

Corso di aggiornamento professionale

**Valutazione della sicurezza
e verifica sismica di edifici esistenti in c.a.**

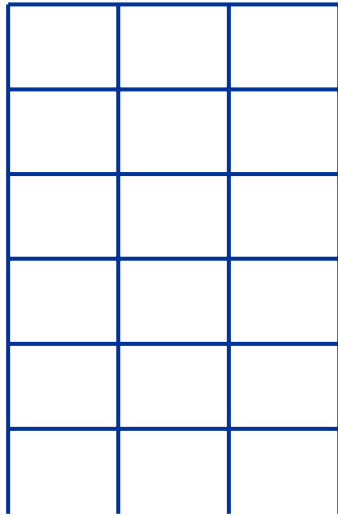
4b - Valutazione del comportamento (oltre il limite elastico)

Parma

21-23 giugno 2010

Aurelio Ghersi

Comportamento oltre il limite elastico



Modello per i materiali



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



Modello di telaio con
cerniere plastiche

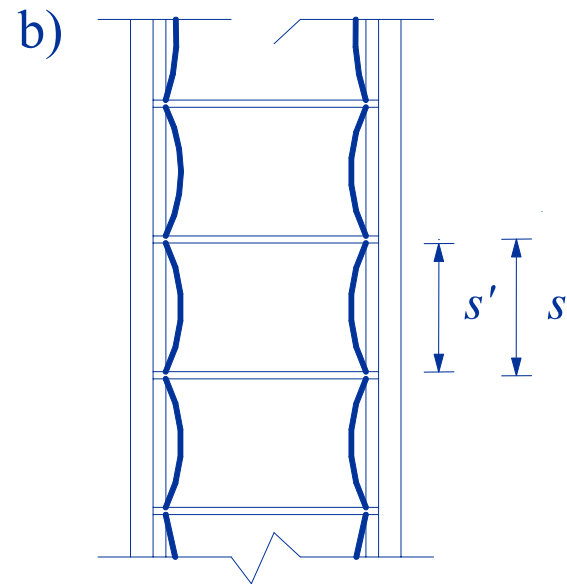
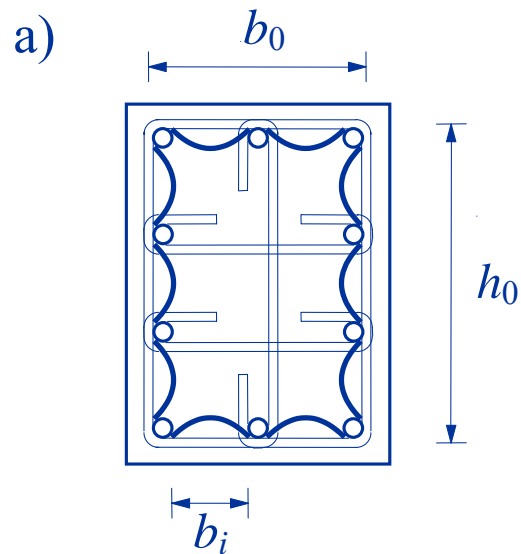


Modello di telaio
a fibre

Modello per i materiali calcestruzzo

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Efficacia del confinamento



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

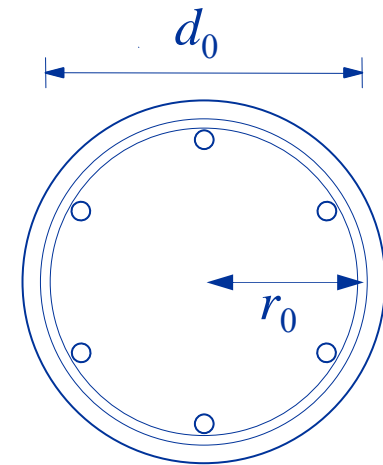
Staffe in una sezione circolare

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

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

con

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



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

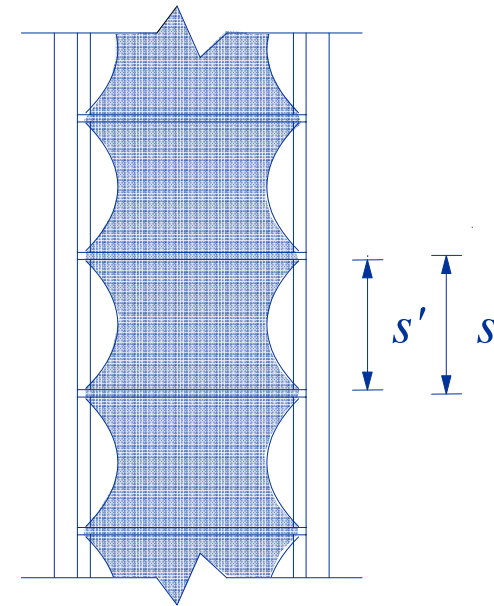
Staffe in una sezione circolare Efficacia del confinamento

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



Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

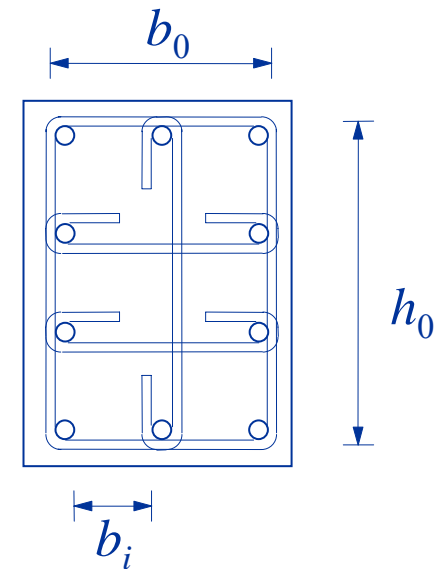
Staffe in una sezione rettangolare

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

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

con

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



Calcestruzzo

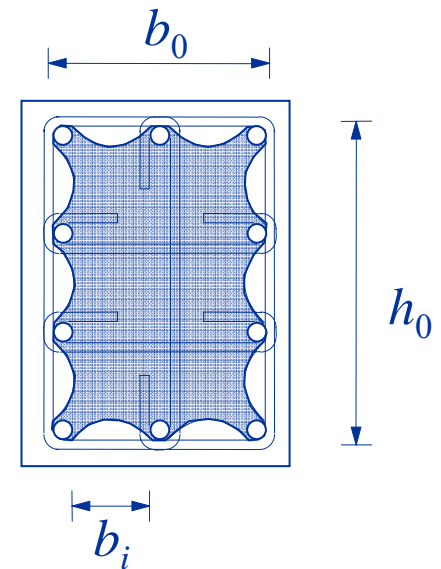
confinamento dovuto alle staffe

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

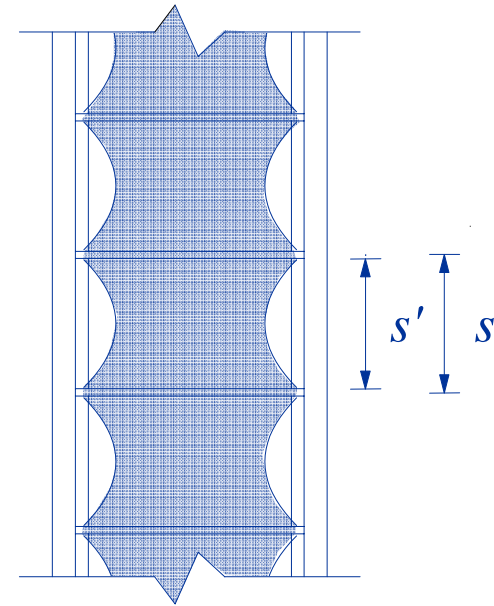
Staffe in una sezione rettangolare Efficacia del confinamento

