

Corso

Progetto di strutture in zona sismica

Catania

ottobre 2017 - gennaio 2018

10 - Risposta in campo plastico

26 ottobre 2017

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)

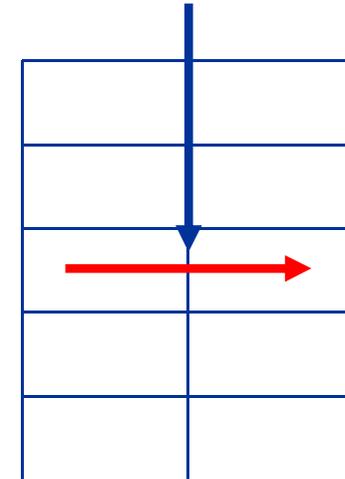
Per strutture con periodo medio-bassi si ha una notevole amplificazione dell'accelerazione, rispetto a quella del suolo (circa 2.5 volte)

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

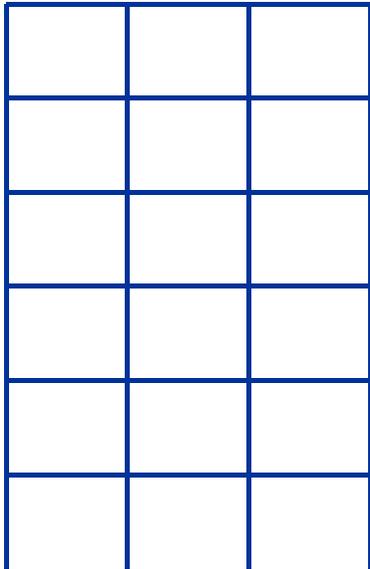
Le sollecitazioni provocate dalle azioni orizzontali sono molto forti



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

Occorre quindi studiare il comportamento delle strutture oltre il limite elastico

Comportamento oltre il limite elastico



Modello per i materiali



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

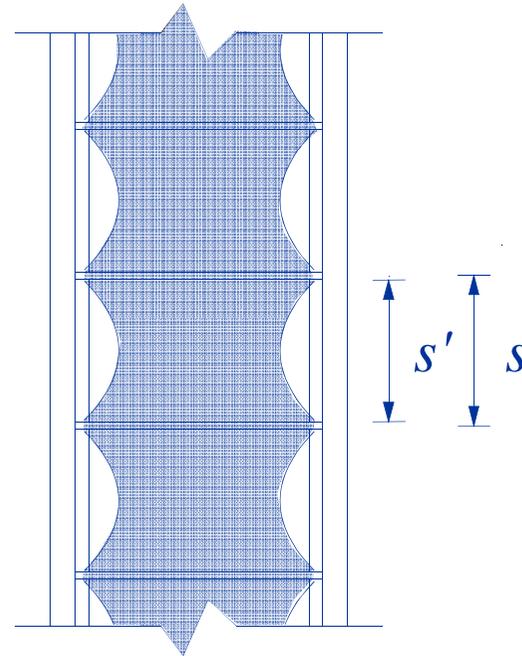
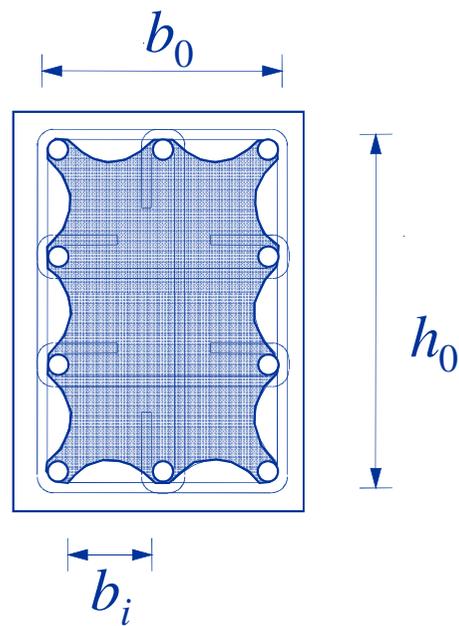
(a)

Comportamento delle sezioni
oltre il limite elastico

Modello per i materiali calcestruzzo

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Efficacia del confinamento



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

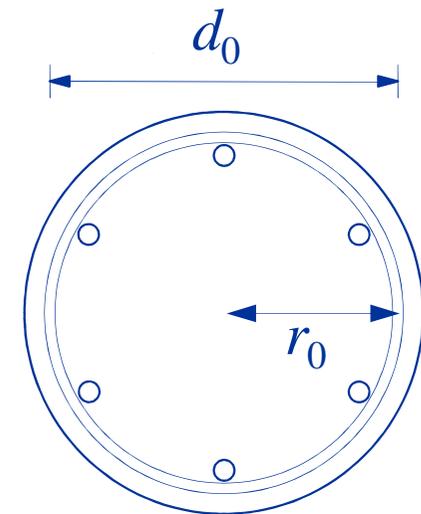
Staffe in una sezione circolare

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

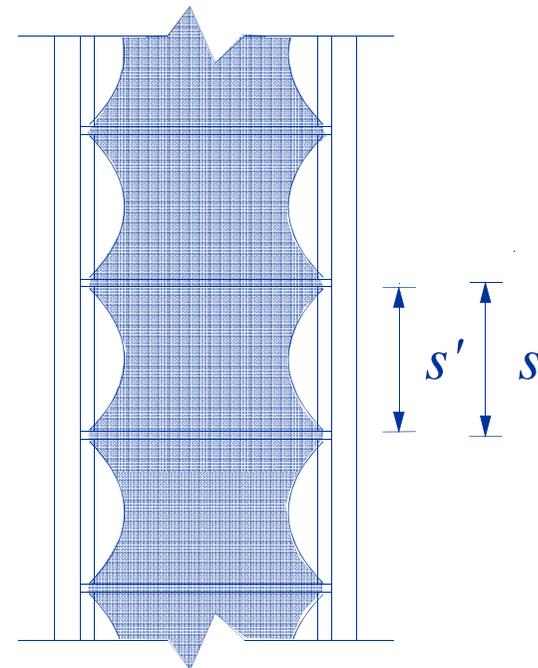
Efficacia del confinamento

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

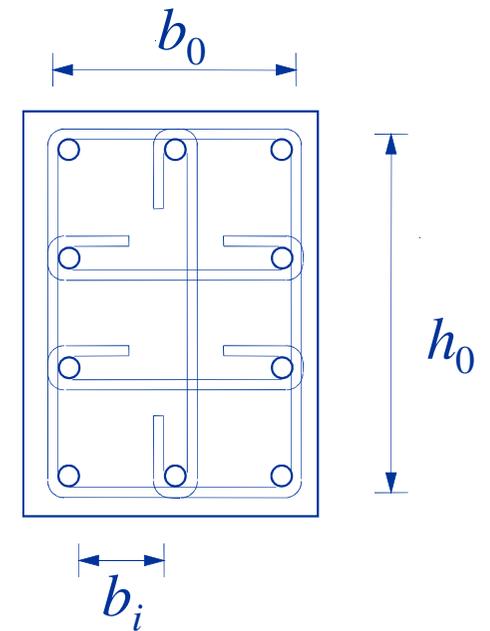
Staffe in una sezione rettangolare

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

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

con

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



Calcestruzzo

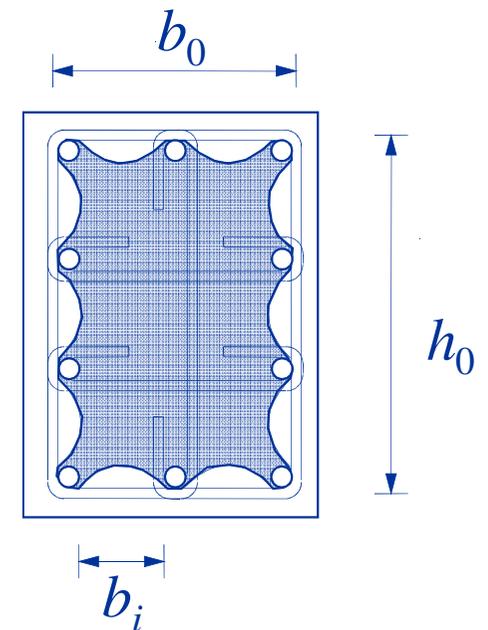
confinamento dovuto alle staffe

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

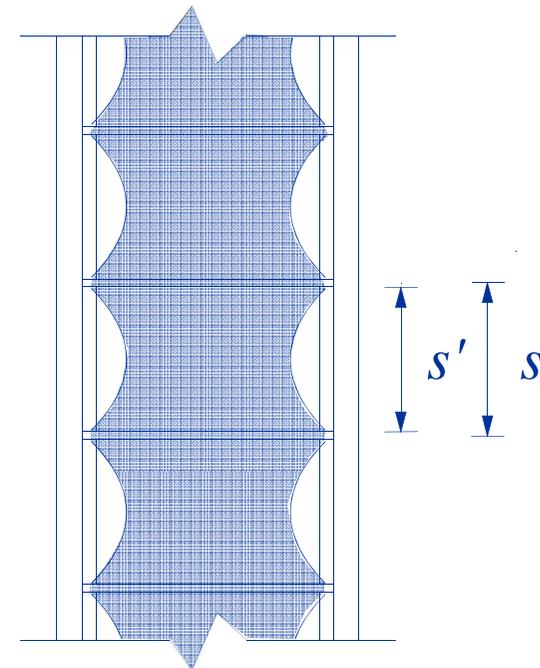
Efficacia del confinamento

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 $\alpha = \alpha_s \alpha_n$

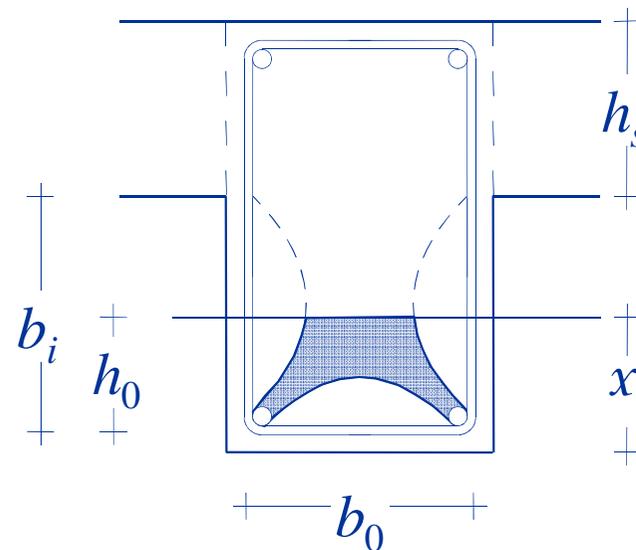
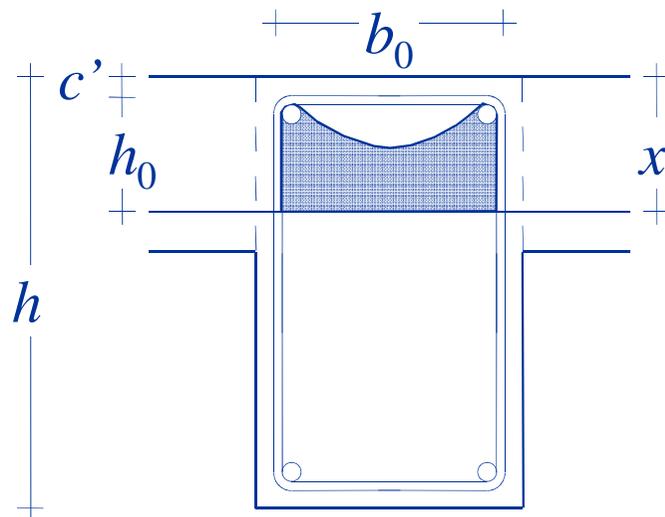


Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

Staffe in una trave a sezione rettangolare Efficacia del confinamento

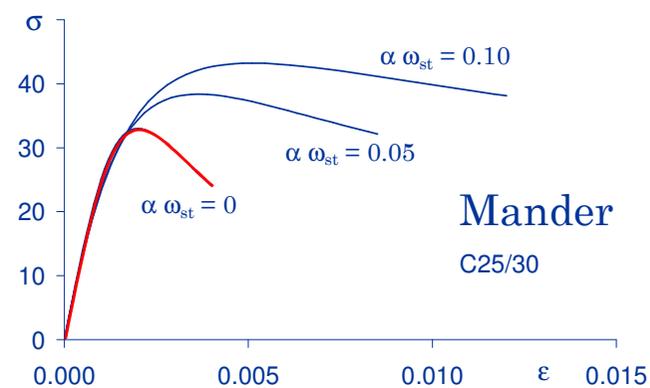
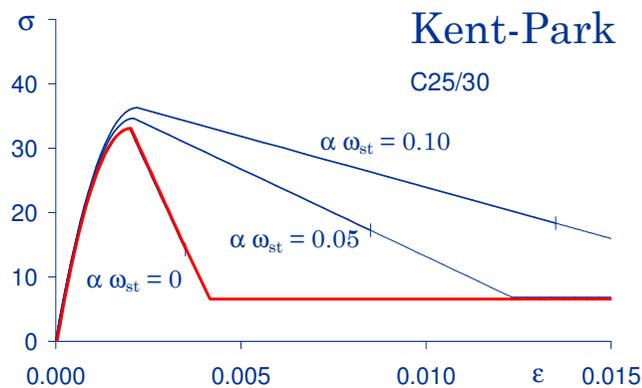
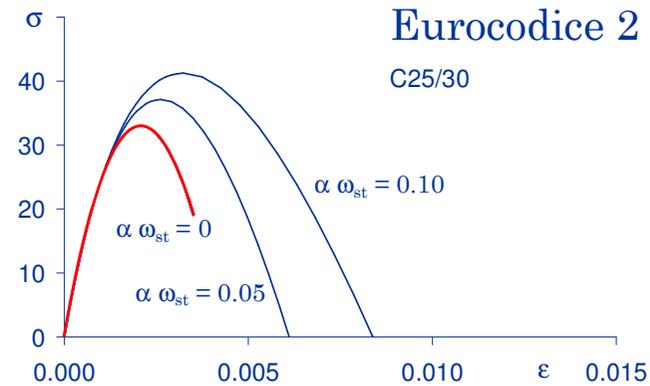
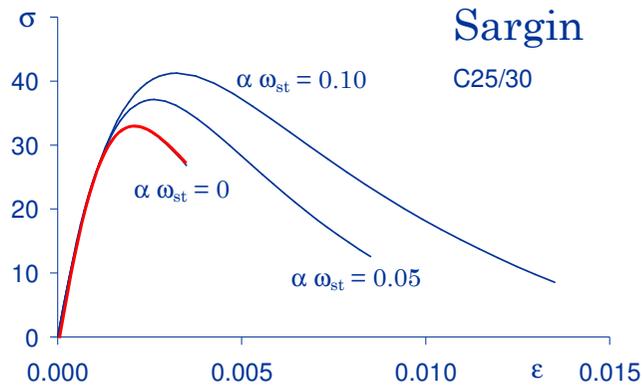
Nel valutare l'efficacia del confinamento bisogna tener conto di qual è la parte compressa e come viene confinata



Modello per i materiali calcestruzzo

Modelli:

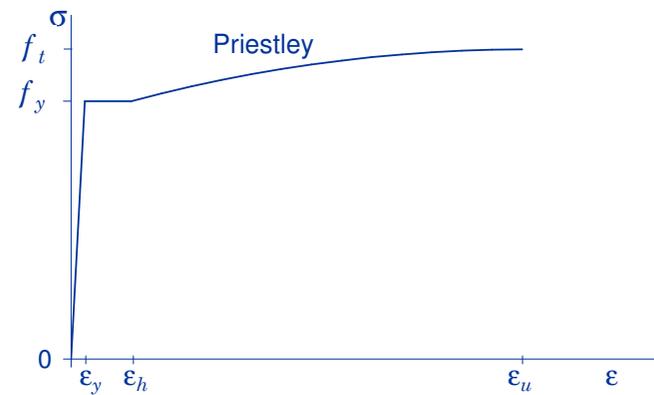
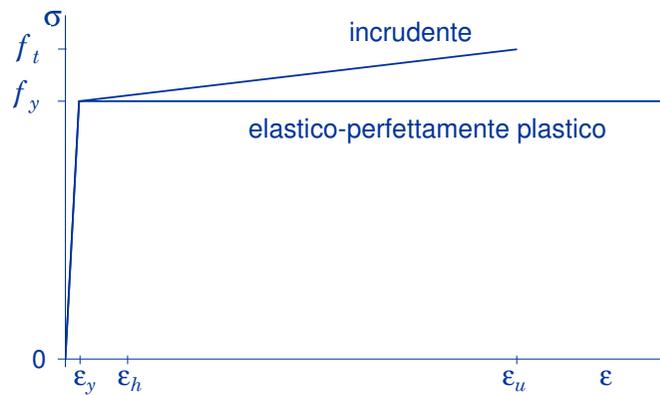
- Esistono numerose proposte, molto diverse



Modello per i materiali acciaio

Modelli:

- Esistono alcune proposte, leggermente diverse



Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

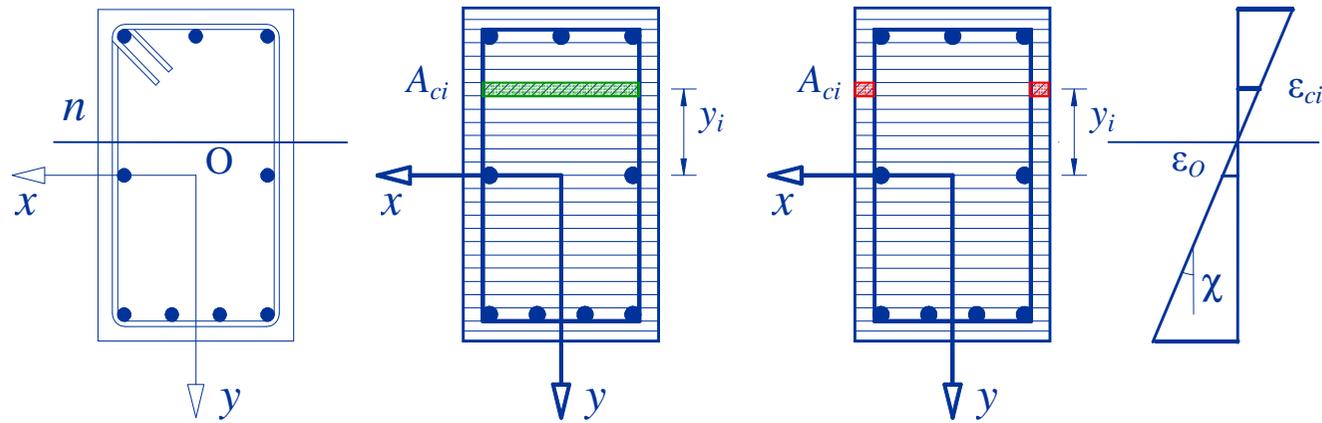
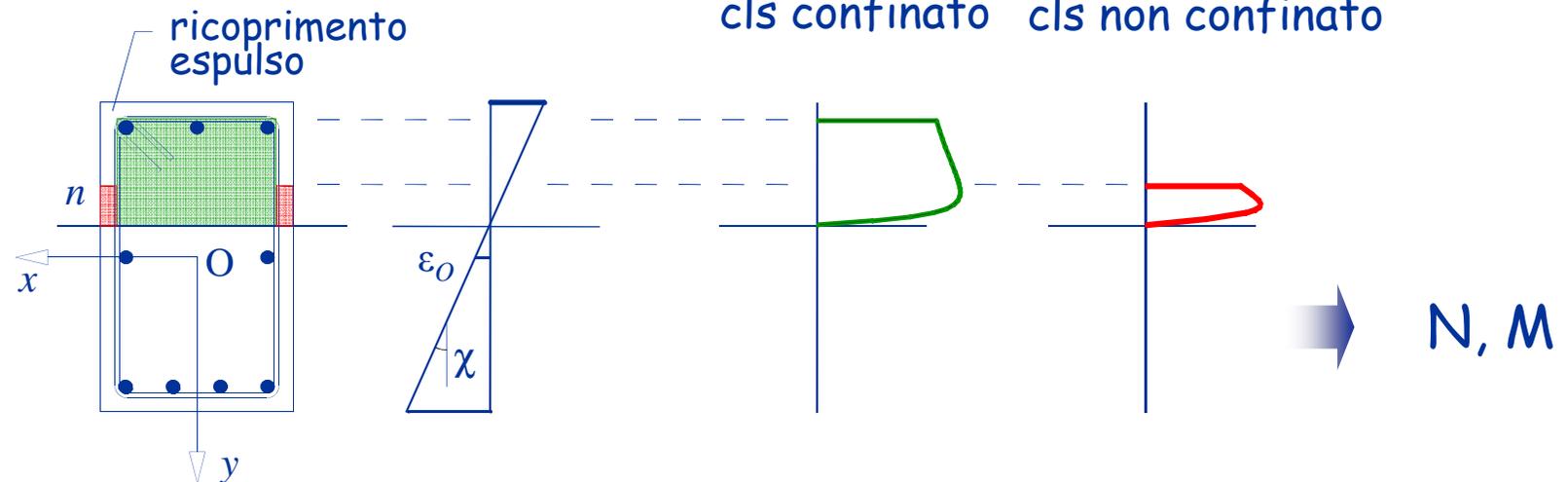


