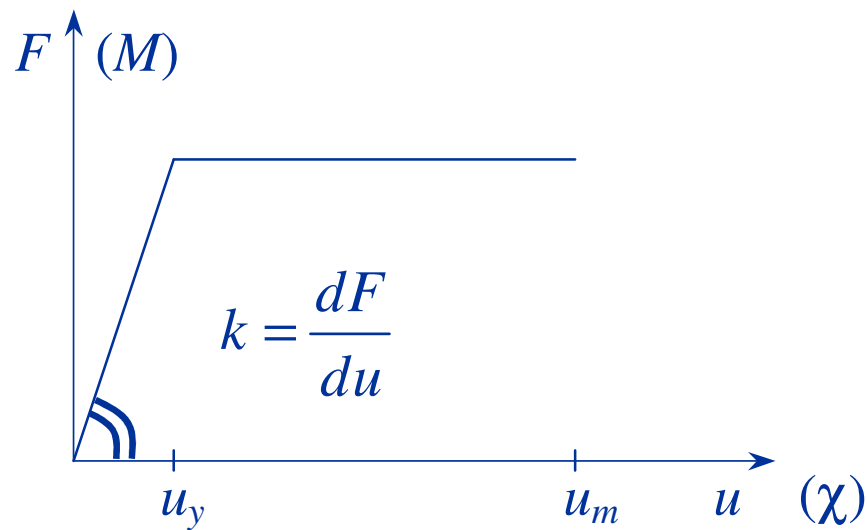


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

# Comportamento oltre il limite elastico

## Legame elastico-perfettamente plastico



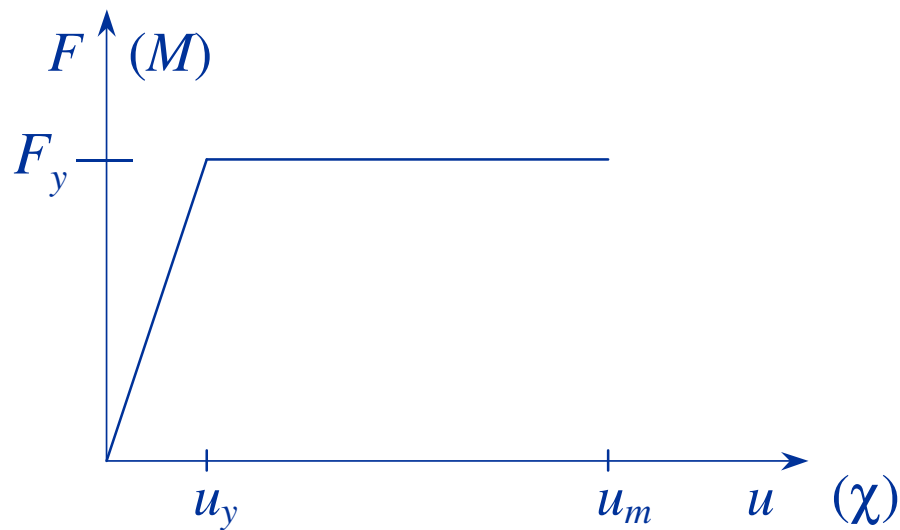
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

# Comportamento oltre il limite elastico

## Legame elastico-perfettamente plastico



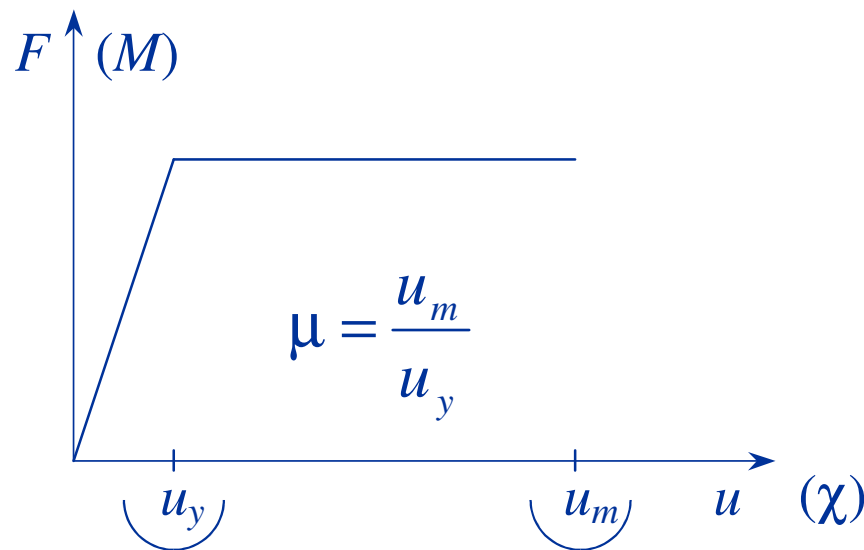
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

# Comportamento oltre il limite elastico

## Legame elastico-perfettamente plastico



È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

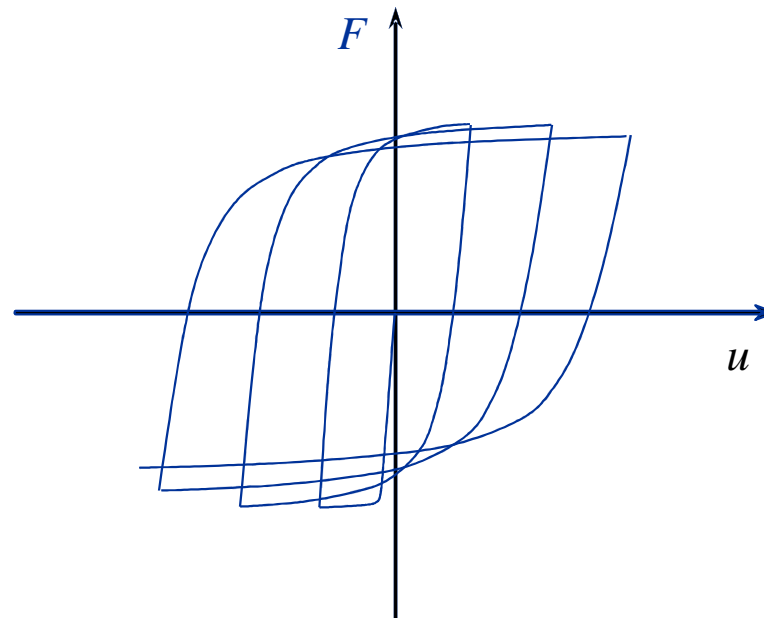
- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente



# Comportamento oltre il limite elastico

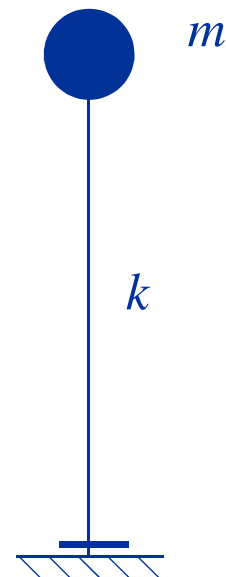
Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

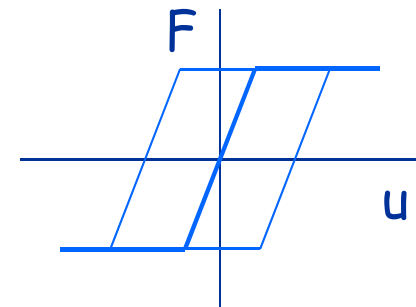


Foto

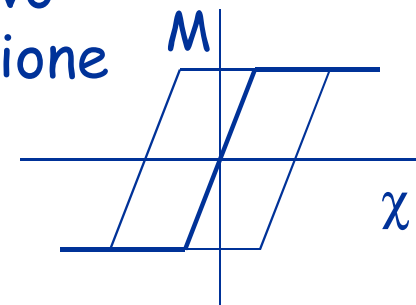


Modello  
di calcolo

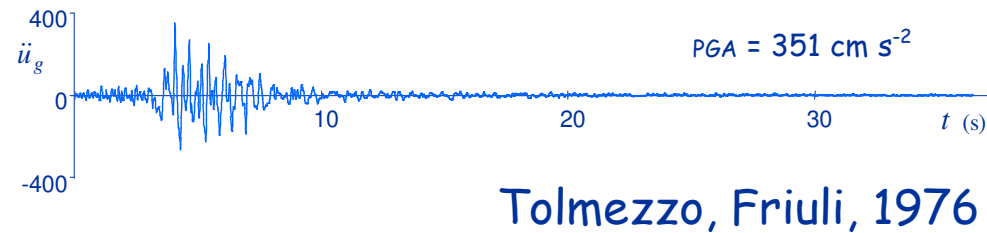
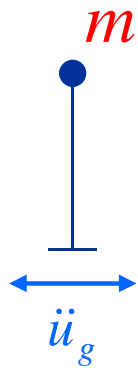
Legame costitutivo  
della struttura