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 $\alpha = \alpha_s \alpha_n$

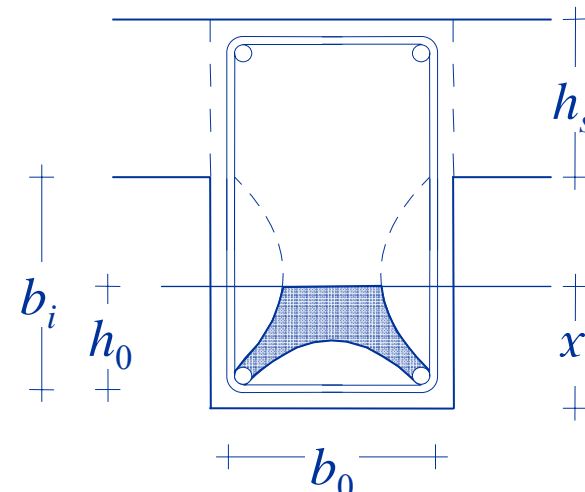
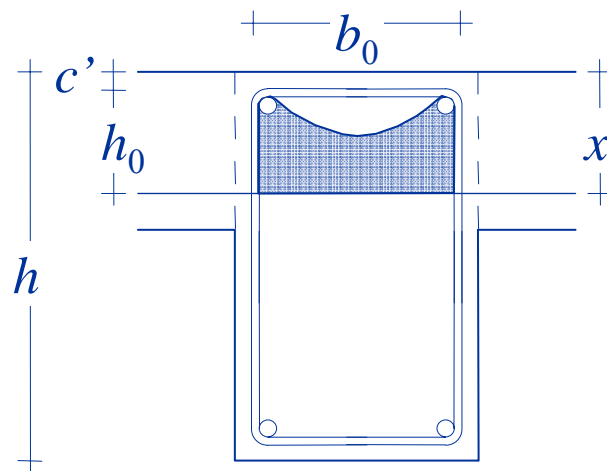


Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

Staffe in una trave a sezione rettangolare Efficacia del confinamento

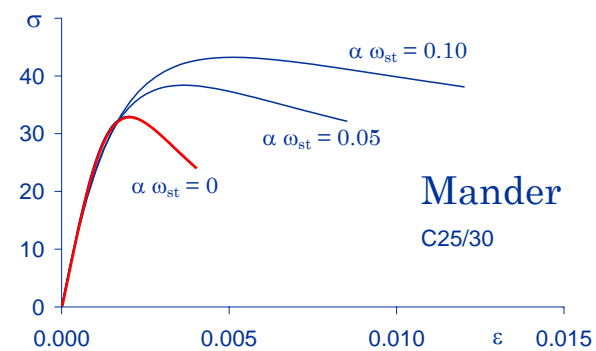
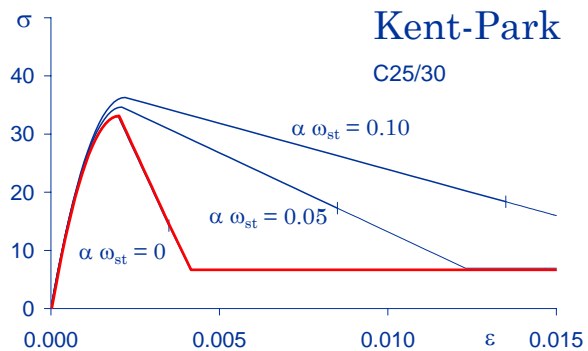
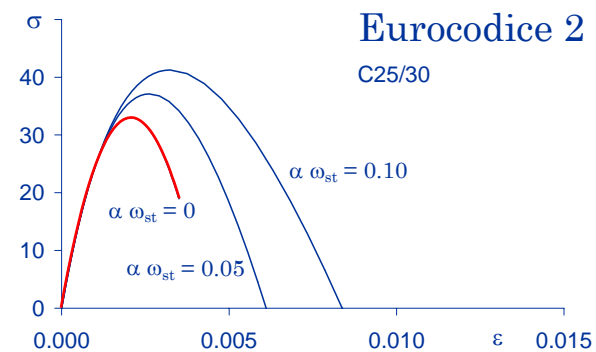
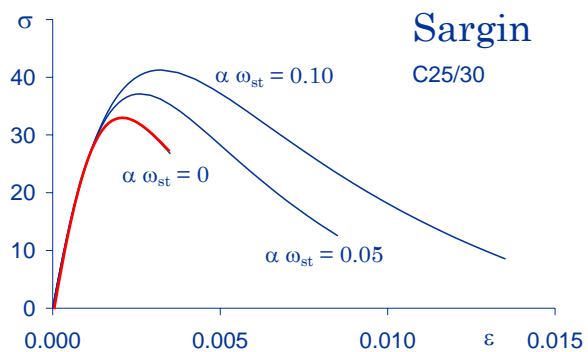
Nel valutare l'efficacia del confinamento bisogna tener conto di qual è la parte compressa e come viene confinata



Modello per i materiali calcestruzzo

Modelli:

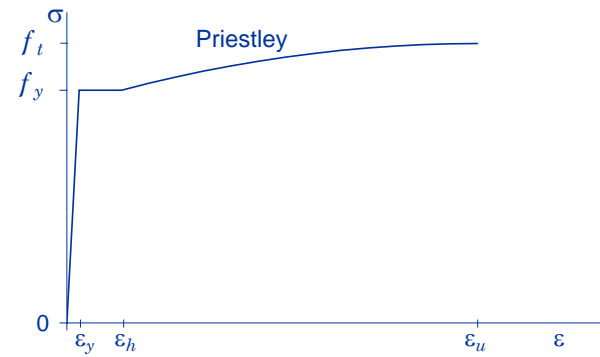
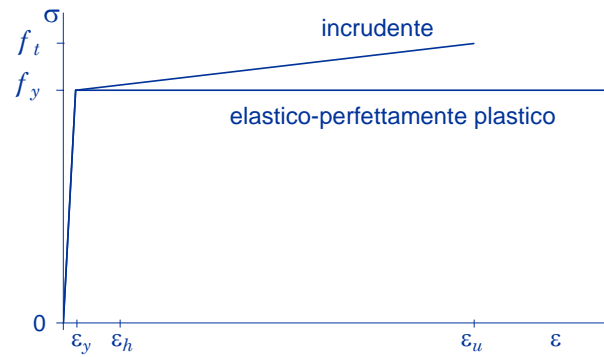
- Esistono numerose proposte, molto diverse