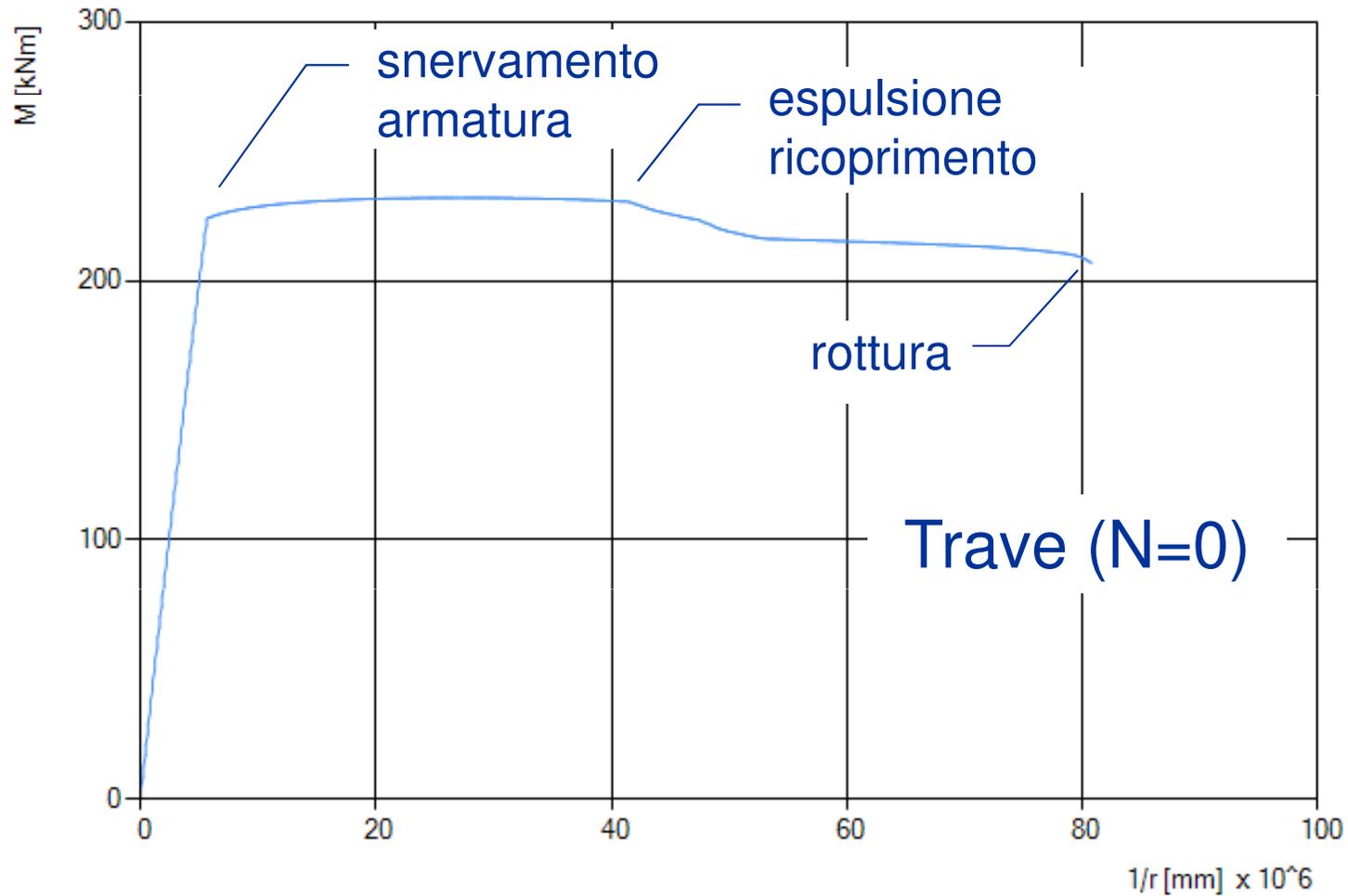
diagramma ϵ

diagramma σ
cls confinato

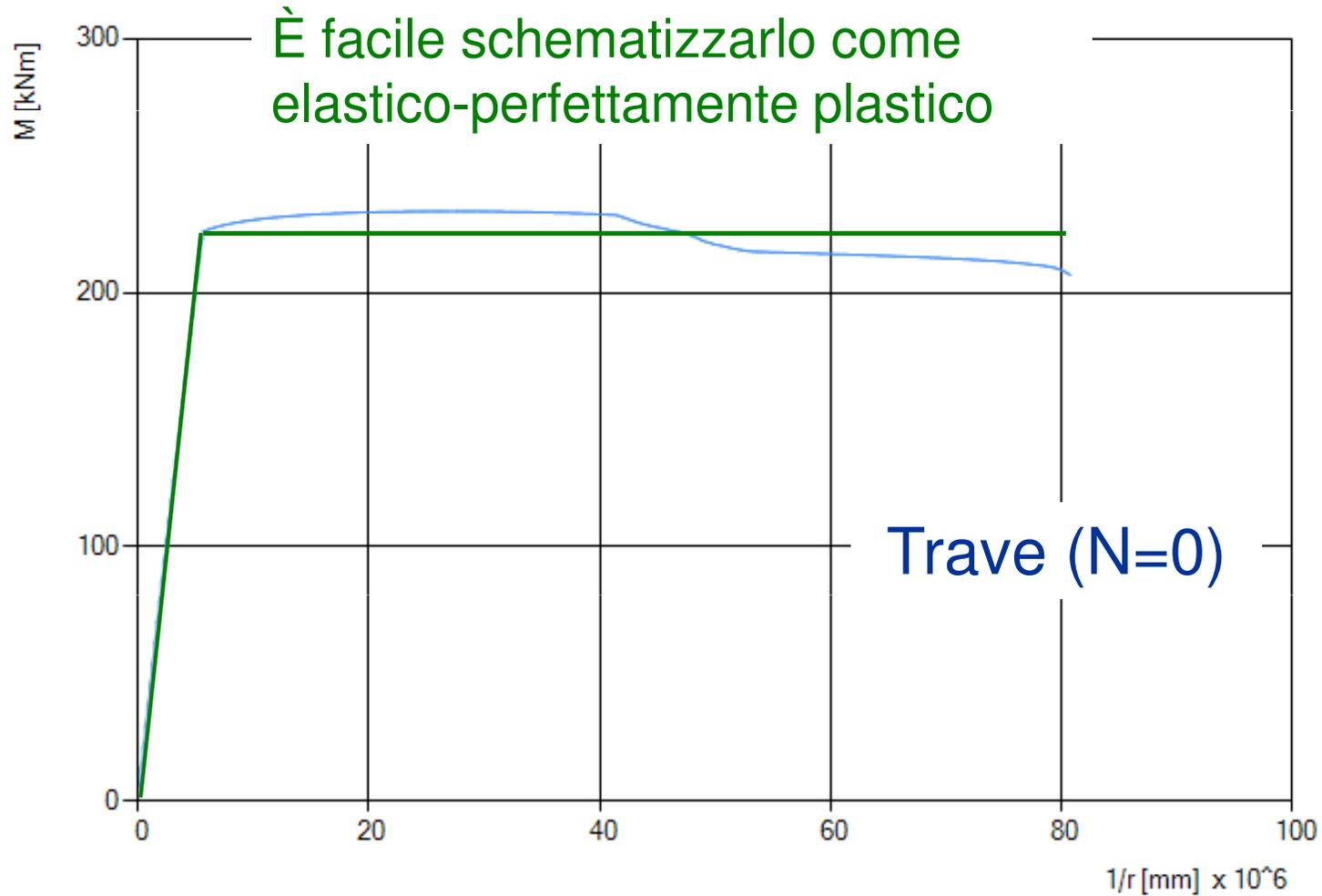
diagramma σ
cls non confinato



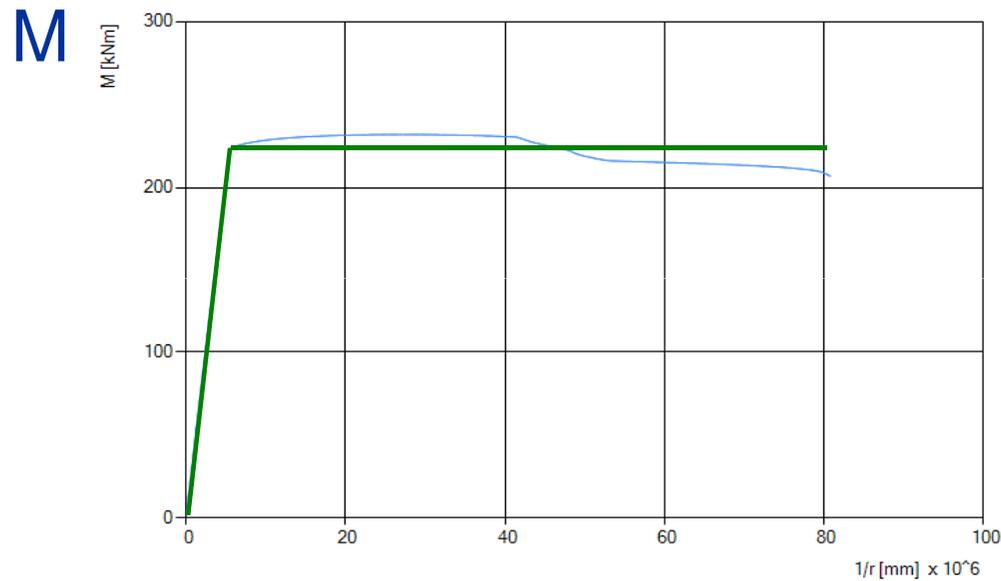
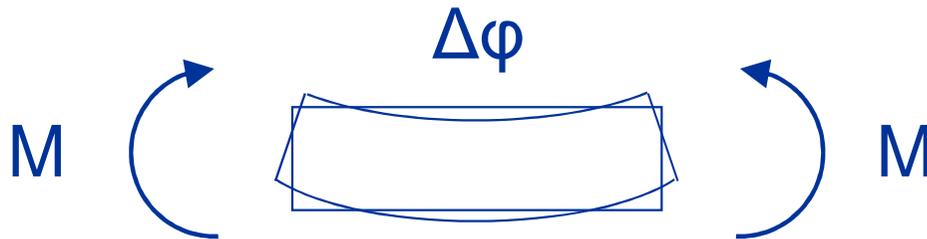
Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



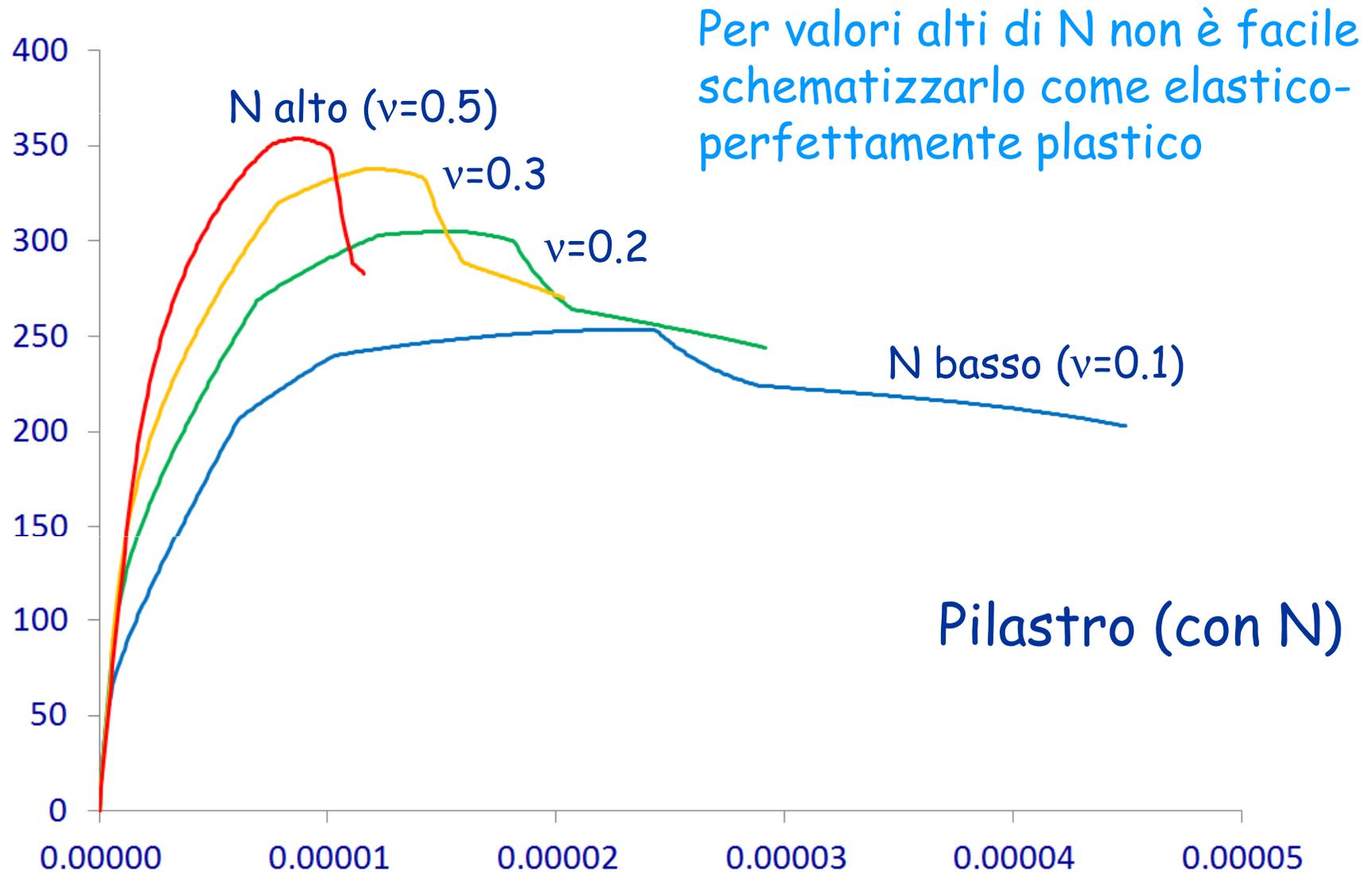
Cerniera plastica concio di trave



$$1/r \rightarrow \Delta\varphi$$

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

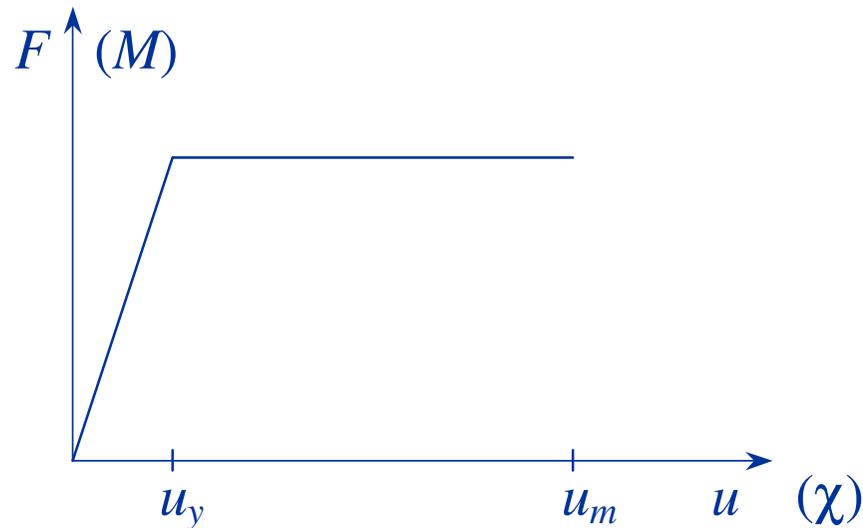
- È fornito il programma di installazione (cartella RC_NL-25a_setup): eseguire il file Setup per installare il programma
- È fornita una documentazione con istruzioni per l'uso e alcuni esempi (cartella RC_NL-25a_documentazione)

(b)