Legame  
costitutivo  
della sezione



# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico



È possibile  
determinare  
numericamente  
la risposta ad un  
accelerogramma

Noti i valori di  $u, \dot{u}, \ddot{u}$  in un certo  
istante  $t_1$  ed il valore di  $\ddot{u}_g$  tra  $t_1$  e  
 $t_1 + \Delta t$  si possono ricavare i valori di  
 $u, \dot{u}, \ddot{u}$  nell'istante  $t_1 + \Delta t$

Si tiene conto della rigidezza in quel  
 $\Delta t$  (pari a  $k$  oppure nulla)

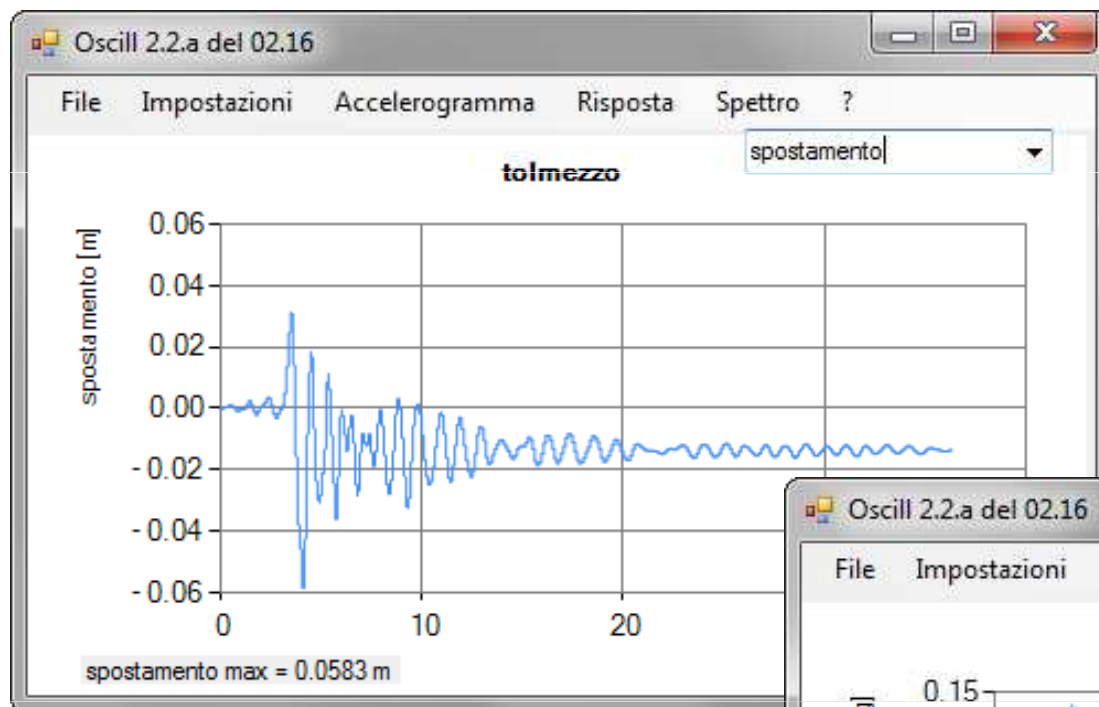
Si ottiene la risposta nel tempo (time history)

# Determinazione della time history

## Metodo di Newmark

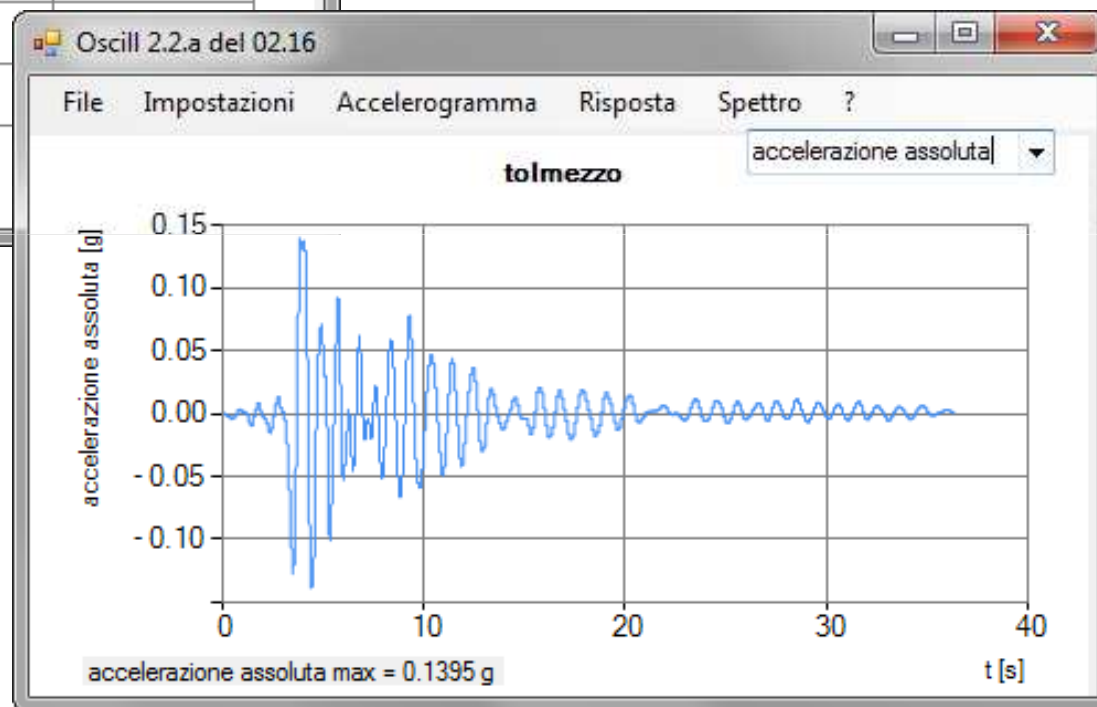
- Analoga a quanto visto per oscillatore lineare
- Nell'equazione di equilibrio dinamico la forza di richiamo  $f_s$  non è elastica, quindi non è proporzionale allo spostamento  $u$
- L'equazione di equilibrio dinamico è
$$m \Delta \ddot{u} + c \Delta \dot{u} + \Delta f_s = -m \Delta \ddot{u}_g$$
- La si deve risolvere con procedimento iterativo, perché  $f_{s,2}$  è legata a  $u_2$  in maniera non lineare