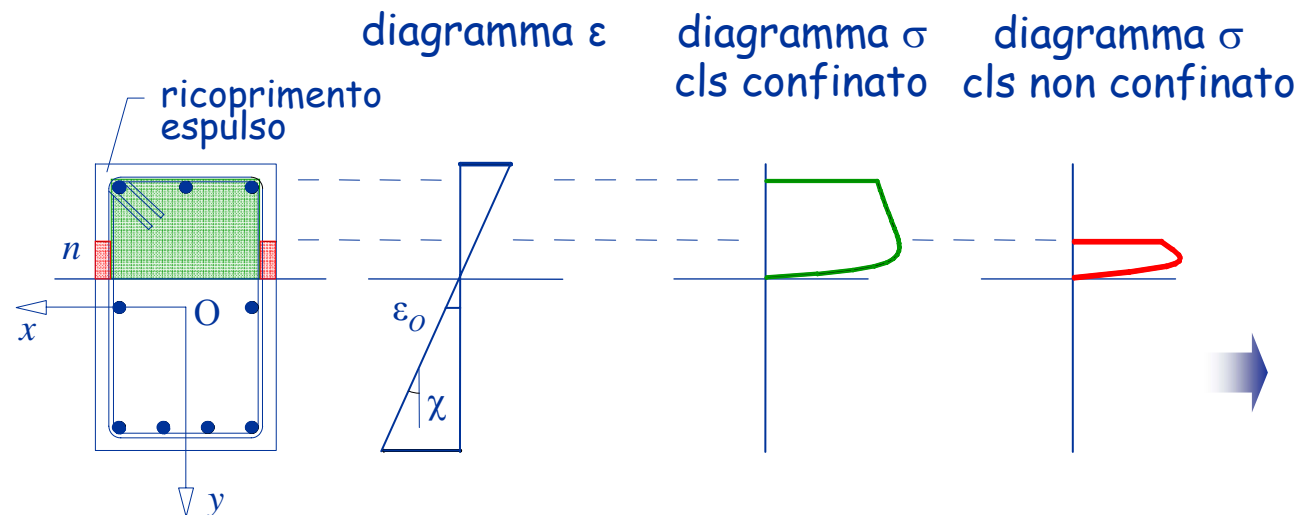
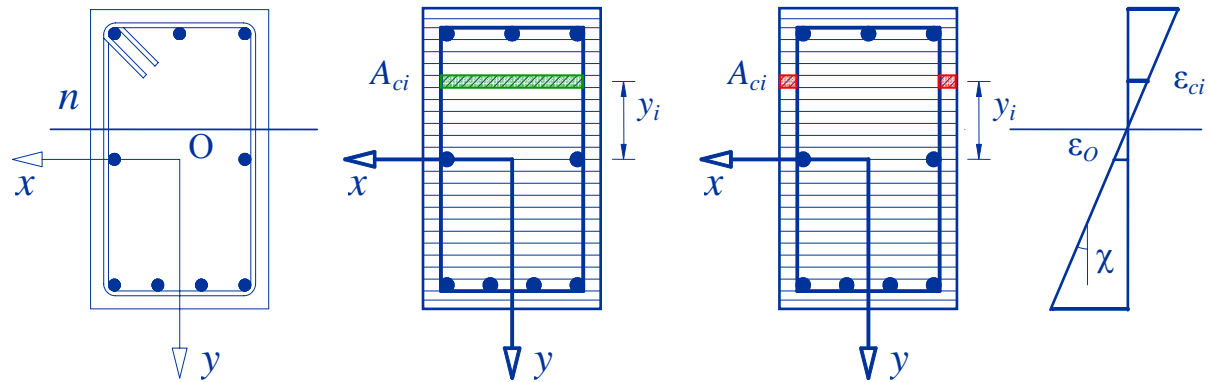
Modello per i materiali acciaio

Modelli:

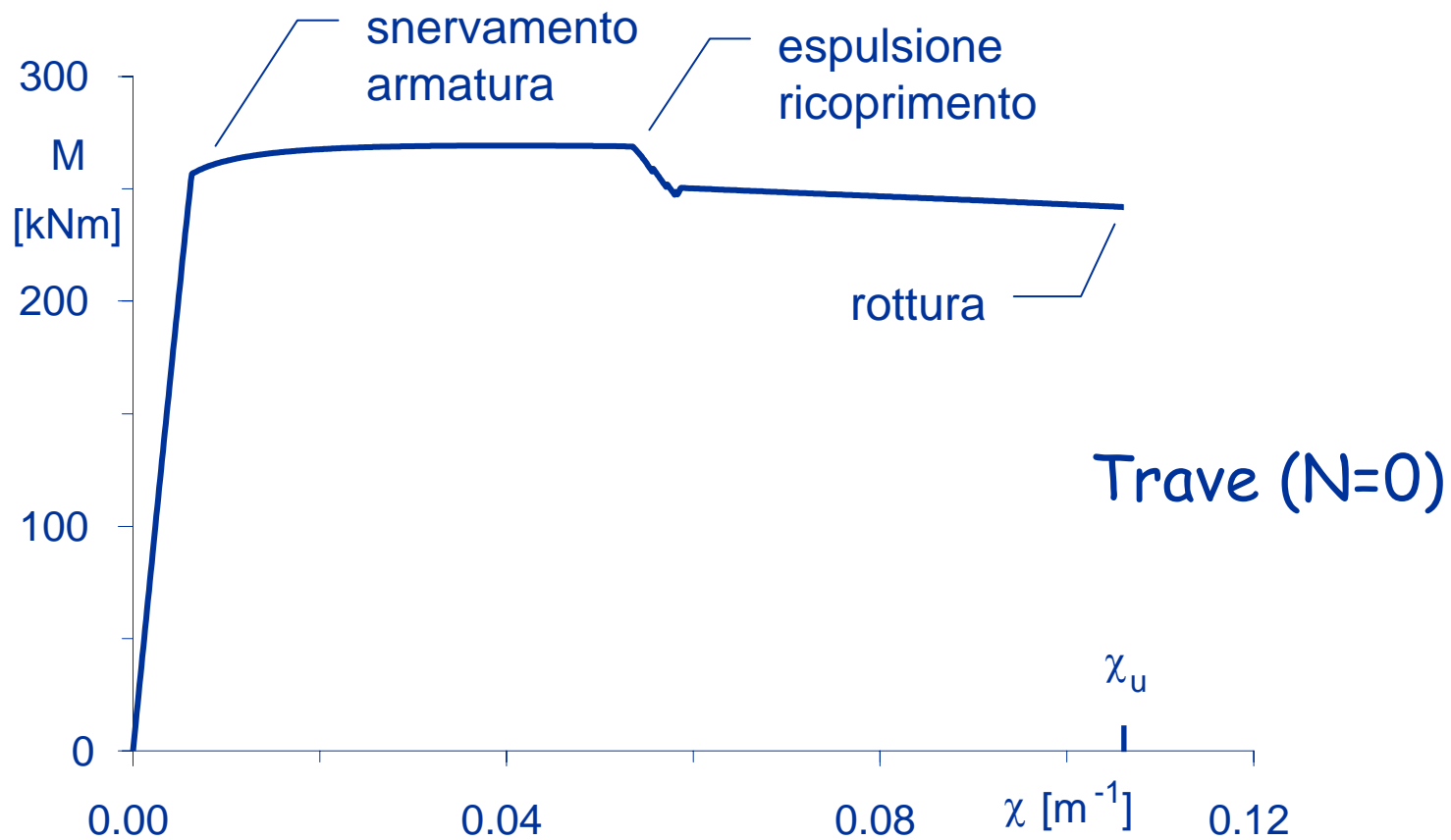
- Esistono alcune proposte, leggermente diverse



Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

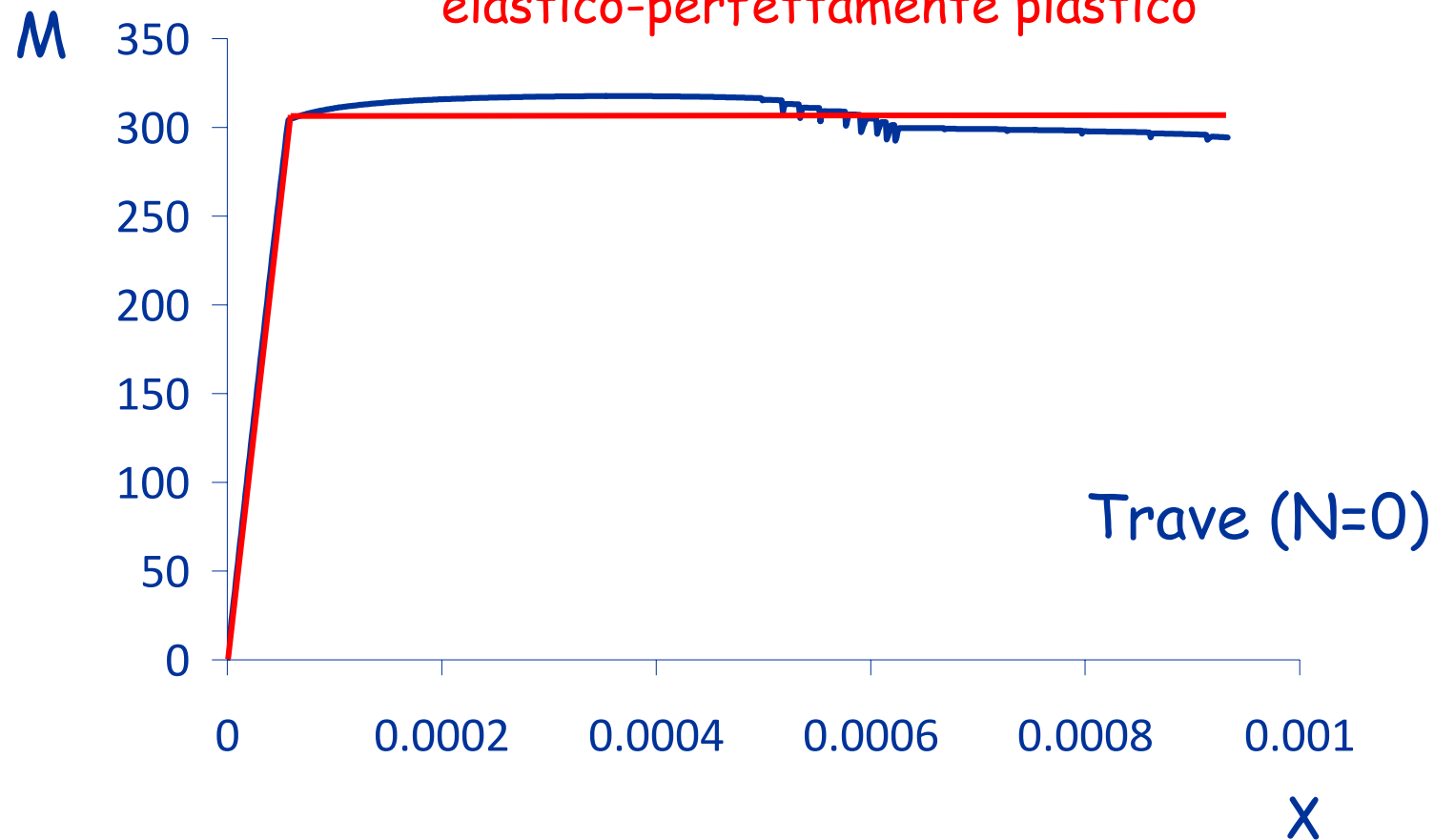


Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

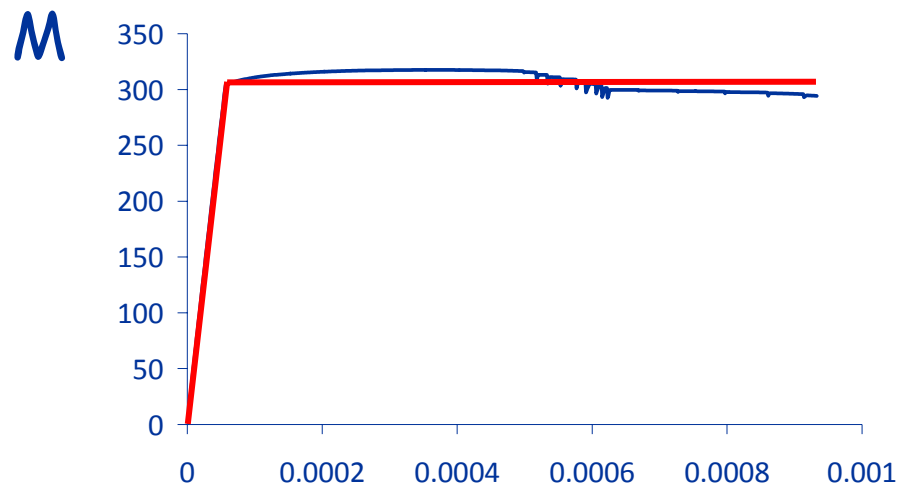
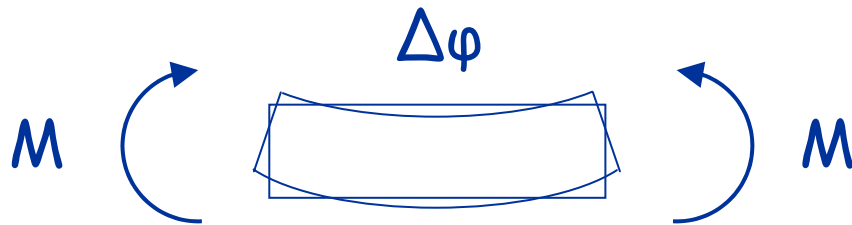


Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

È facile schematizzarlo come
elastico-perfettamente plastico



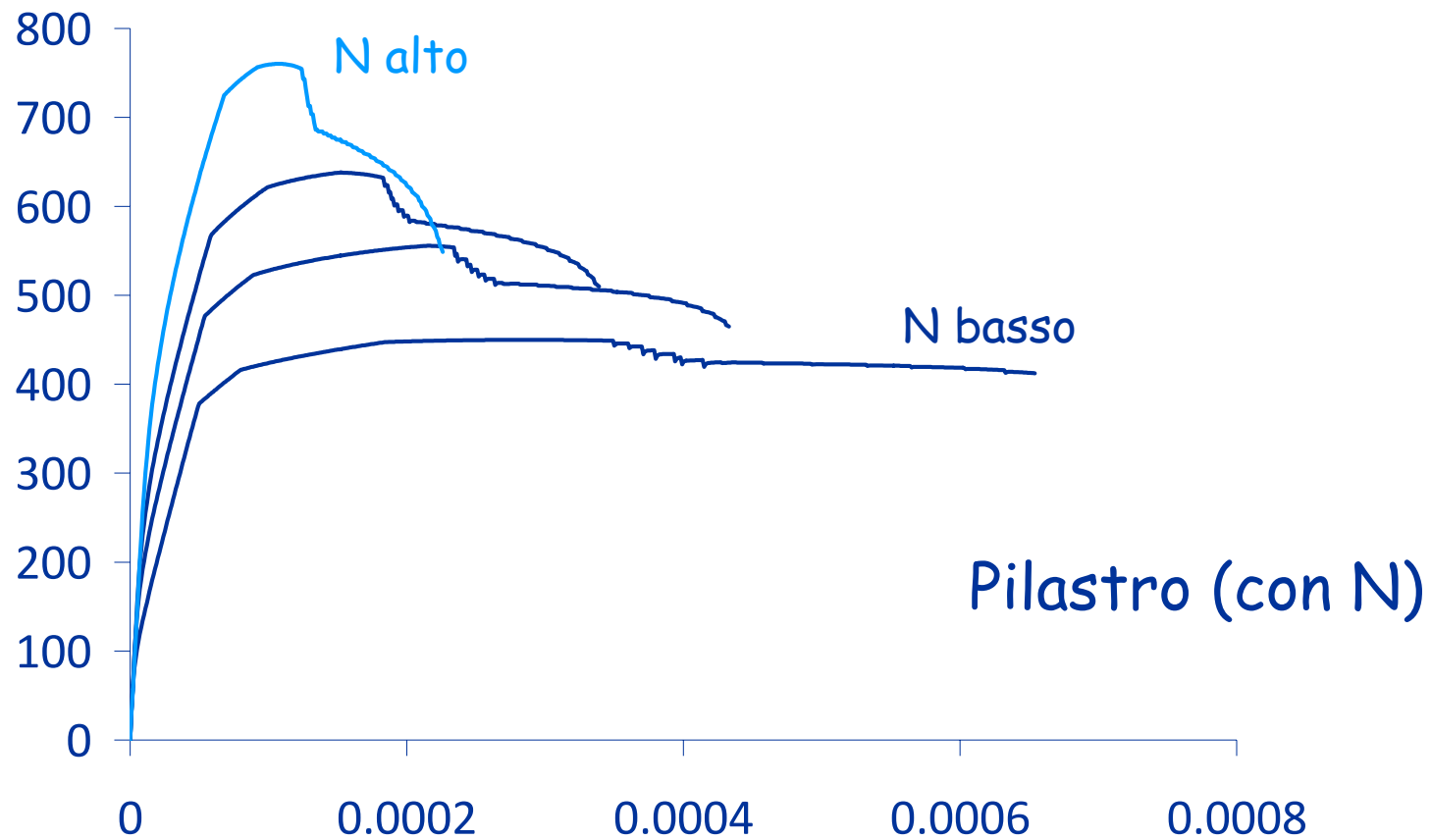
Cerniera plastica concio di trave



Trave ($N=0$)