Risposta sismica non lineare
Schemi a un grado di libertà

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico

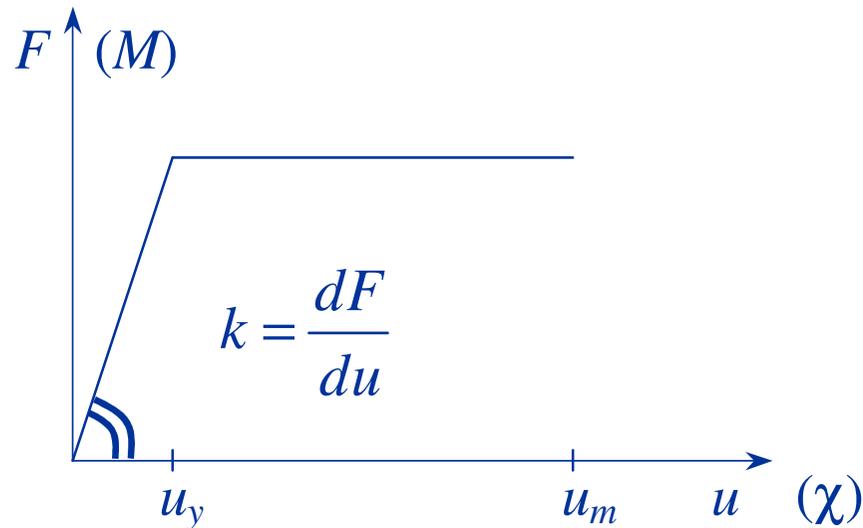


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



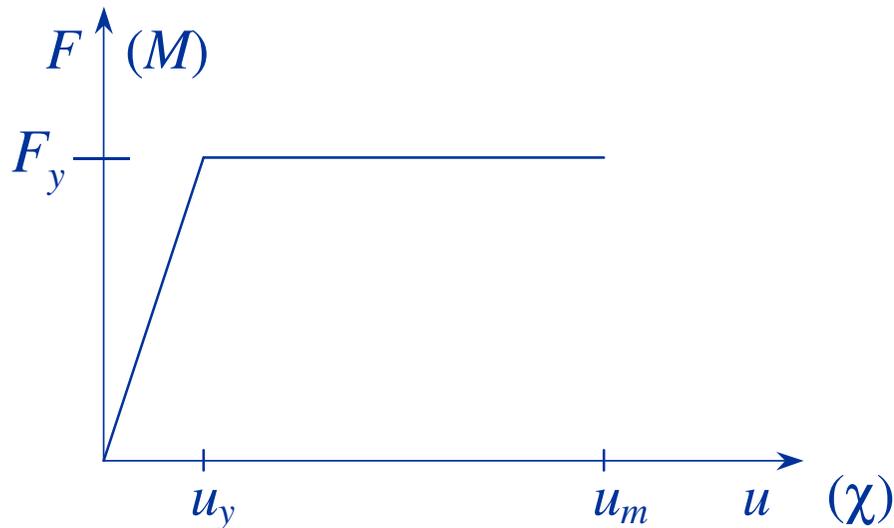
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



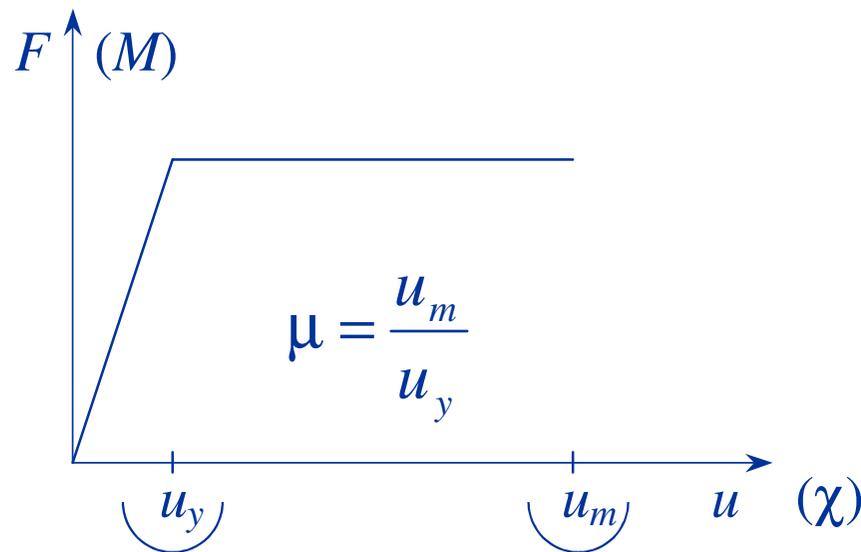
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



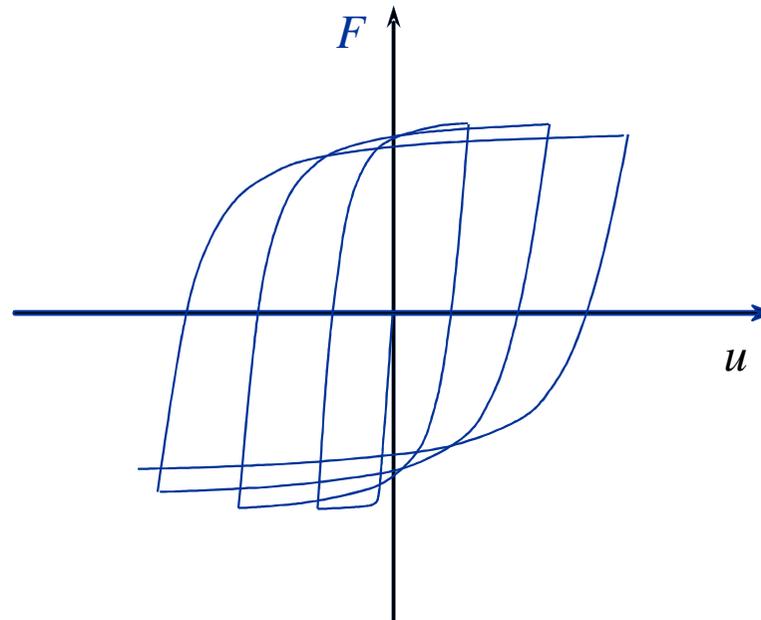
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

Comportamento oltre il limite elastico

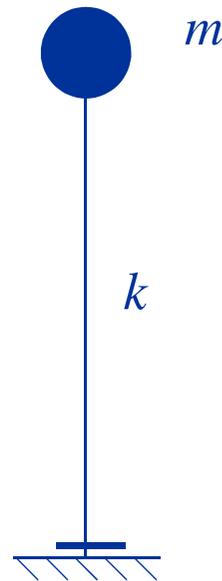
Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

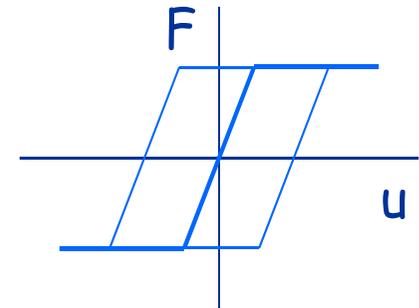


Foto

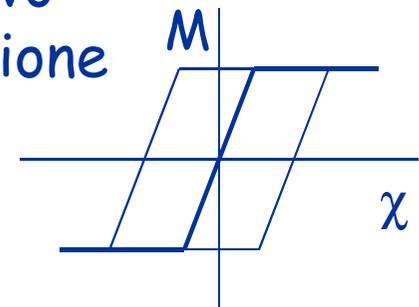


Modello
di calcolo

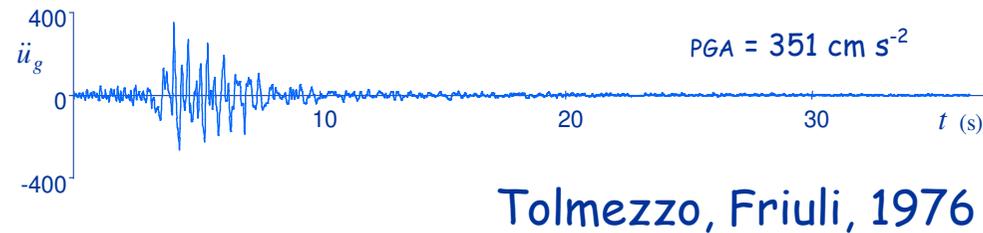
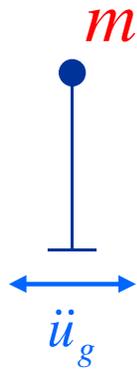
Legame costitutivo
della struttura



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
 Δt (pari a k oppure nulla)

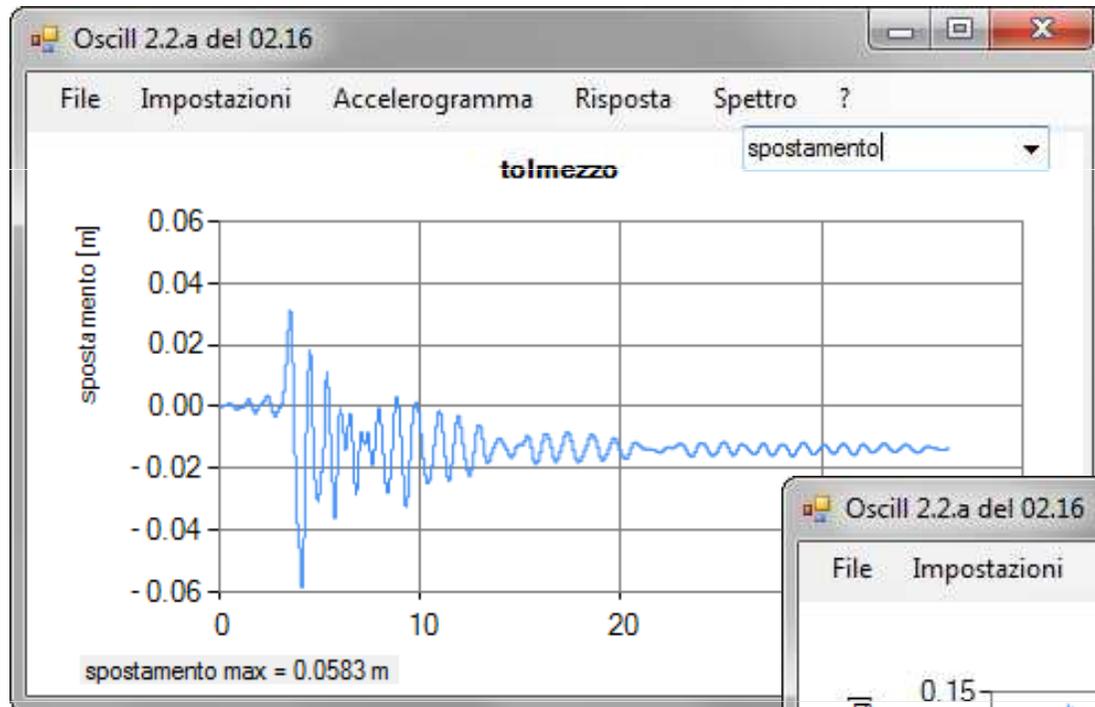
Si ottiene la risposta nel tempo (time history)

Determinazione della time history

Metodo di Newmark

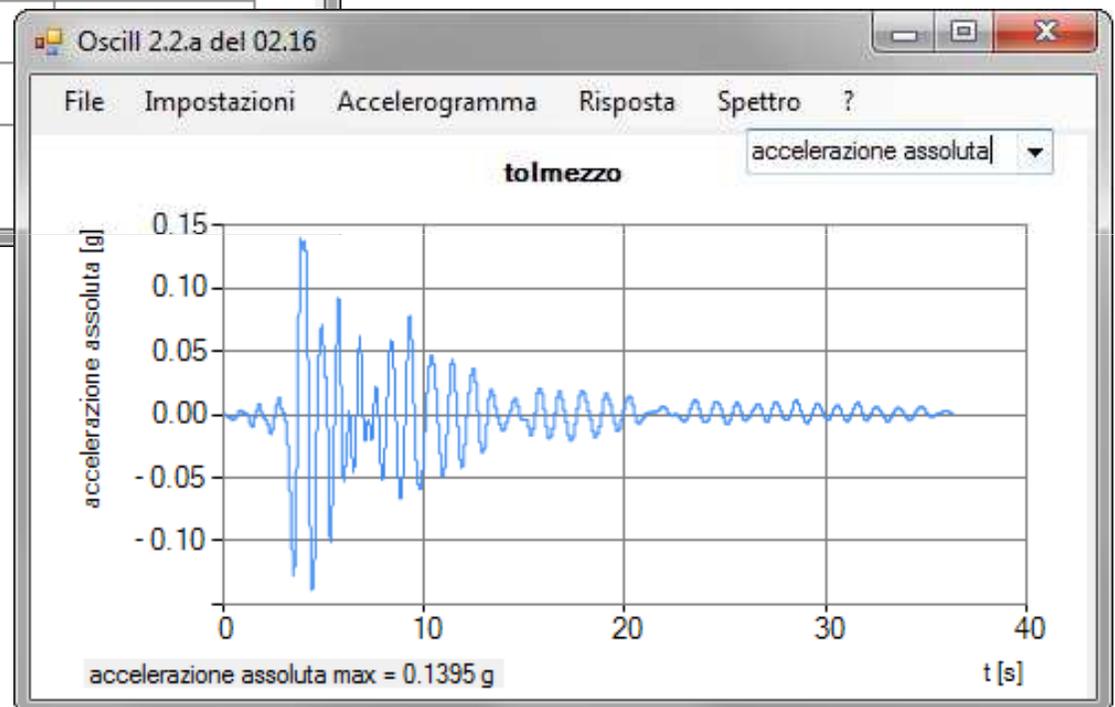
- Analoga a quanto visto per oscillatore lineare
- Nell'equazione di equilibrio dinamico la forza di richiamo f_s non è elastica, quindi non è proporzionale allo spostamento u
- L'equazione di equilibrio dinamico è
$$m \Delta \ddot{u} + c \Delta \dot{u} + \Delta f_s = -m \Delta \ddot{u}_g$$
- La si deve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