# Risposta sismica non lineare programma Oscill

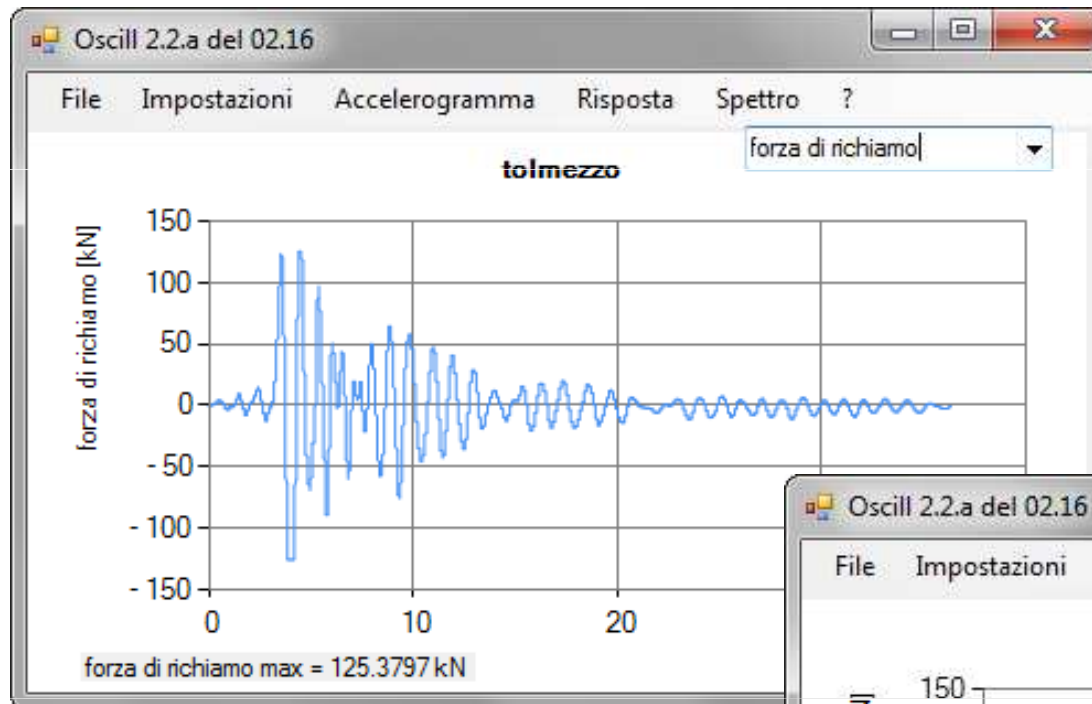


spostamento:  
rimane uno spostamento  
residuo al termine del  
sisma

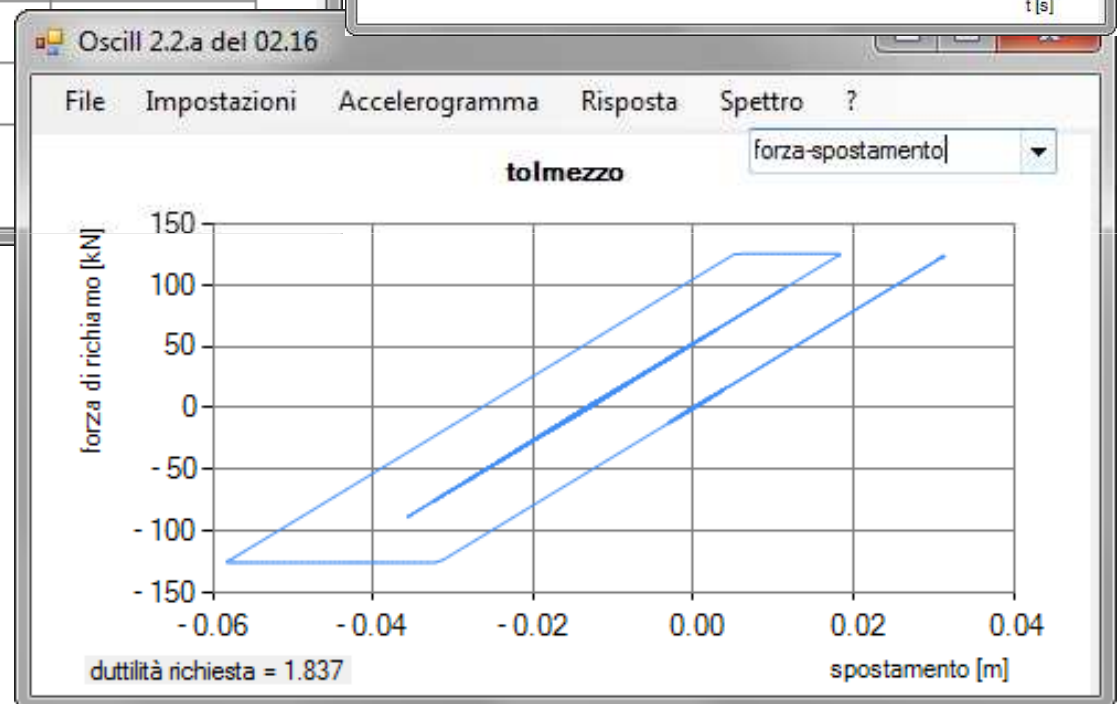
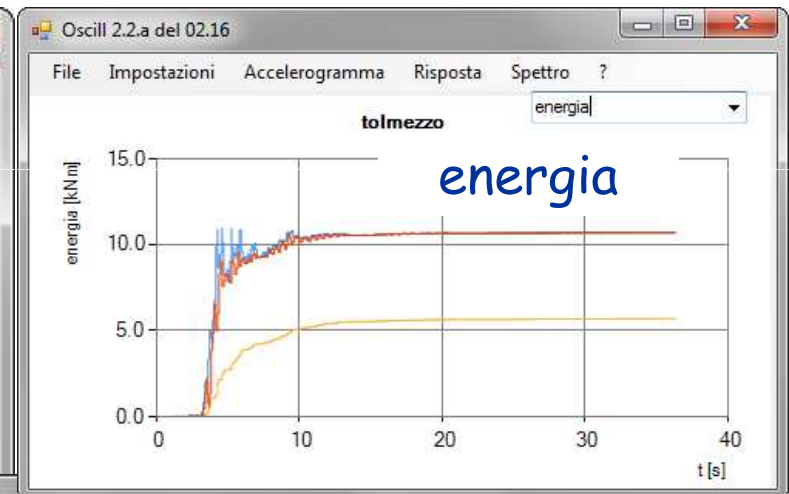
accelerazione



# Risposta sismica non lineare programma Oscill



forza di richiamo:  
non supera il valore di  
resistenza assegnato

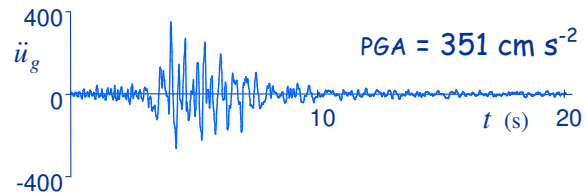


legame forza-spostamento

# Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

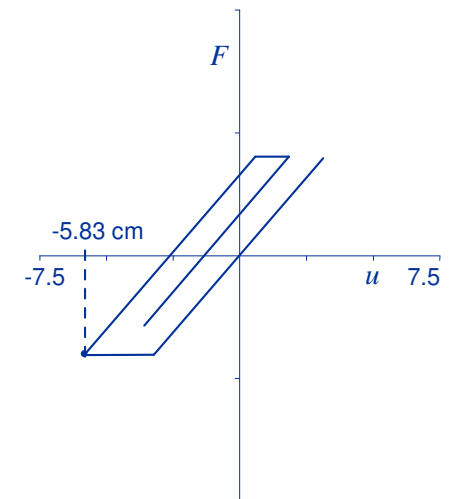
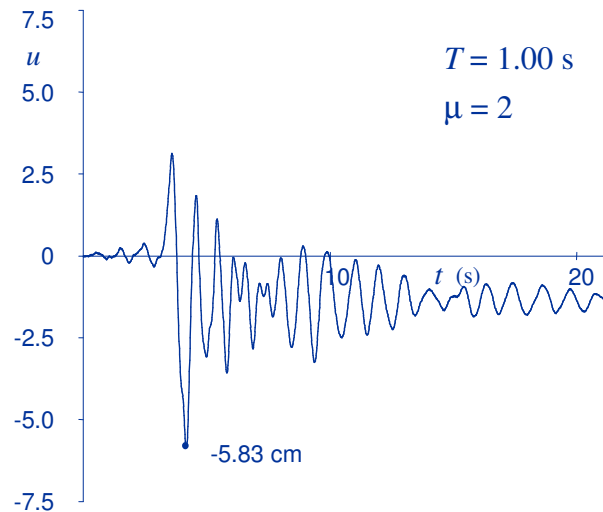
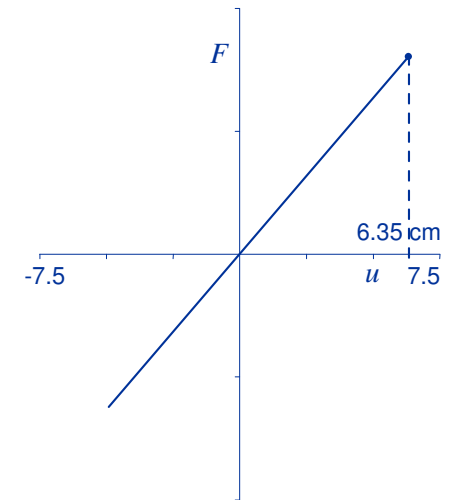
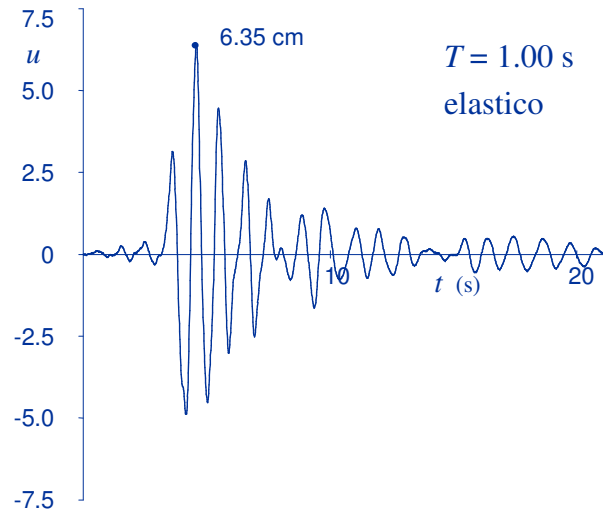
Risposta  
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta  
elasto-plastica