$x \rightarrow \Delta\varphi$

Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

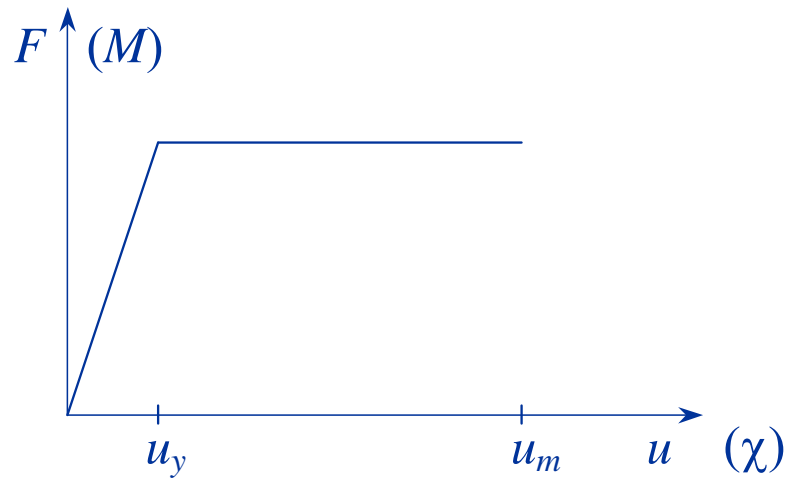


Risposta sismica

Schemi a un grado di libertà
in campo plastico

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico

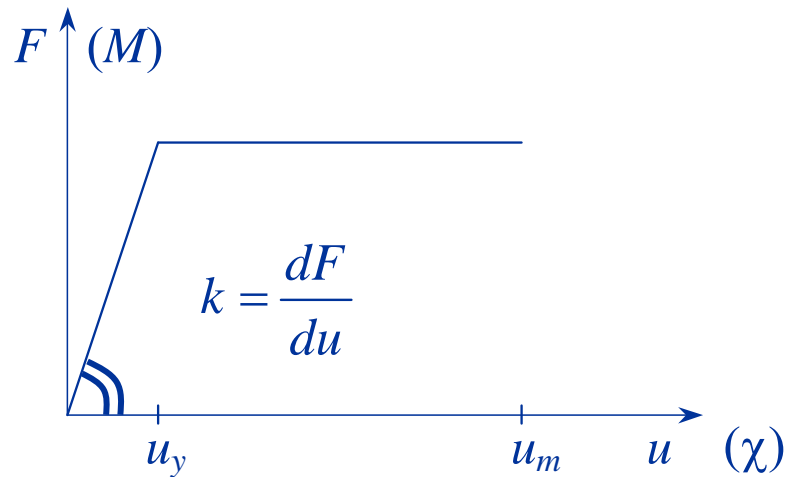


È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



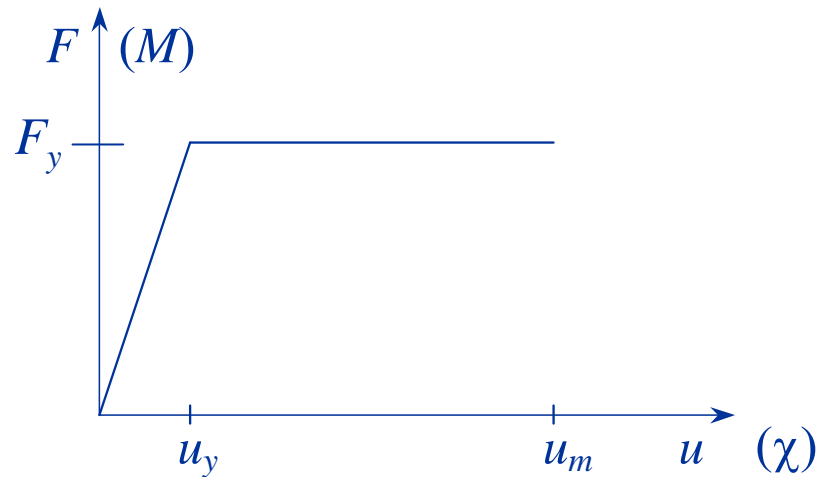
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Rigidezza = inclinazione del diagramma

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



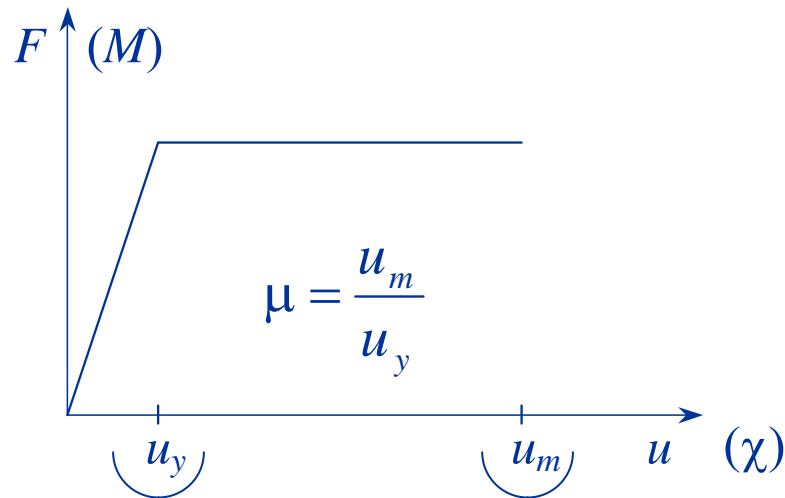
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Resistenza = soglia di plasticizzazione

Comportamento oltre il limite elastico

Legame elastico-perfettamente plastico



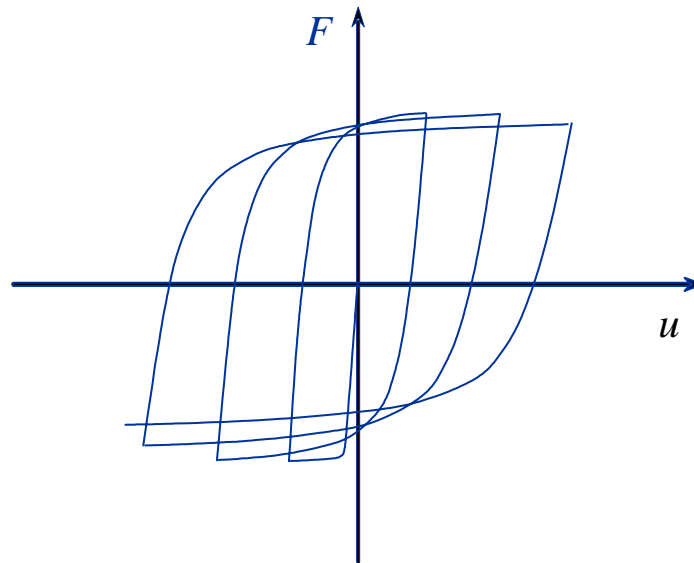
È caratterizzato da tre parametri fondamentali:

- Rigidezza
- Resistenza
- Duttilità

Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente

Comportamento oltre il limite elastico

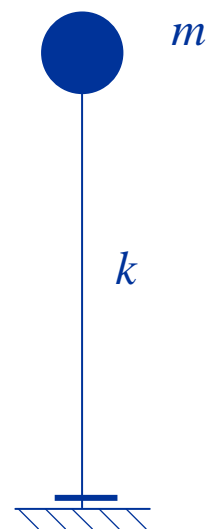
Per una valutazione della risposta sismica, occorre anche tener conto del comportamento ciclico, con i possibili degradi di rigidezza e resistenza