Risposta sismica non lineare programma Oscill

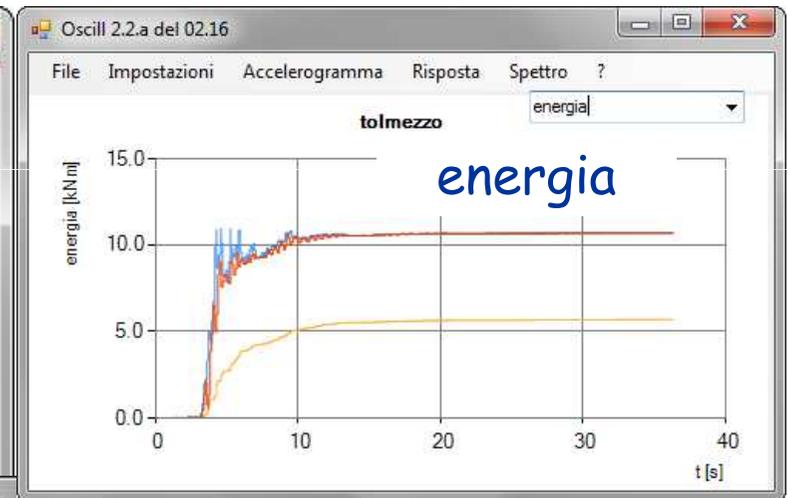
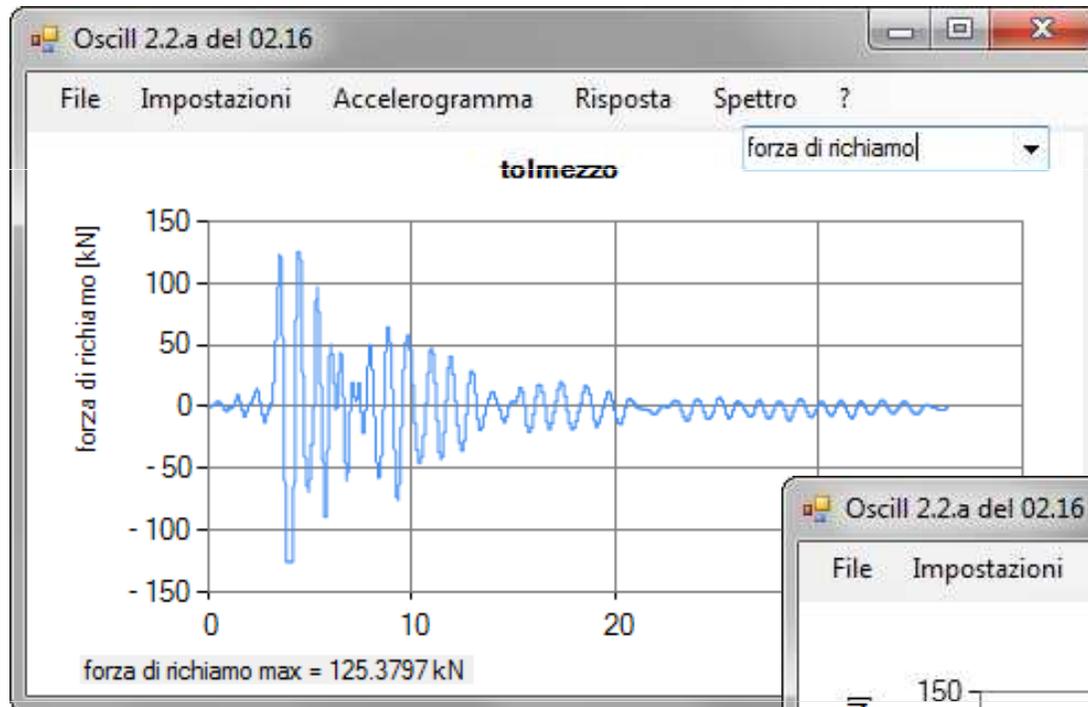


spostamento:
rimane uno spostamento
residuo al termine del
sisma

accelerazione

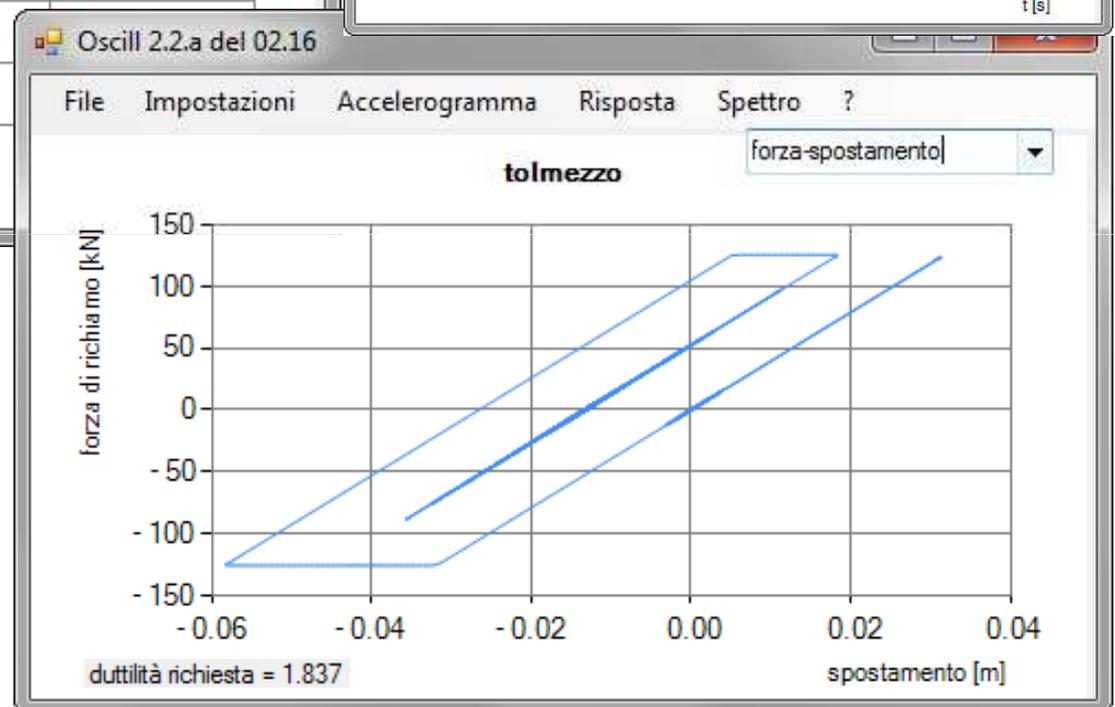


Risposta sismica non lineare programma Oscill



forza di richiamo:
non supera il valore di
resistenza assegnato

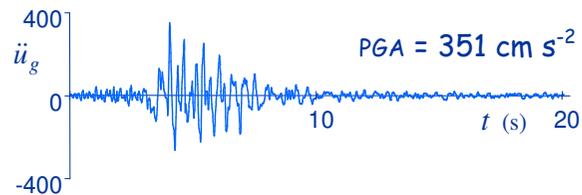
legame forza-spostamento



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

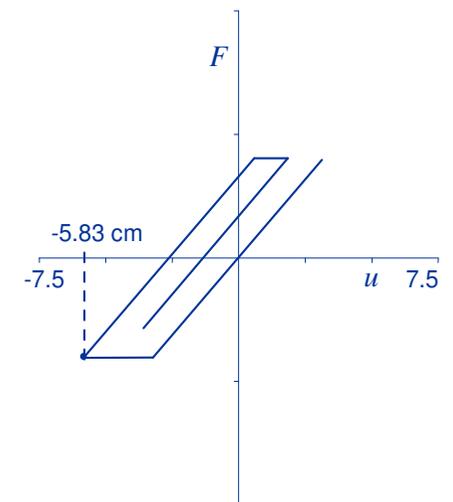
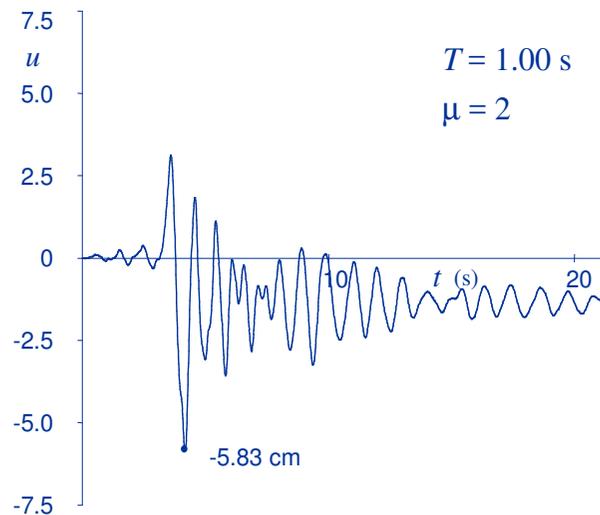
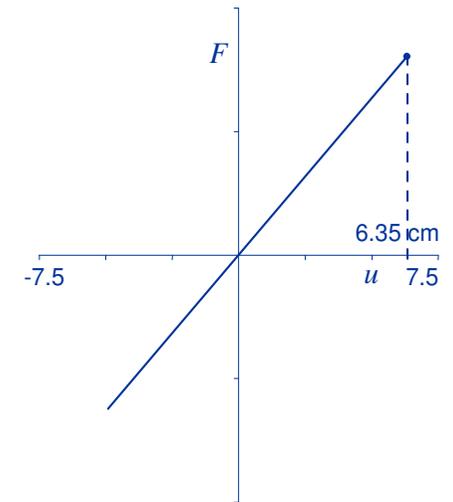
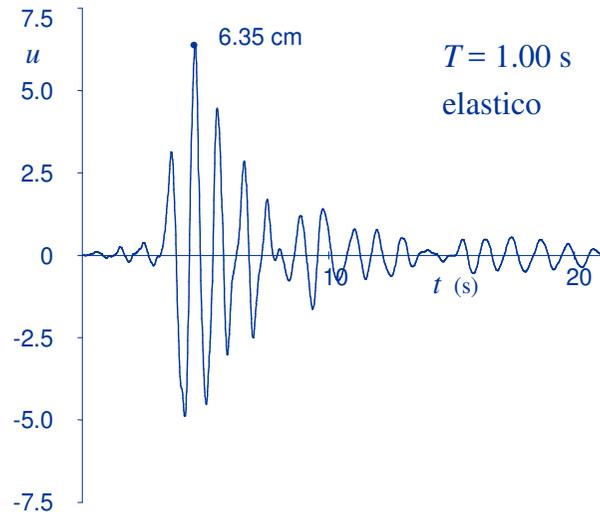
Risposta
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta
elasto-plastica



Richiesta di duttilità

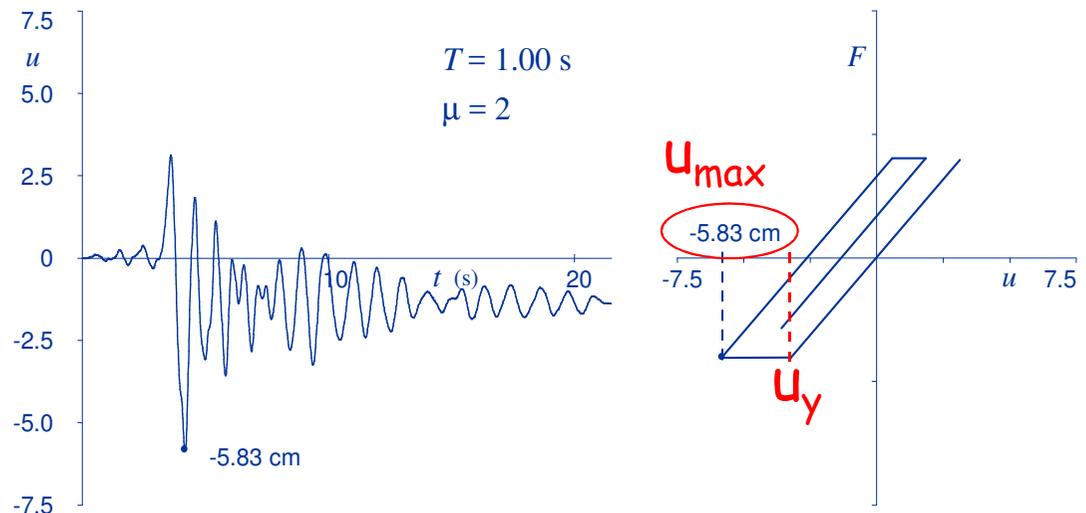
Il rapporto tra lo spostamento massimo U_{max} ottenuto come risposta al sisma

e lo spostamento u_y di plasticizzazione

è la duttilità necessaria al sistema per non collassare (richiesta di duttilità)