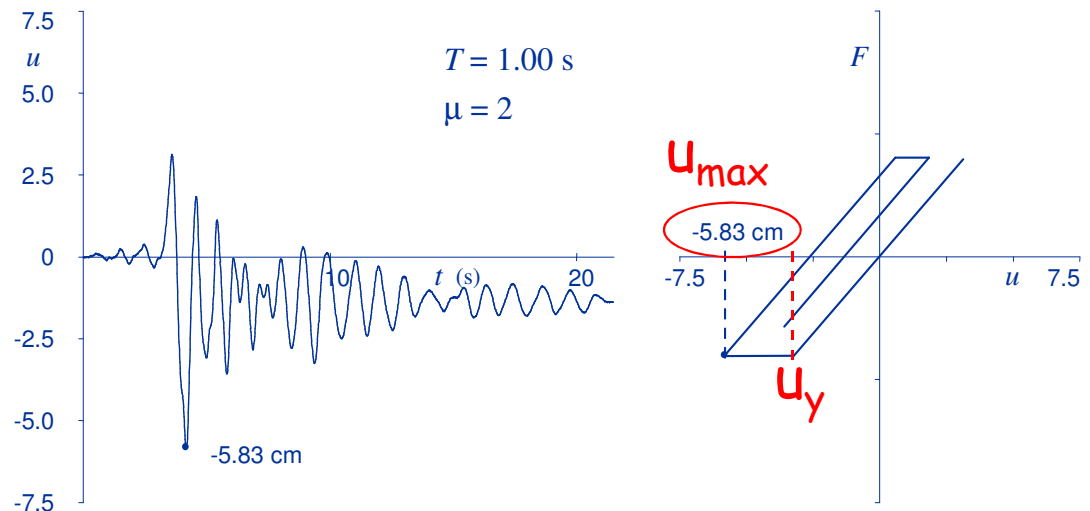


# Richiesta di duttilità

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,  
tanto minore è la  
resistenza  
tanto maggiore è la  
richiesta di duttilità

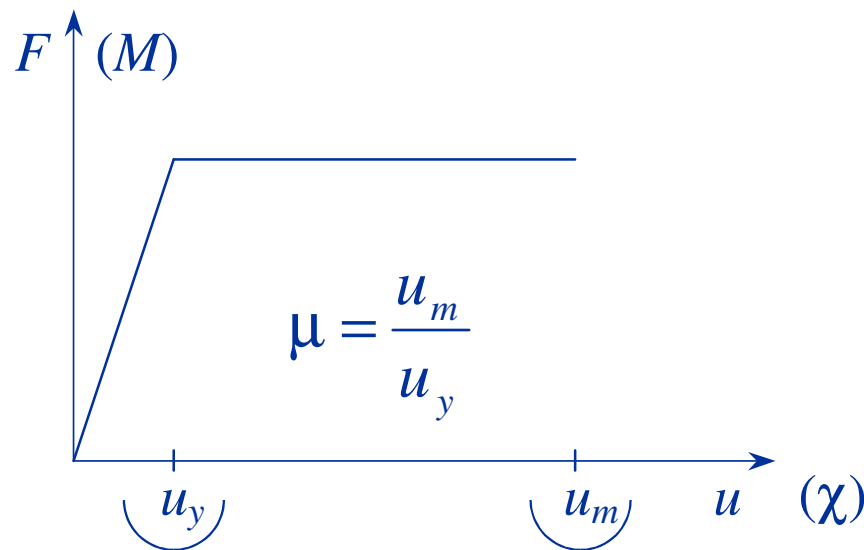
Risposta  
elasto-plastica





# Duttilità disponibile

Legame elastico-perfettamente plastico



La duttilità che una sezione possiede può essere indicata come **duttilità disponibile**

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

# Progettazione di strutture elasto-plastiche

- Una struttura dovrebbe essere progettata con forze elevate se la si vuole mantenere in campo elastico
- Una struttura progettata con forze minori va in campo plastico, ma può superare il terremoto se la duttilità disponibile delle singole sezioni è maggiore della richiesta di duttilità
- Per giudicare se la struttura, pur andando in campo plastico, è in grado di superare il terremoto occorre esprimere un giudizio sulla duttilità e quindi su deformazioni, spostamenti

Displacement based design

# Progettazione di strutture elasto-plastiche

- Una struttura dovrebbe essere progettata con forze elevate se la si vuole mantenere in campo elastico
- Una struttura progettata con forze minori va in campo plastico, ma può superare il terremoto se la duttilità disponibile delle singole sezioni è maggiore della richiesta di duttilità

Idea base della progettazione sismica:

- Progettare le strutture con forze più basse, facendo affidamento sulla duttilità

Force based design

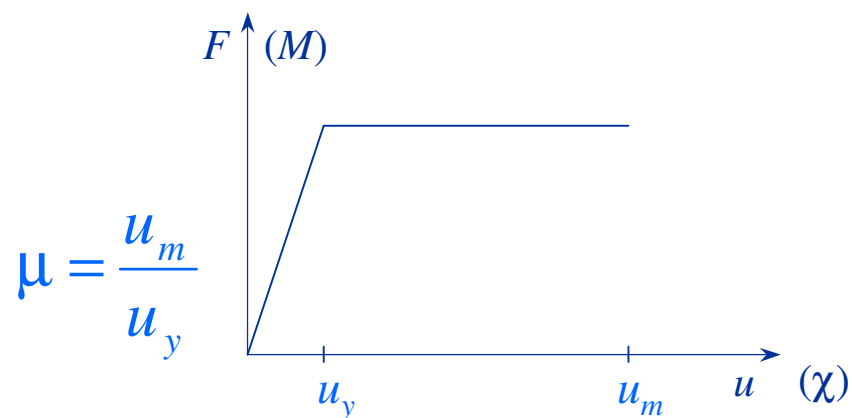
# Progettazione a duttilità assegnata

- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità prevista, può sopportare (in campo inelastico) il terremoto.

Force based design

# Progettazione a duttilità assegnata

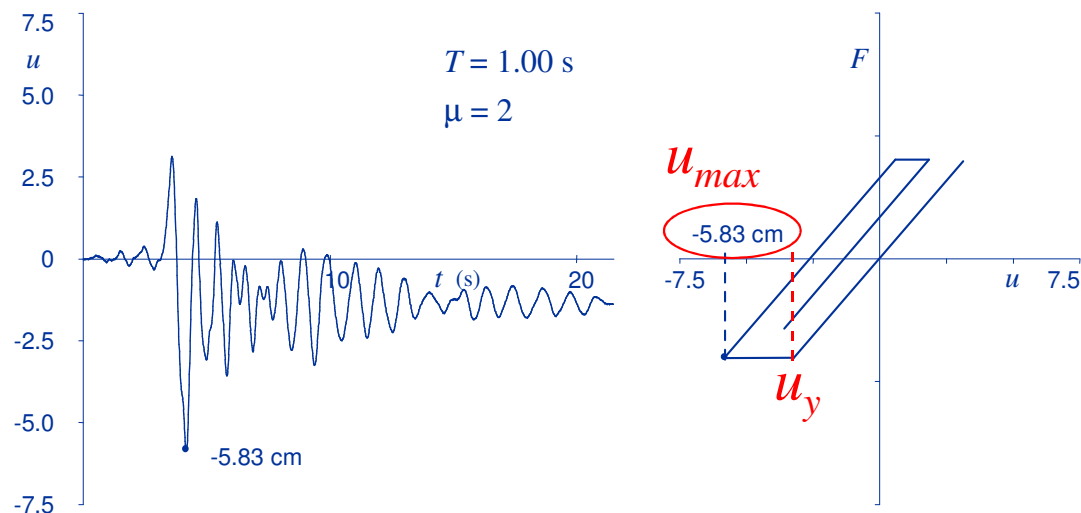
È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile



sia maggiore di  
quella richiesta

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

Risposta  
elasto-plastica



# Progettazione a duttilità assegnata

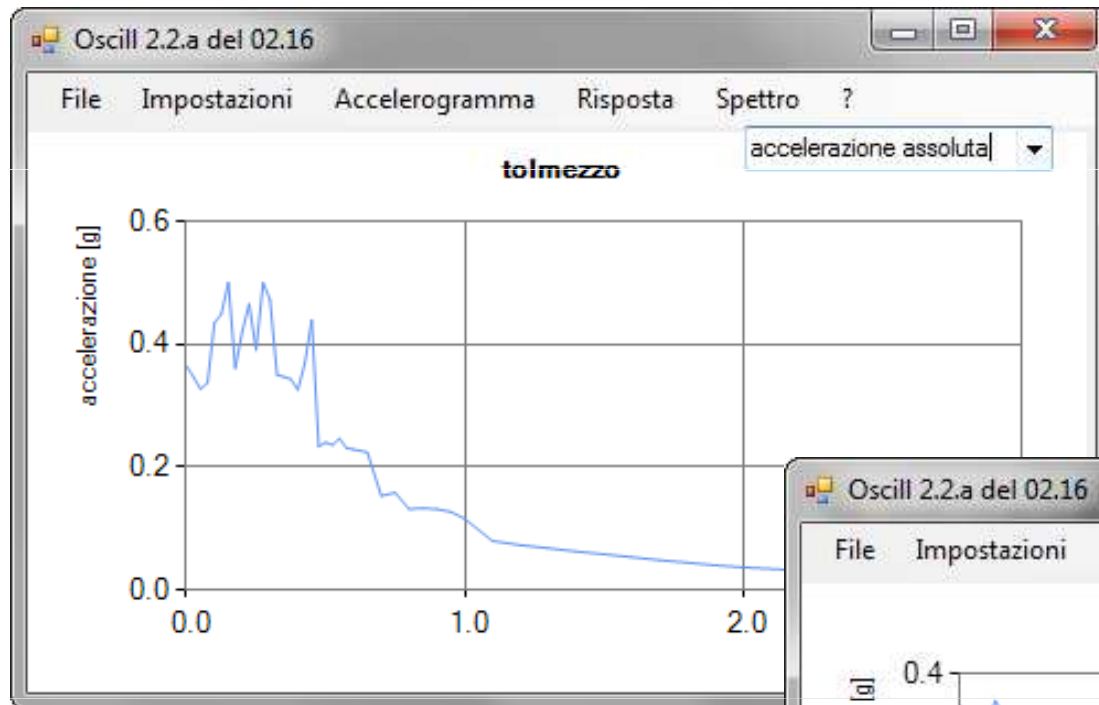
La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



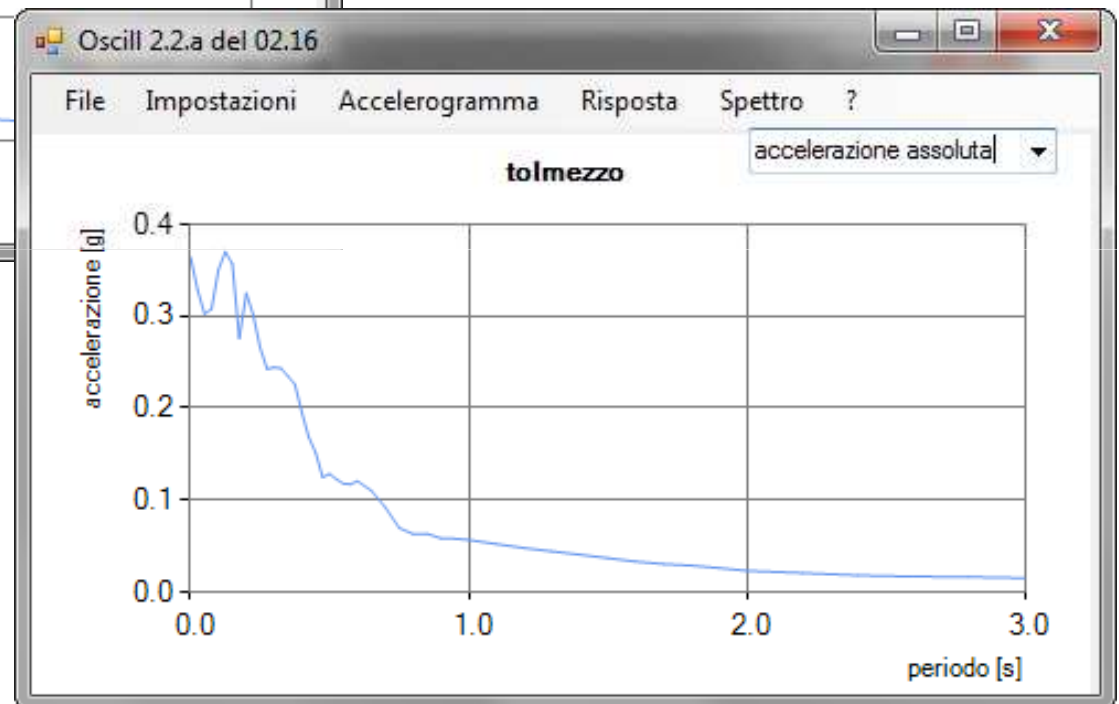
Ricordando che  $F = m a$ ,  
si può diagrammare in  
funzione del periodo  
l'accelerazione da usare  
nel progetto,  
per assegnati valori  
della duttilità  $\mu$

Spettro di risposta a duttilità assegnata

# Spettro di risposta a duttilità assegnata (programma Oscill)



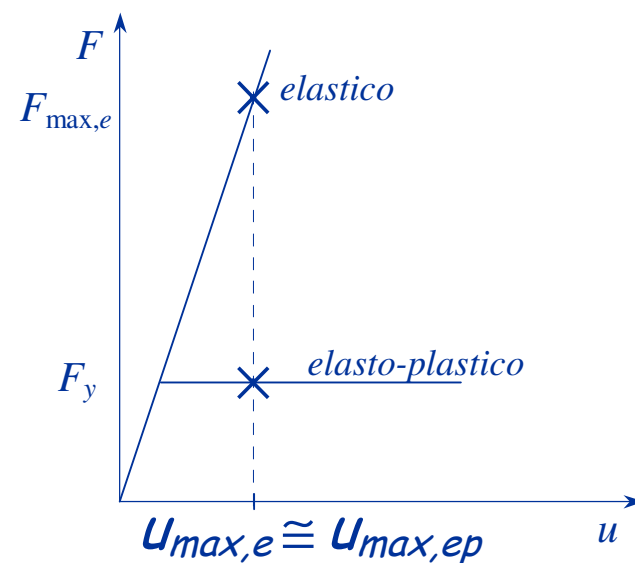
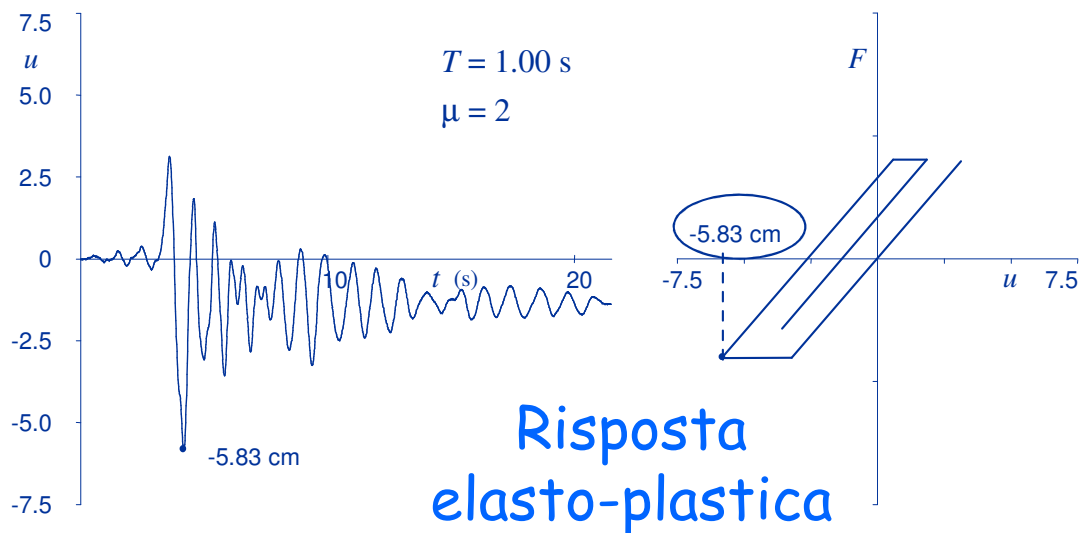
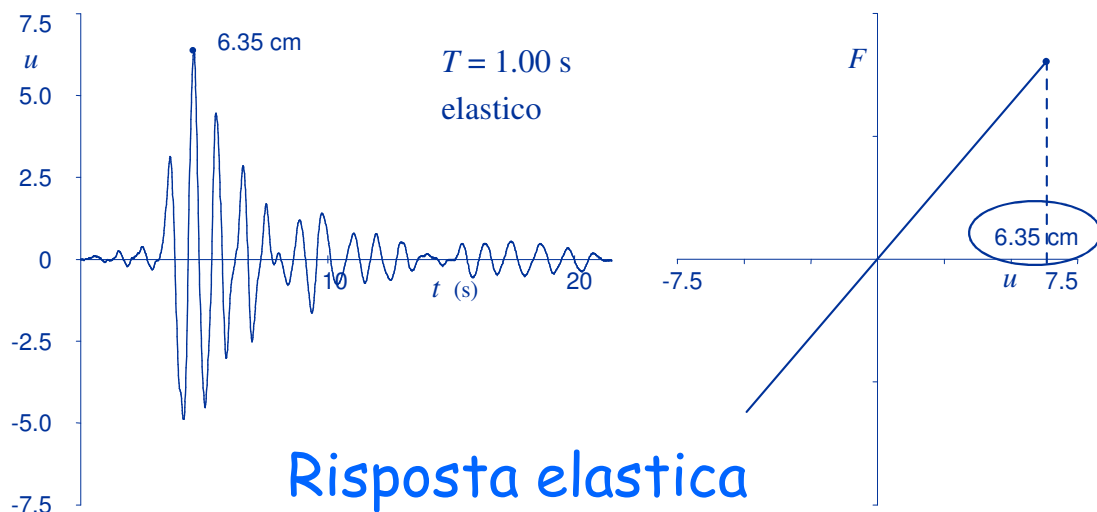
duttilità 2



duttilità 4

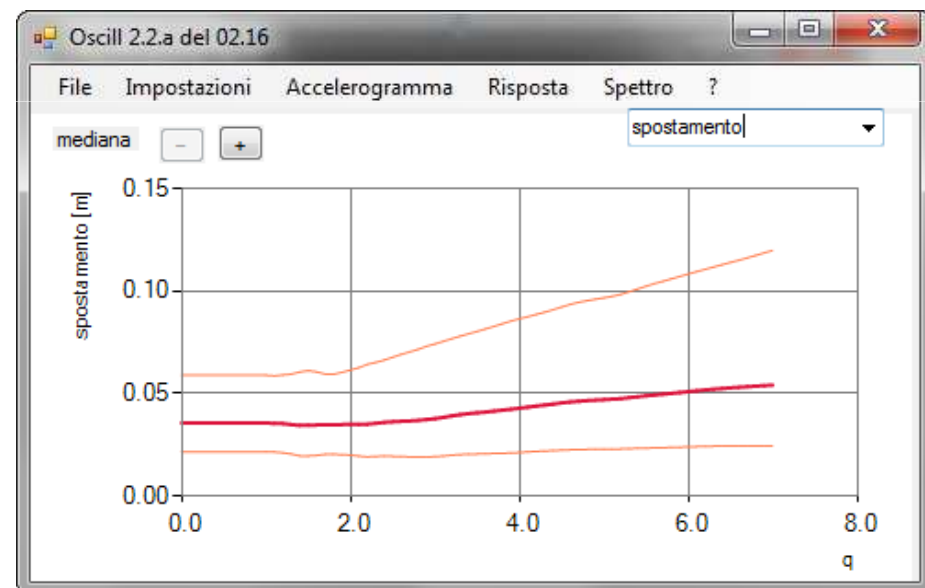
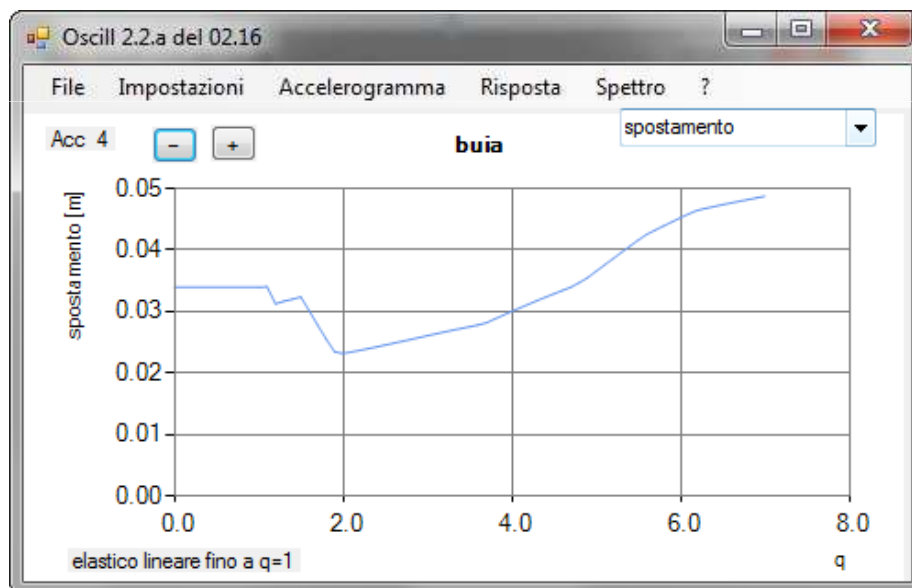
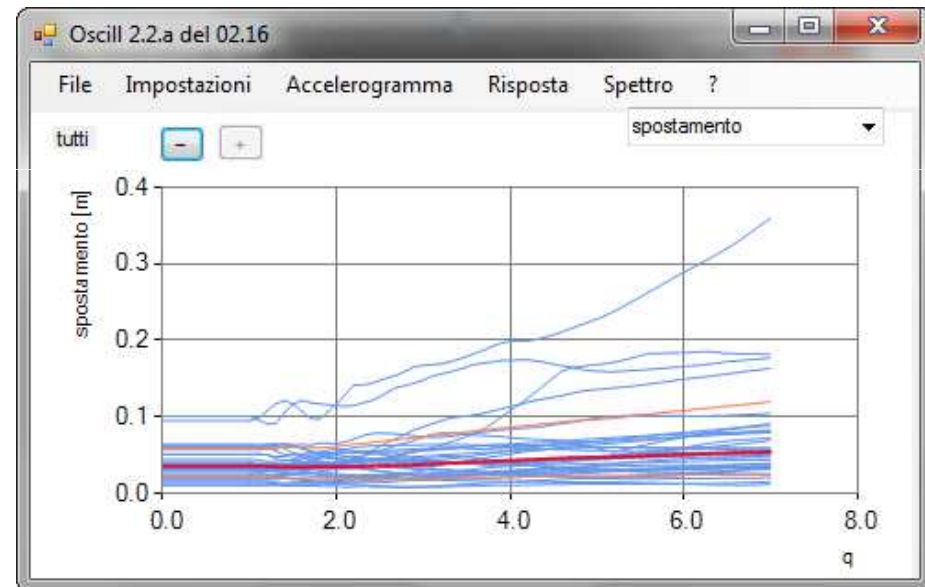
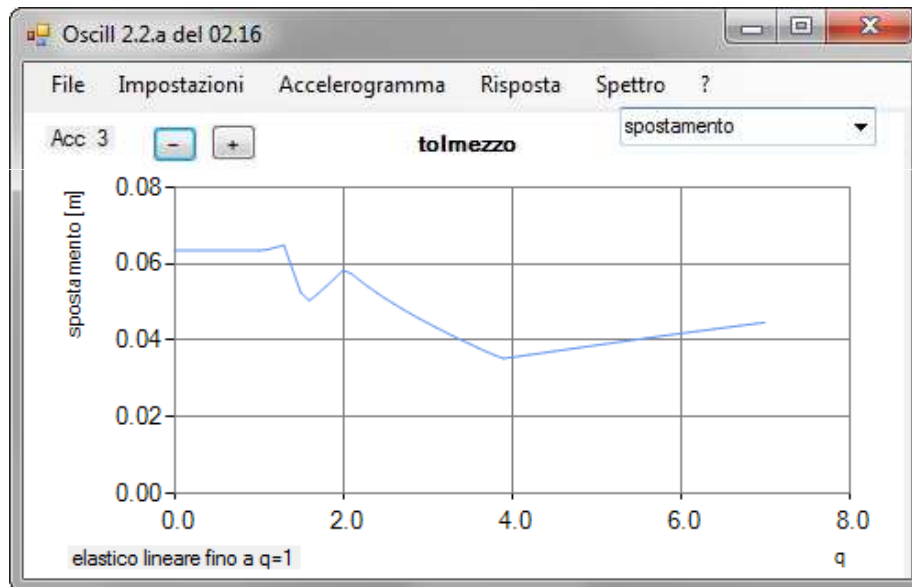
# Progettazione a duttilità assegnata