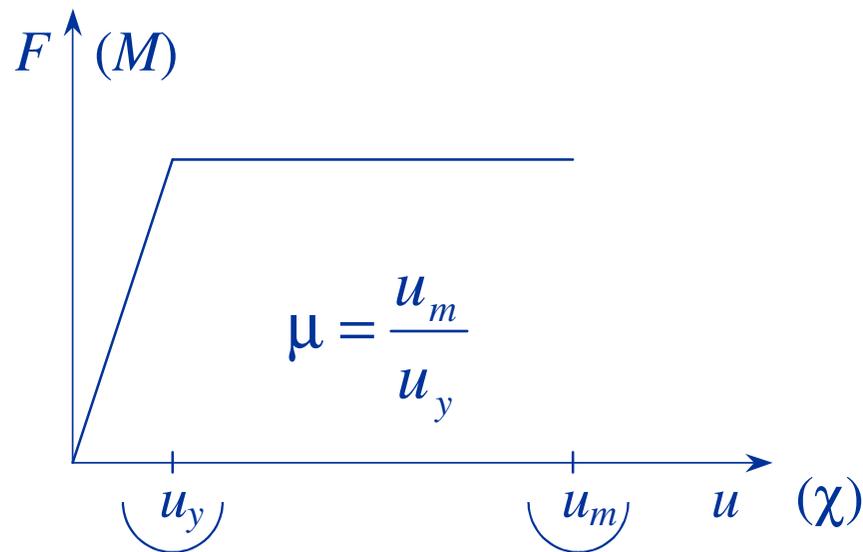
In genere,
tanto minore è la
resistenza
tanto maggiore è la
richiesta di duttilità

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

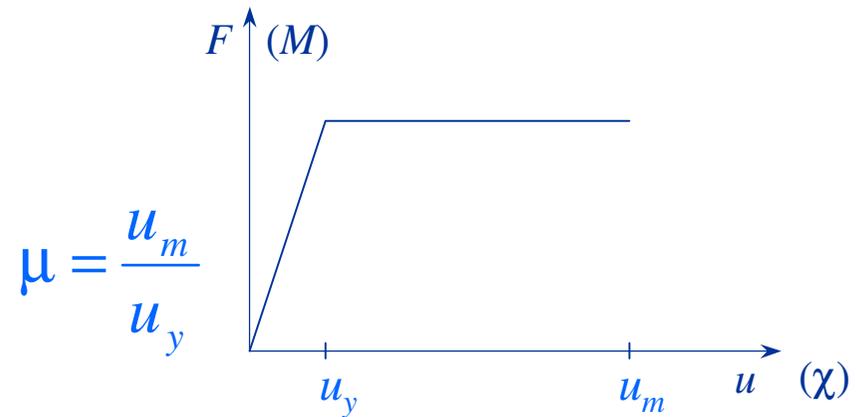
Progettazione a duttilità assegnata

- 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

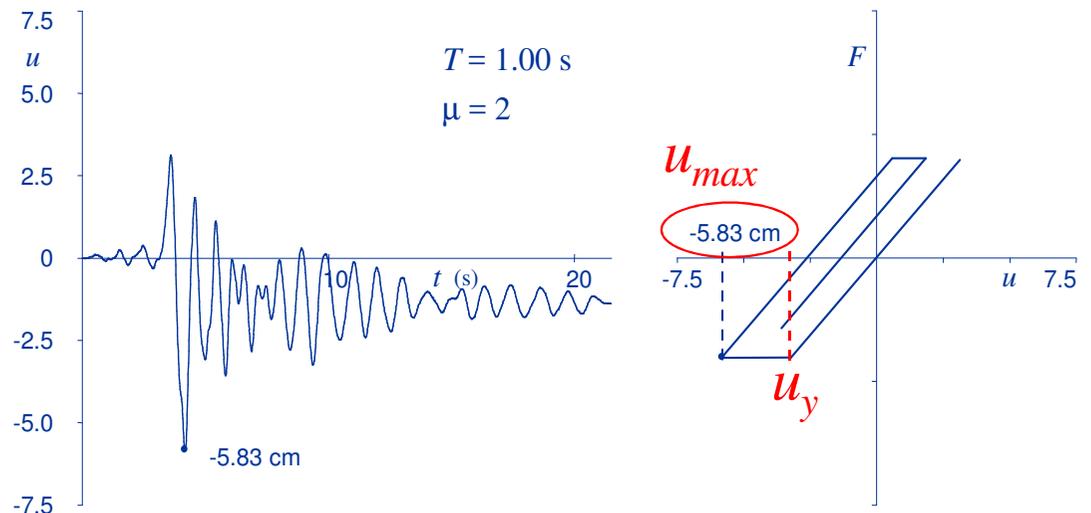
È possibile progettare la struttura con una forza ridotta, accettando la sua plasticizzazione, purché la duttilità disponibile



sia maggiore di
quella richiesta

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

Risposta
elasto-plastica



Progettazione a duttilità assegnata

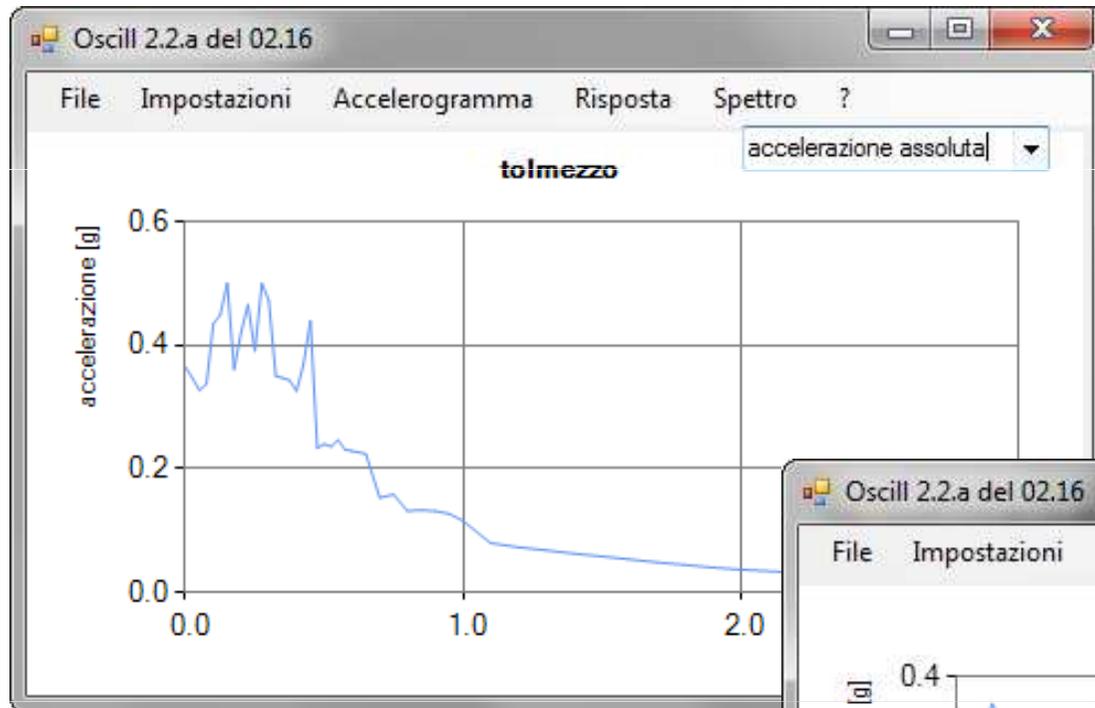
La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



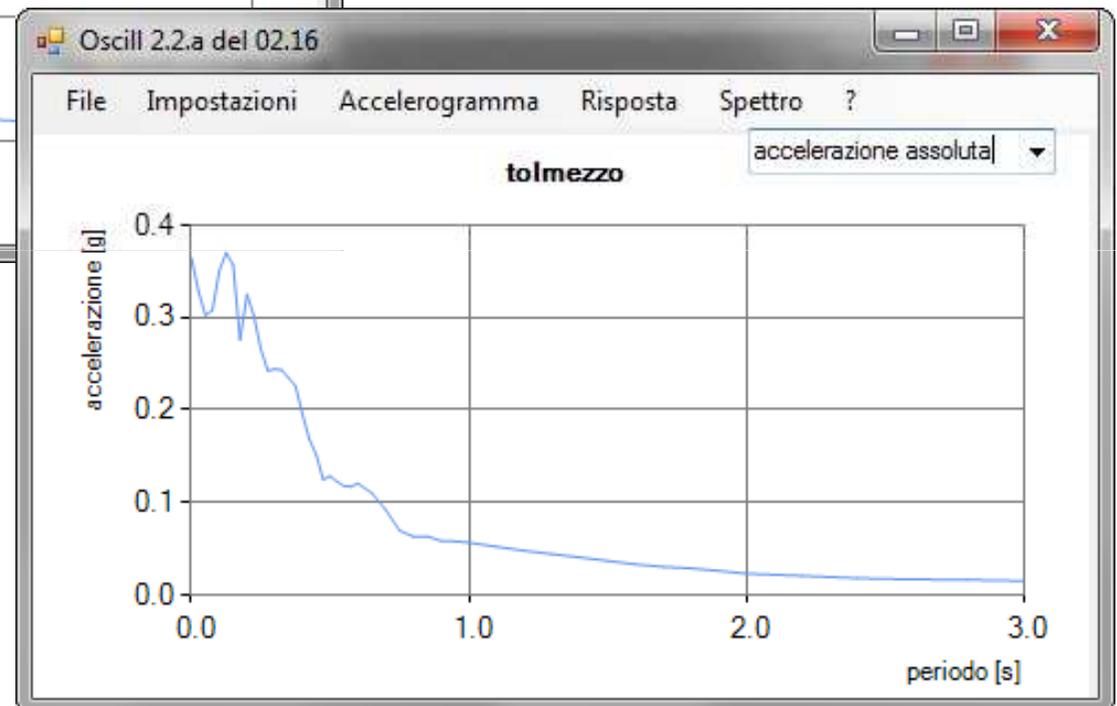
Ricordando che $F = m a$,
si può diagrammare in
funzione del periodo
l'accelerazione da usare
nel progetto,
per assegnati valori
della duttilità μ

Spettro di risposta a duttilità assegnata

Spettro di risposta a duttilità assegnata (programma Oscill)