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





# Spostamento al variare della resistenza (programma Oscill)



# Progettazione a duttilità assegnata

La forza di progetto  
può essere ottenuta  
dividendo

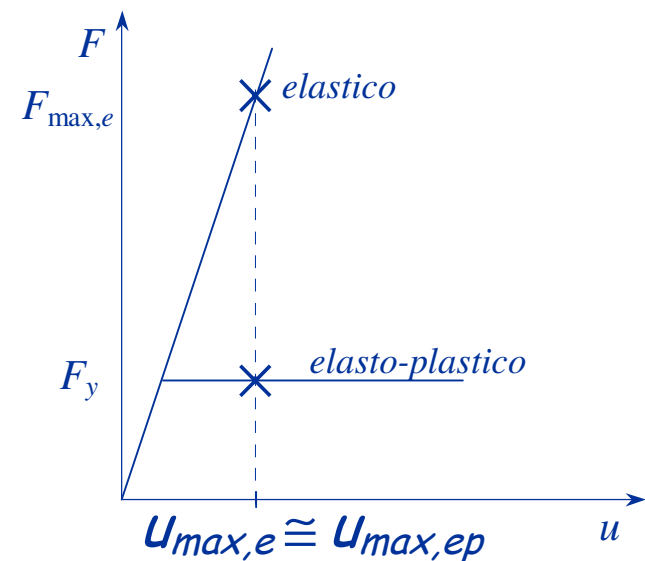
la forza necessaria  
per mantenere la  
struttura in campo  
elastico

per la duttilità

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

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

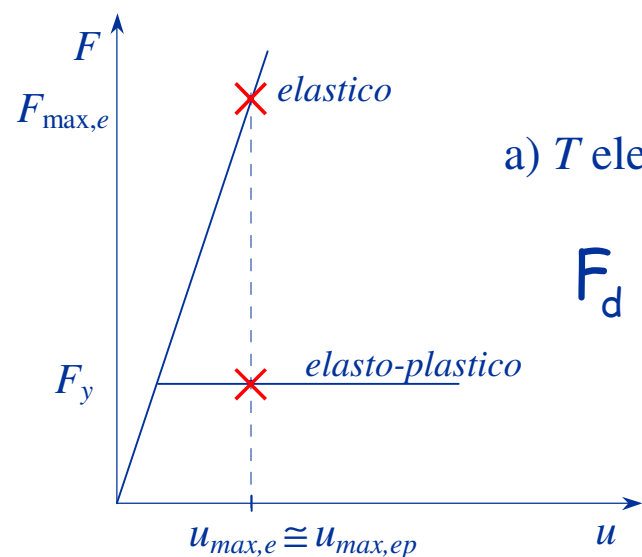
Le analisi numeriche  
mostrano che lo  
spostamento di  
schemi elastici ed  
elasto-plastici è più  
o meno lo stesso



# Progettazione a duttilità assegnata

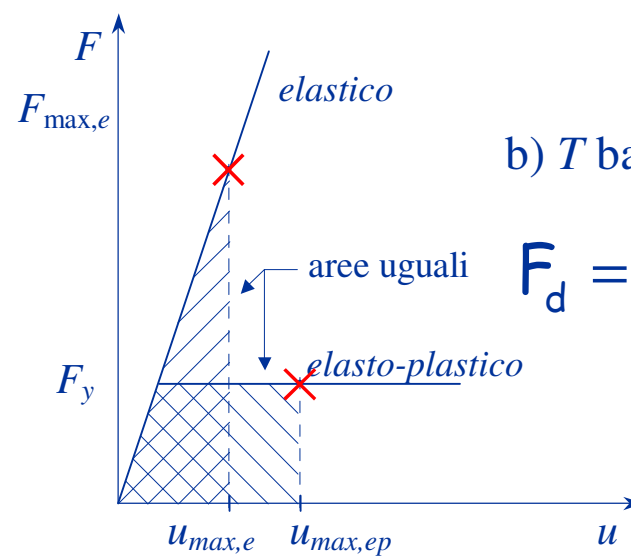
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo  
per strutture con periodo medio-alto

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

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

# Progettazione a duttilità assegnata

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

Le attuali normative indicano:

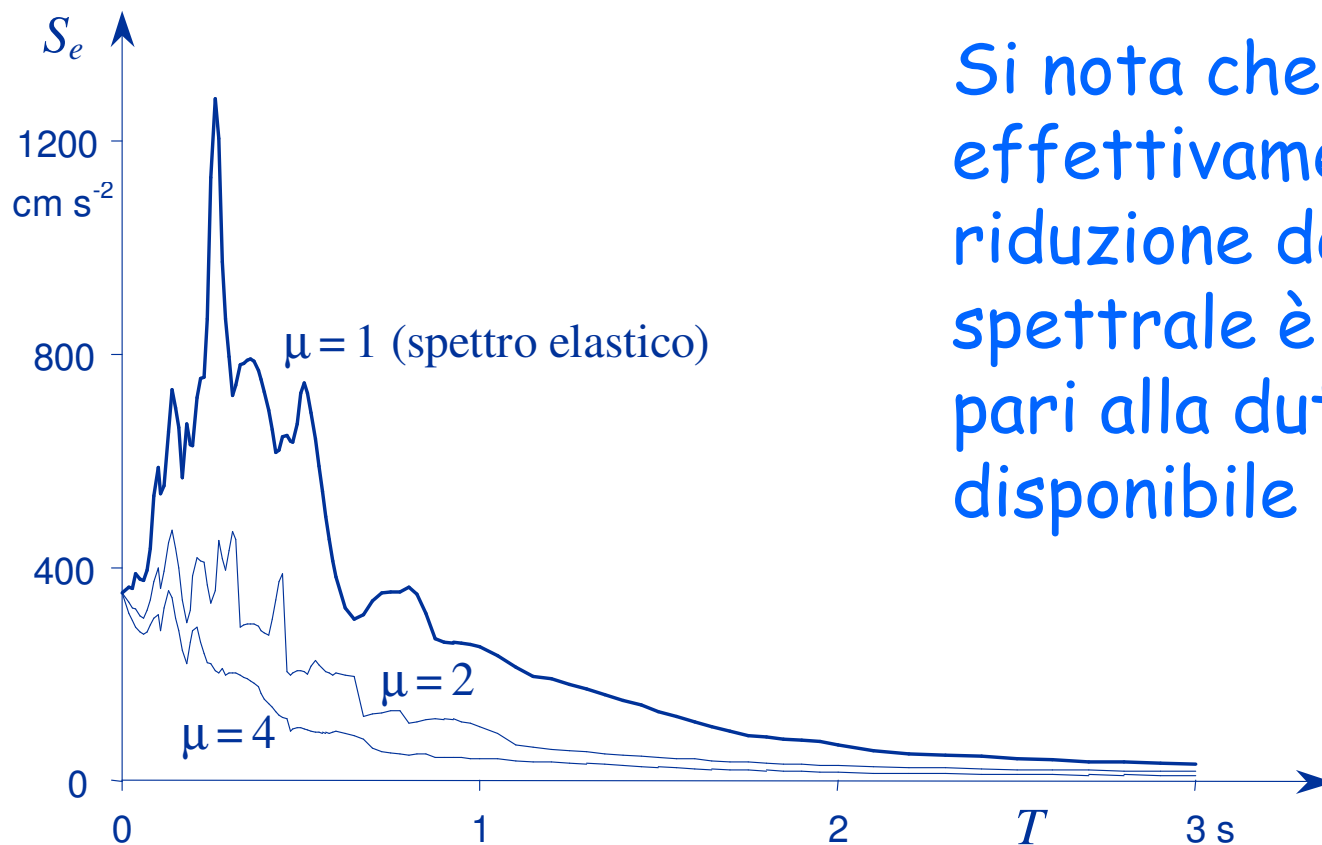
$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\mu} \quad \text{per } T_1 \geq T_c$$

$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{1 + (\mu - 1) T_1 / T_c} \quad \text{per } T_1 < T_c$$

Nota:  
queste espressioni  
sono in genere  
usate all'inverso,  
per ricavare  $\mu$