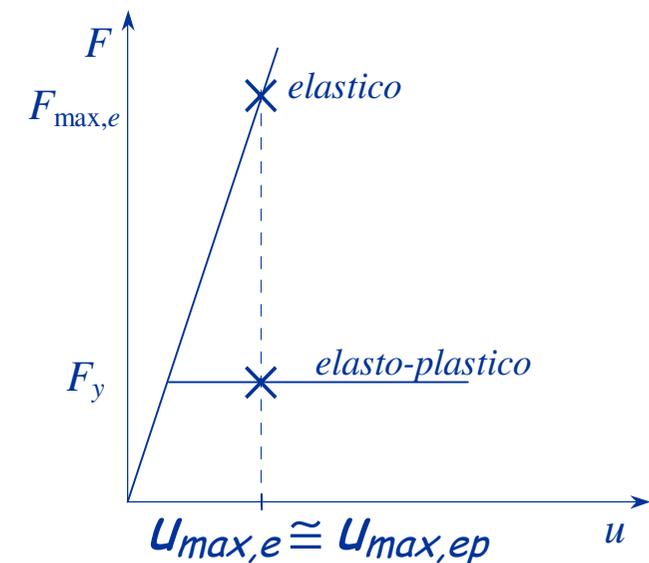
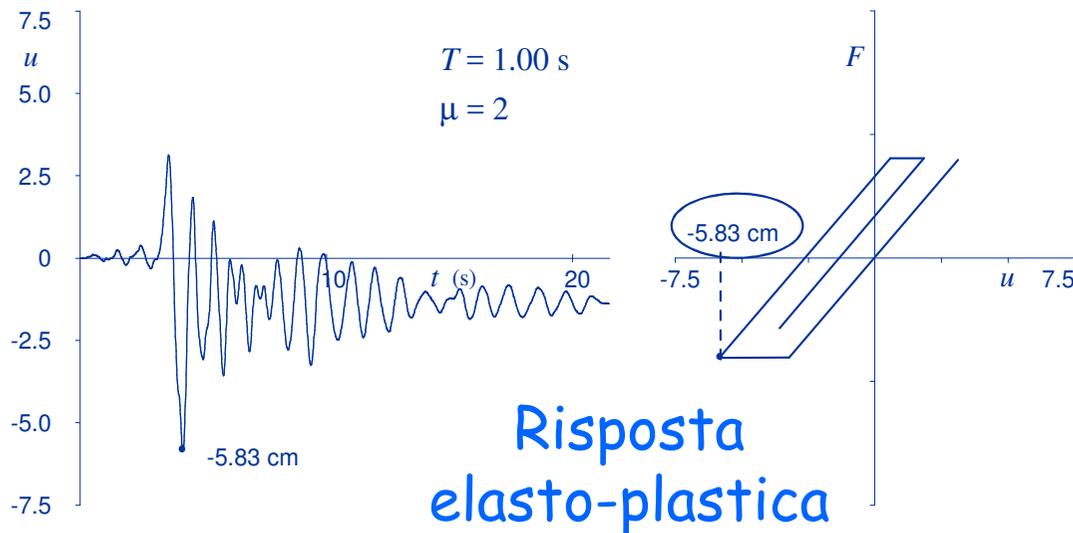
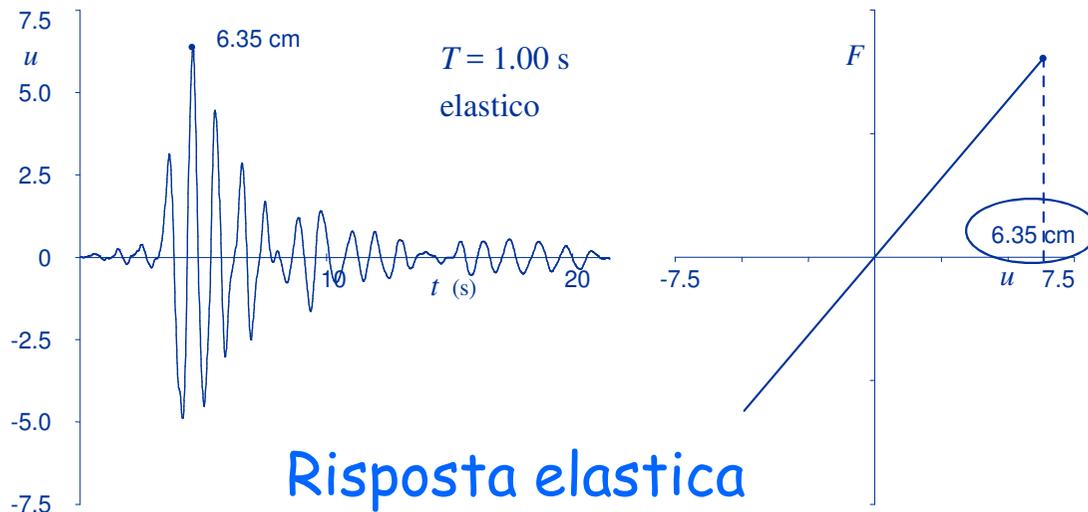
duttilità 2



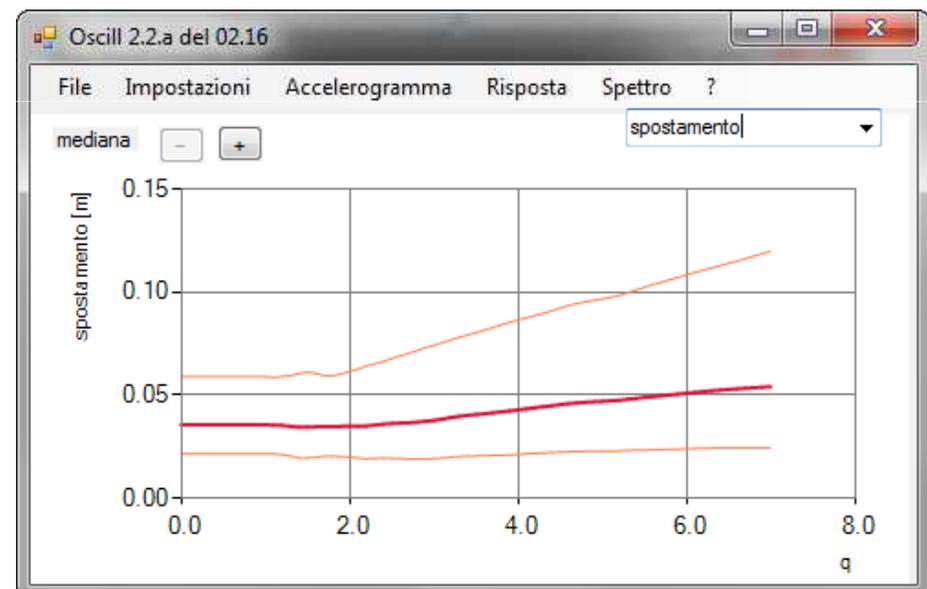
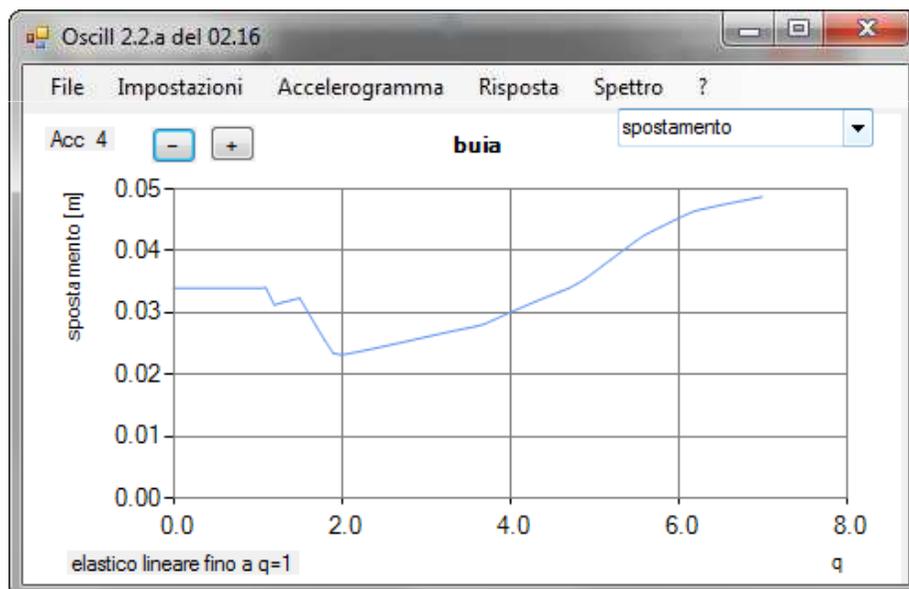
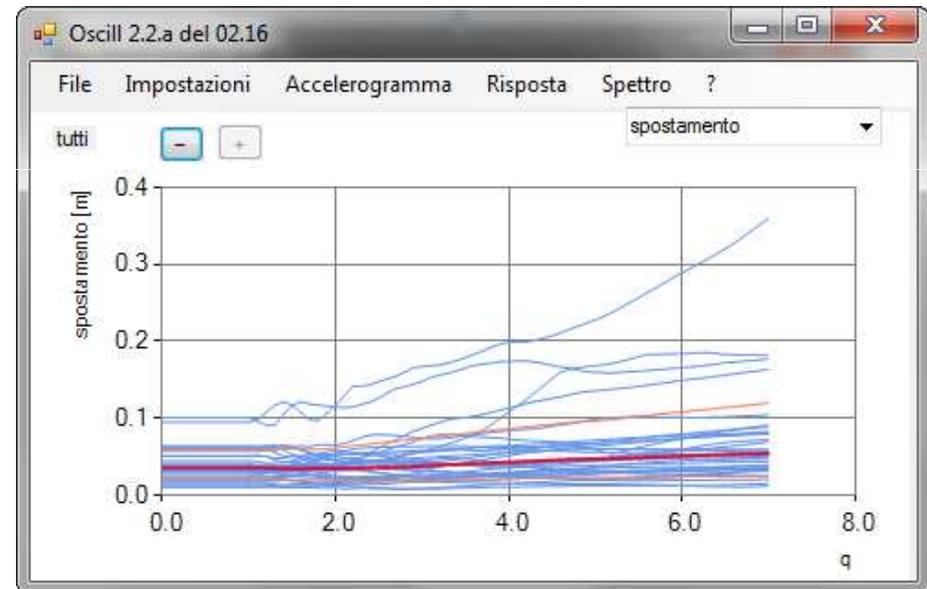
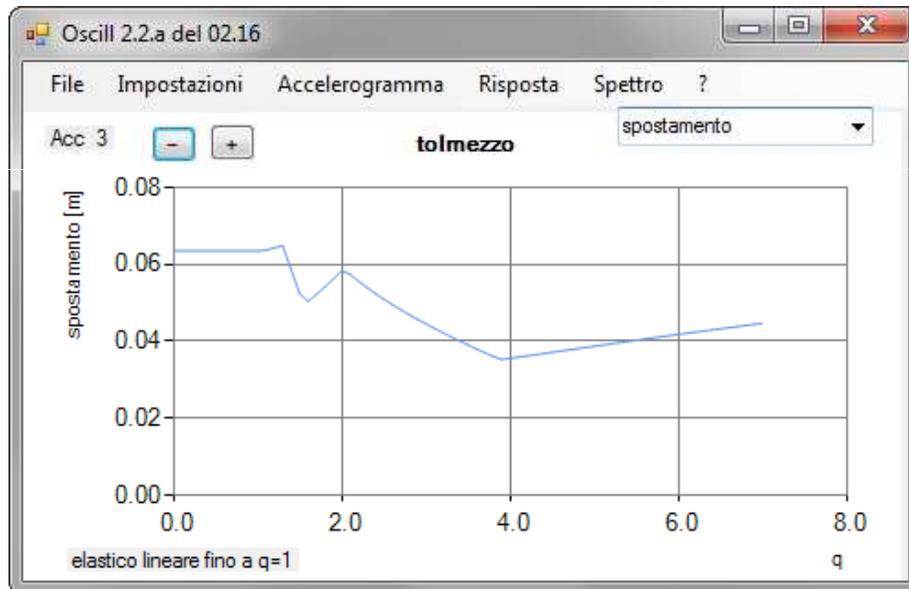
duttilità 4

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

 F_d

la forza necessaria
per mantenere la
struttura in campo
elastico

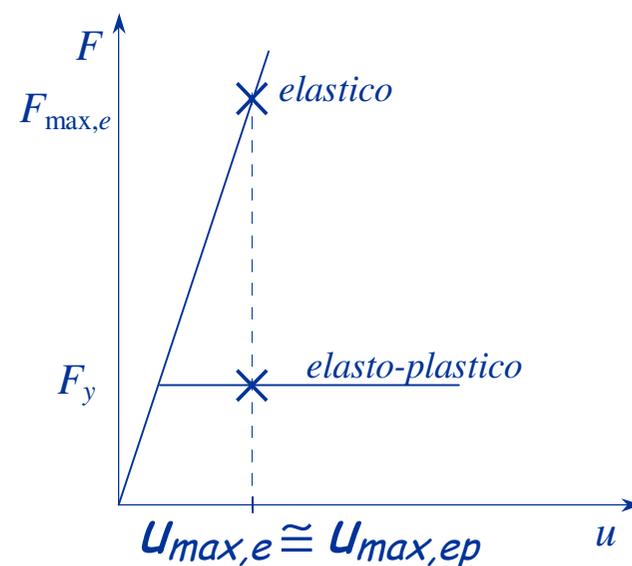
 $F_{max,e}$

per la duttilità

 μ

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

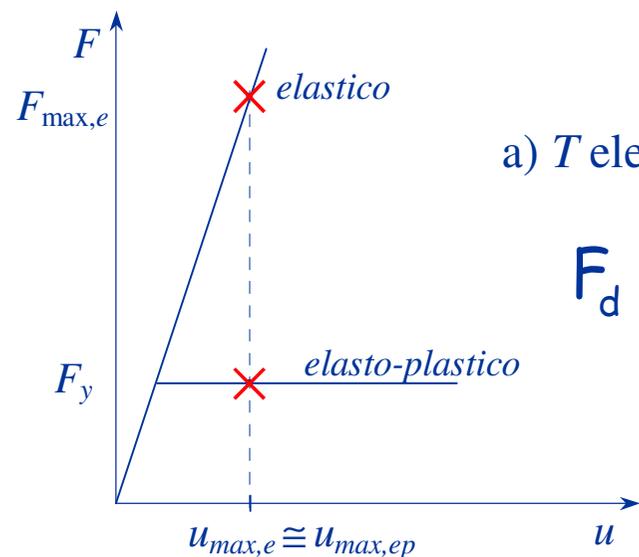
Le analisi numeriche
mostrano che lo
spostamento di
schemi elastici ed
elasto-plastici è più
o meno lo stesso