# Progettazione a duttilità assegnata

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

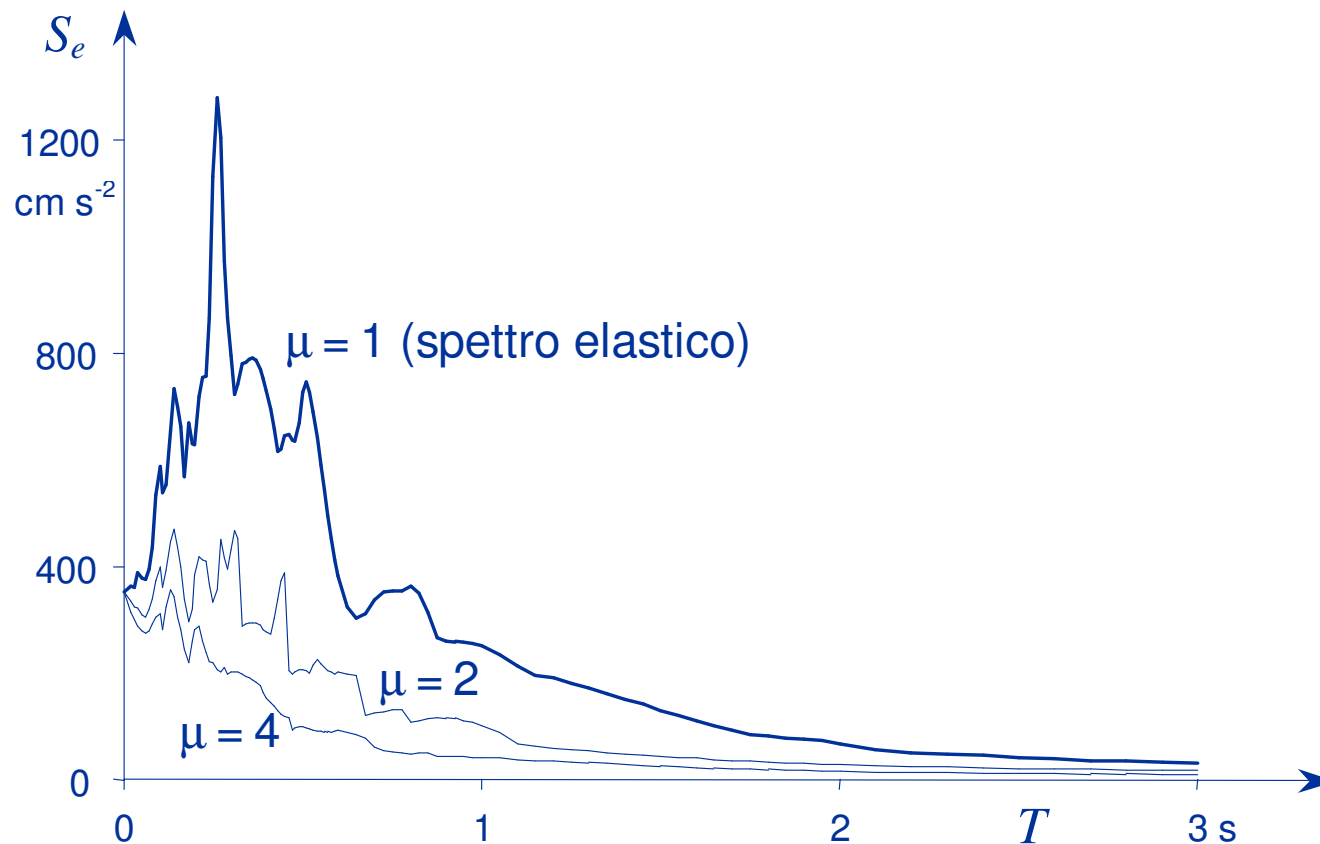


Si nota che  
effettivamente la  
riduzione dell'ordinata  
spettrale è, più o meno,  
pari alla duttilità  
disponibile

Spettro di risposta a duttilità assegnata

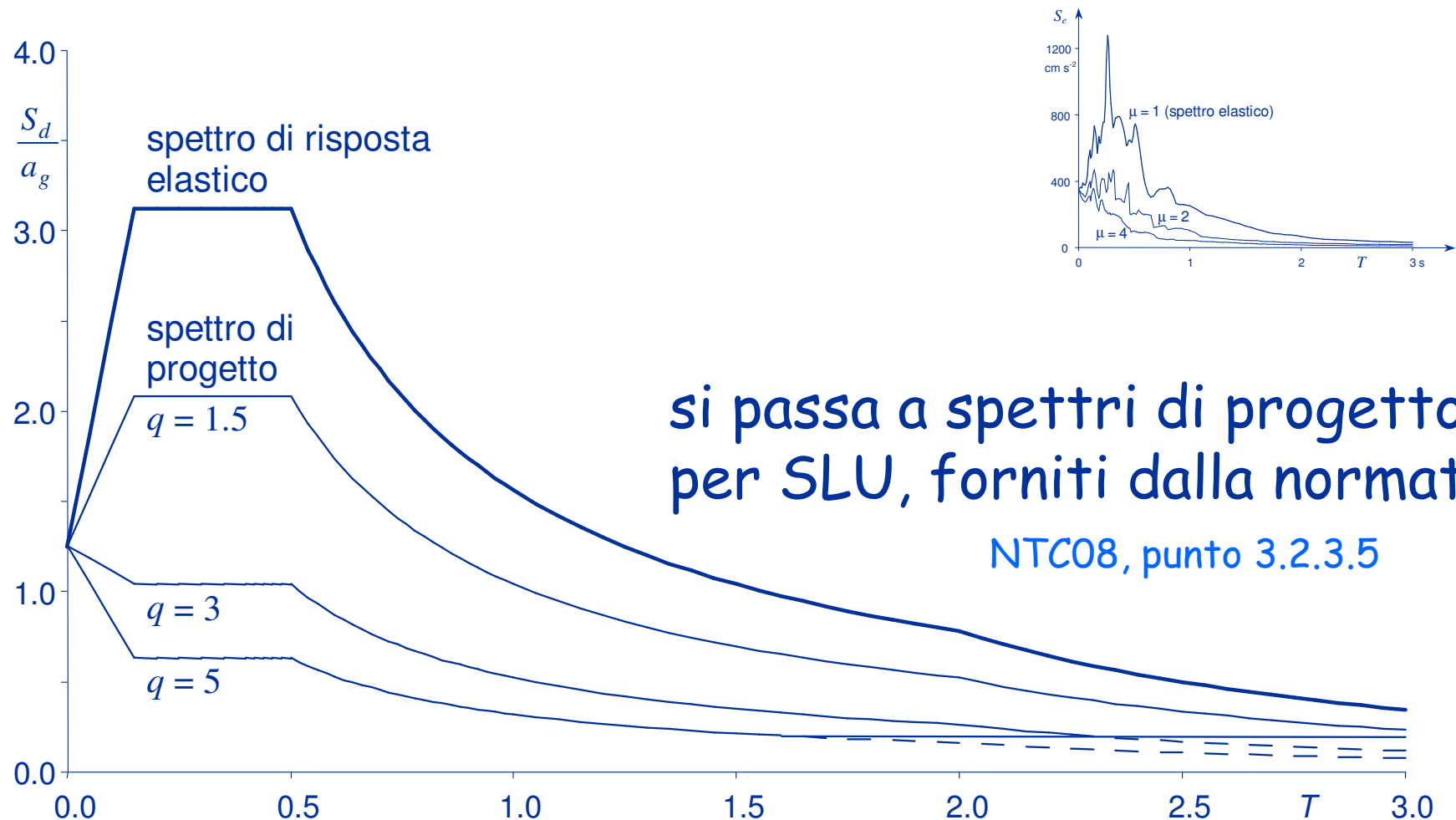
# Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



# Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



# In definitiva

- Massa, rigidezza (e smorzamento) caratterizzano il comportamento elastico, ma ovviamente incidono anche sul comportamento non lineare
- Resistenza e duttilità, insieme, consentono di superare indenni un sisma oltre il limite elastico
  - La struttura può avere una resistenza tale da rimanere in campo elastico (ma spesso costa troppo)
  - La struttura può avere una resistenza minore e quindi danneggiarsi, ma supererà l'evento sismico se ha una adeguata duttilità (ma anche questo ha un costo)
  - Si deve scegliere se puntare più sulla resistenza o più sulla duttilità



# Progetto delle strutture

## a) basarsi sulle forze

- Decidere quanto si vuol fare affidamento sulla duttilità e in base a questo scegliere le forze di progetto
- Dimensionare la struttura in modo che sopporti queste forze (progetto della **resistenza**)
- Controllare, anche solo qualitativamente o col rispetto di regole predefinite, che la struttura abbia la duttilità necessaria

Questo è il criterio normalmente seguito

# Progetto delle strutture

## b) basarsi sugli spostamenti

- Valutare gli spostamenti che la struttura dovrà subire durante il terremoto
- Progettare gli elementi strutturali in modo da garantire che essi siano in grado di sopportare questi spostamenti (progetto della duttilità)
- Controllare che la struttura abbia comunque una resistenza tale da evitare danneggiamenti precoci

Questo è il cosiddetto “displacement based design”

# Verifica delle strutture

- Se si sono seguiti i criteri di progetto ed i relativi controlli sono soddisfatti, si può ritenere che la struttura sia in grado di sopportare l'evento sismico
- Se si ha a che fare con una struttura che non è stata progettata secondo i criteri citati (o che per qualche motivo non li soddisfa a pieno) occorre valutare il comportamento non lineare della struttura ed esprimere un giudizio sulla sua capacità deformativa ancor più che sulla sua resistenza