Progettazione a duttilità assegnata

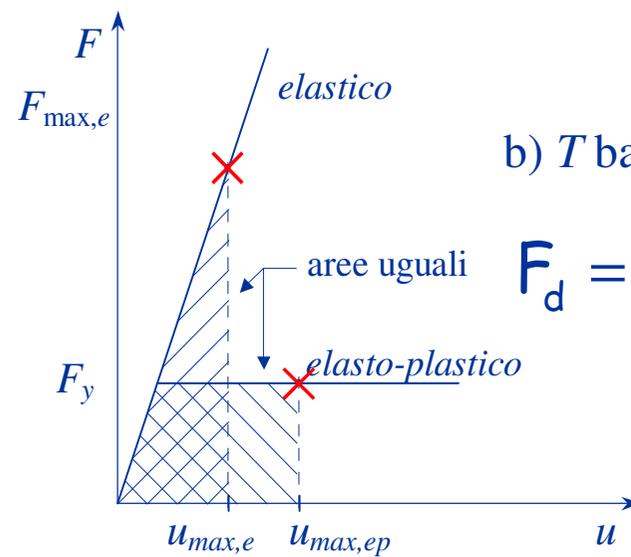
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo per strutture con periodo medio-alto

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:

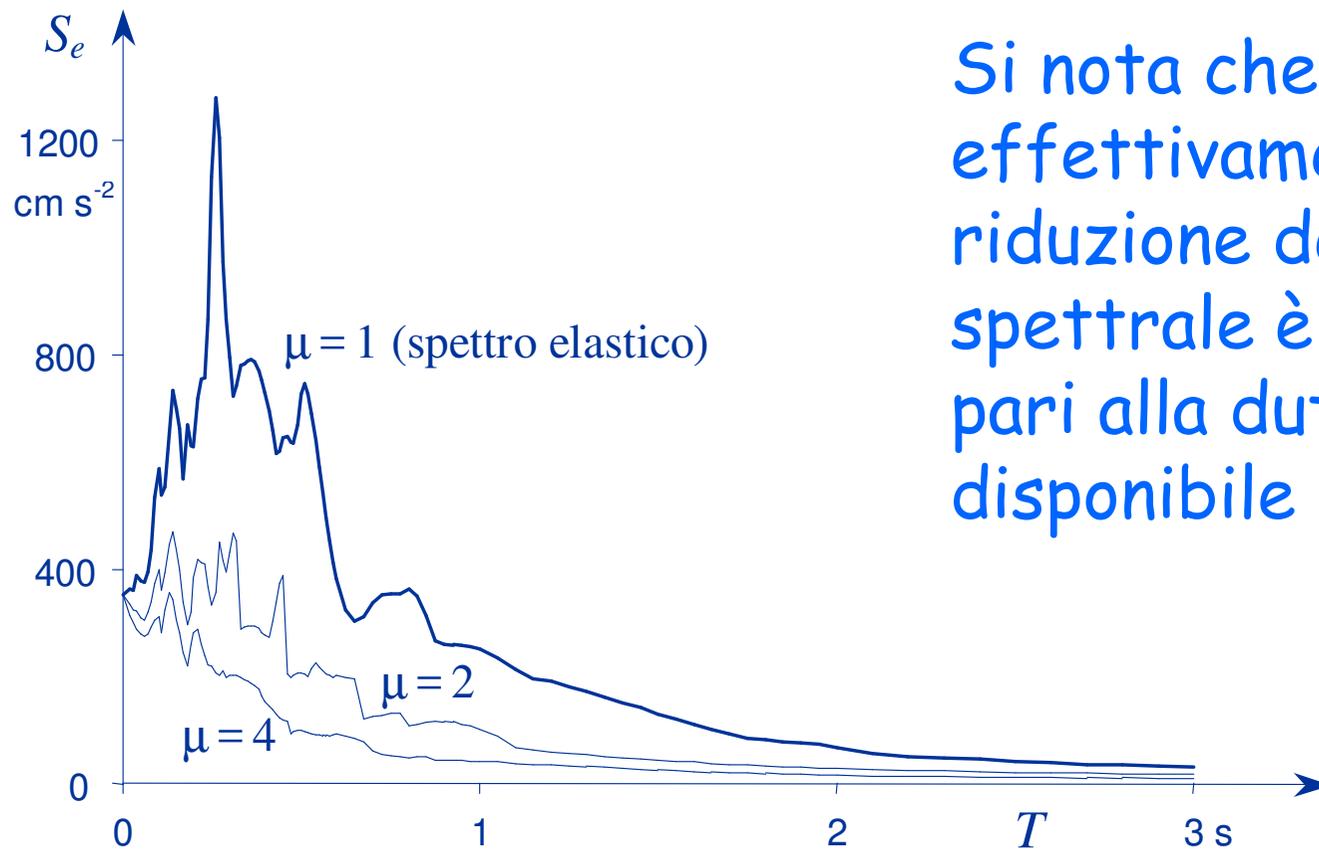
$$F_d = \frac{F_{\max,e}}{\mu} \quad \text{per } T_1 \geq T_C$$

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

Nota:
queste espressioni
sono in genere
usate all'inverso,
per ricavare μ

Progettazione a duttilità assegnata

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

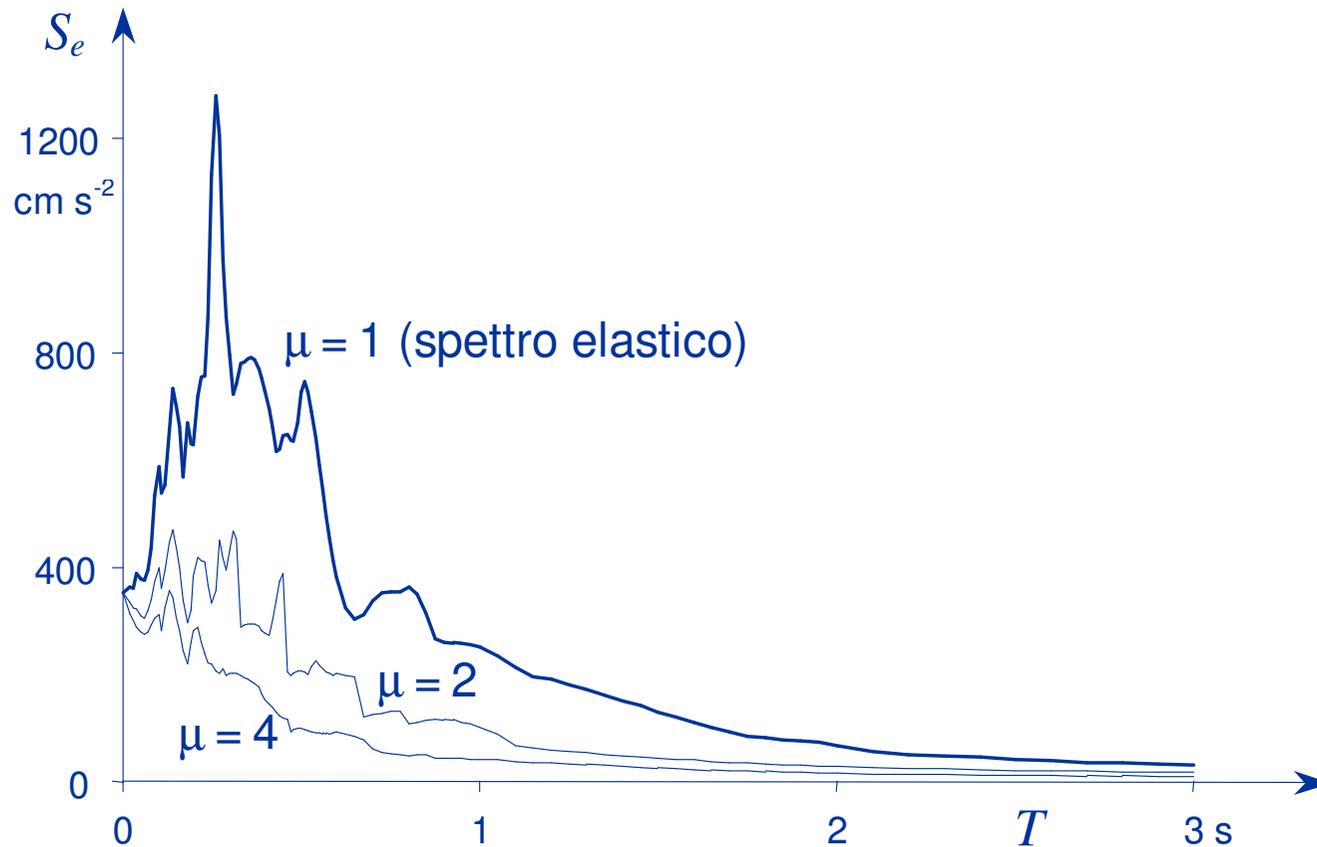


Si nota che
effettivamente la
riduzione dell'ordinata
spettrale è, più o meno,
pari alla duttilità
disponibile

Spettro di risposta a duttilità assegnata

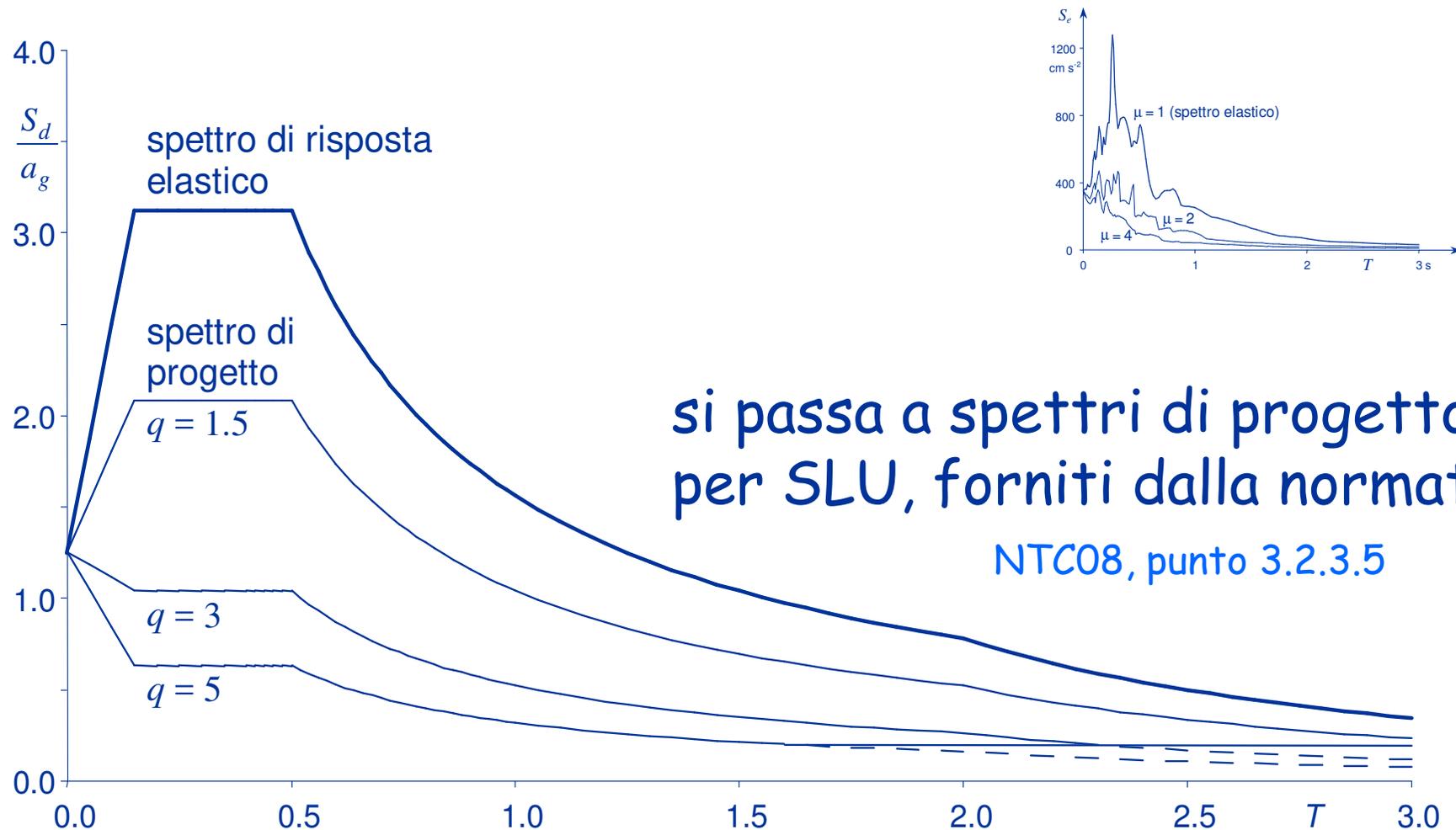
Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



si passa a spettri di progetto per SLU, forniti dalla normativa

NTC08, punto 3.2.3.5

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