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

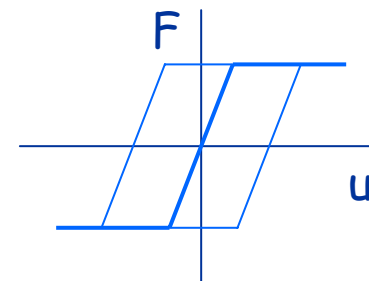


Foto

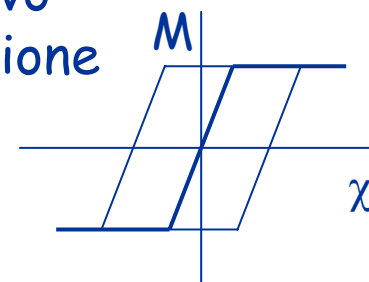


Modello
di calcolo

Legame costitutivo
della struttura



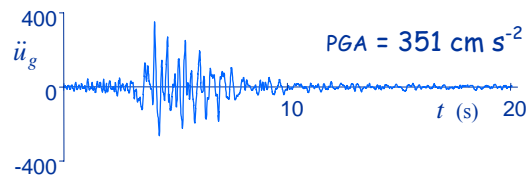
Legame
costitutivo
della sezione



Risposta sismica di un oscillatore semplice elasto-plastico

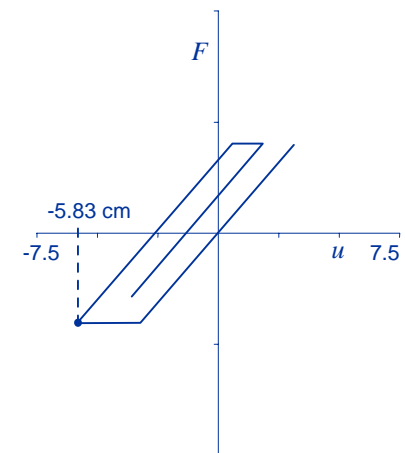
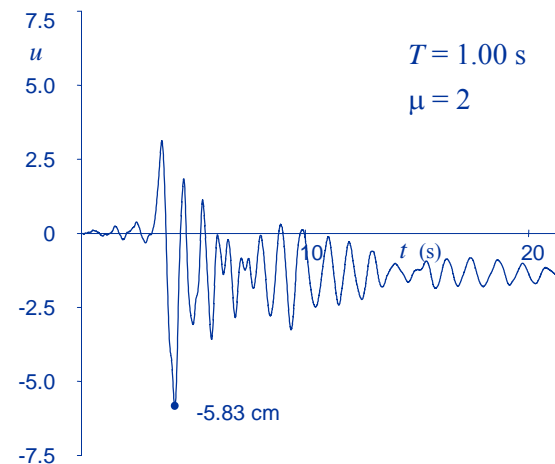
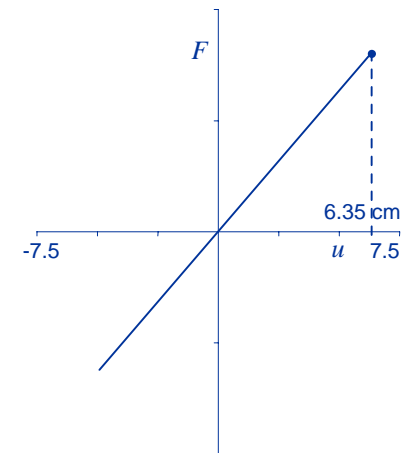
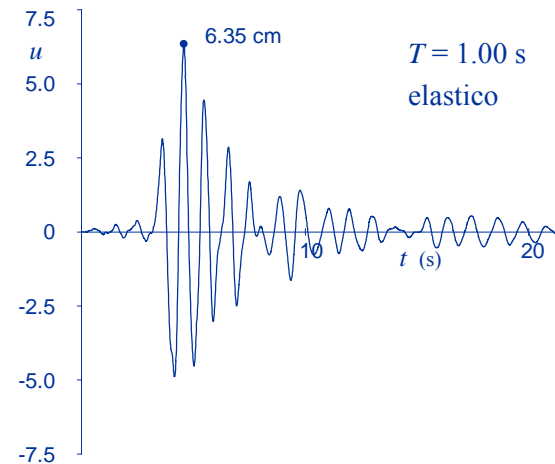
Risposta
elastica

Input sismico



Tolmezzo, Friuli, 1976

Risposta
elasto-plastica

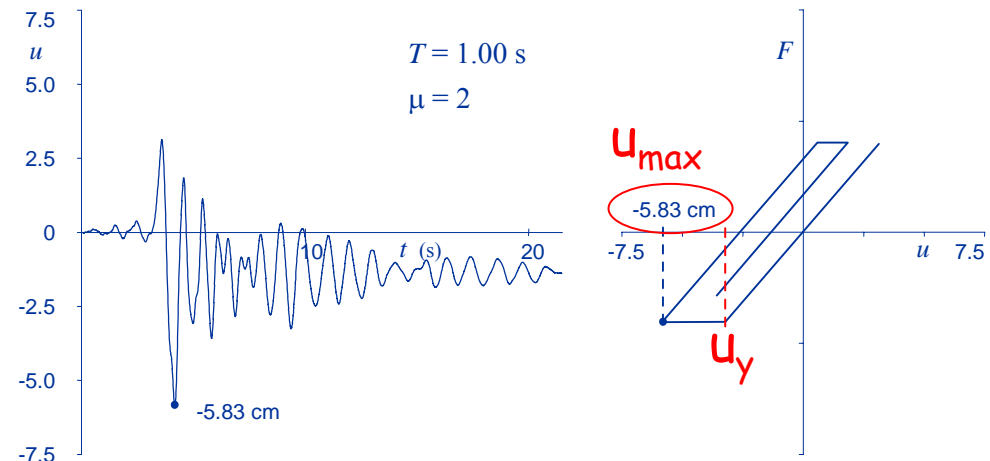


Richiesta di duttilità

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

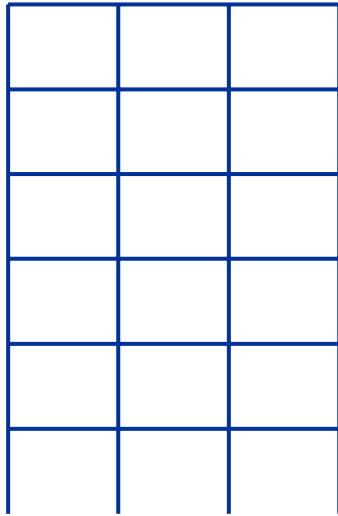
Risposta
elasto-plastica



Risposta sismica

Schemi a più gradi di libertà
in campo plastico

Comportamento oltre il limite elastico



Modello per i materiali



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



Modello di telaio con
cerniere plastiche



Modello di telaio
a fibre

Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

Problemi (per i pilastri - telai piani)

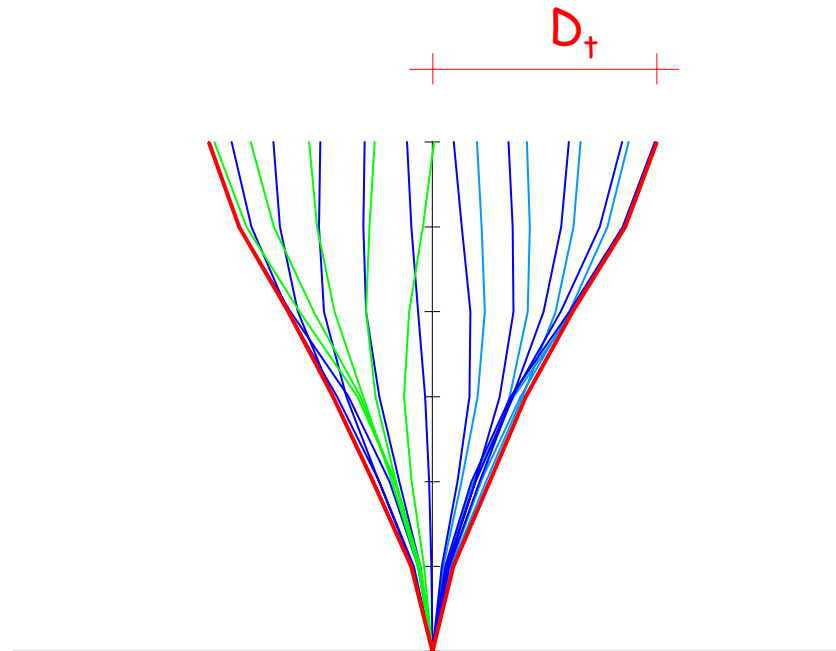
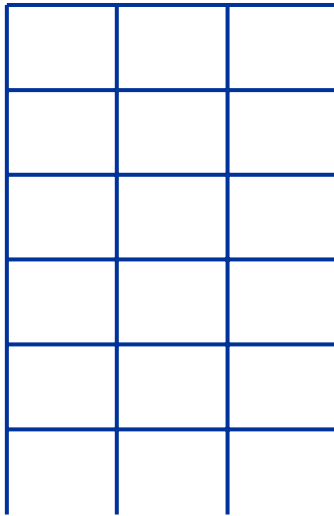
- Resistenza e duttilità variano con lo sforzo normale
- Se lo sforzo normale è alto:
 - È difficile schematizzare il legame con un a bilatera elastica-perfettamente plastica
 - C'è un ramo decrescente molto accentuato, con forte perdita di resistenza
 - La duttilità si riduce fortemente

Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

Problemi (per i pilastri - telai spaziali)

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

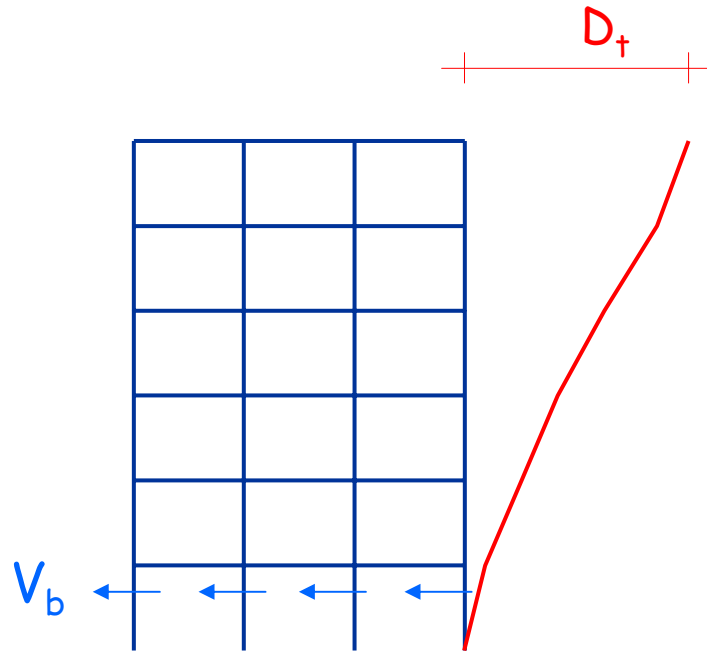
Risposta dinamica inelastica



La struttura si deforma nel tempo
La forma della deformata varia nel tempo
Compaiono e scompaiono cerniere

L'analisi dinamica non lineare fornisce
l'involuppo degli spostamenti

Risposta dinamica inelastica



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

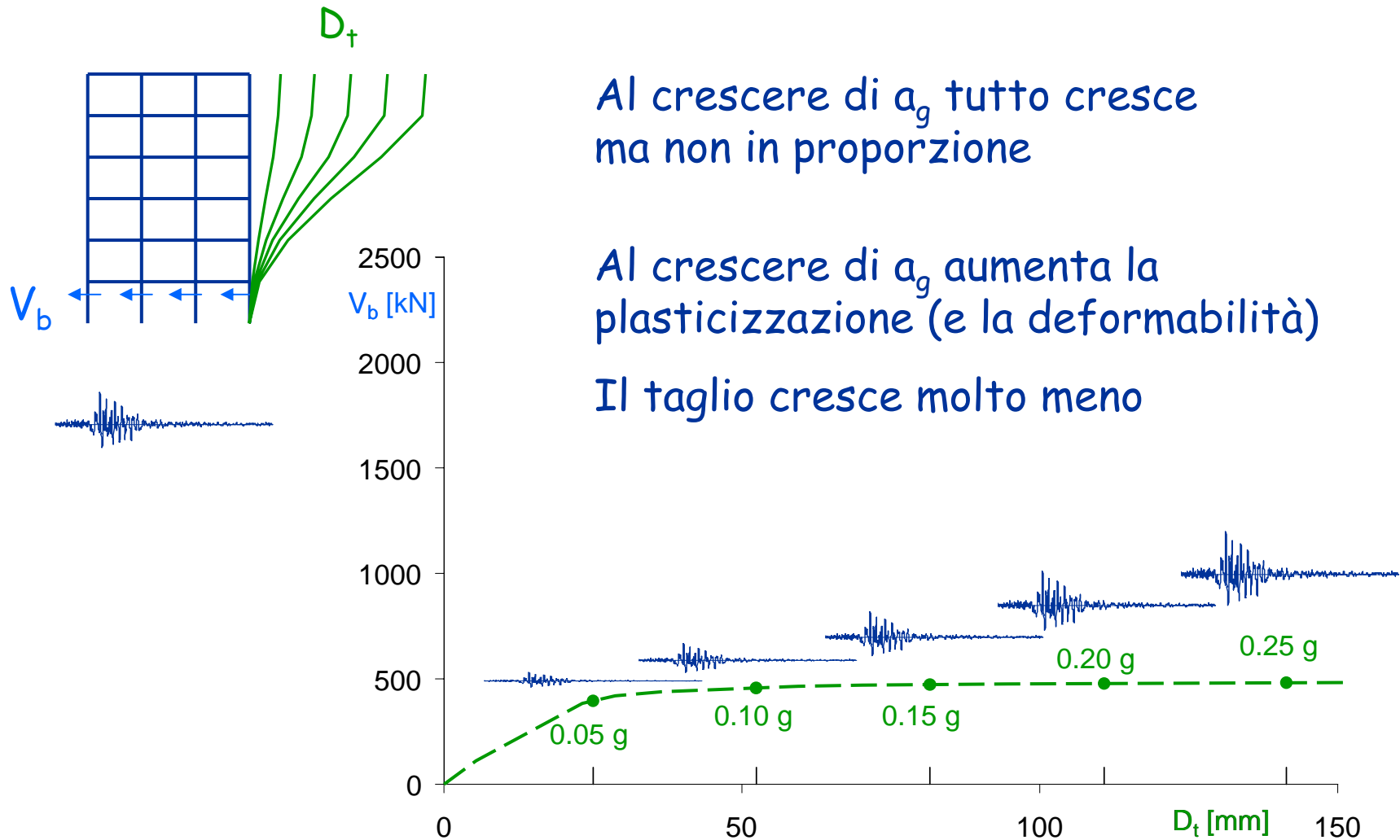
- Spostamenti
- Caratteristiche di sollecitazione
- Rotazioni plastiche

V_b taglio massimo al piede

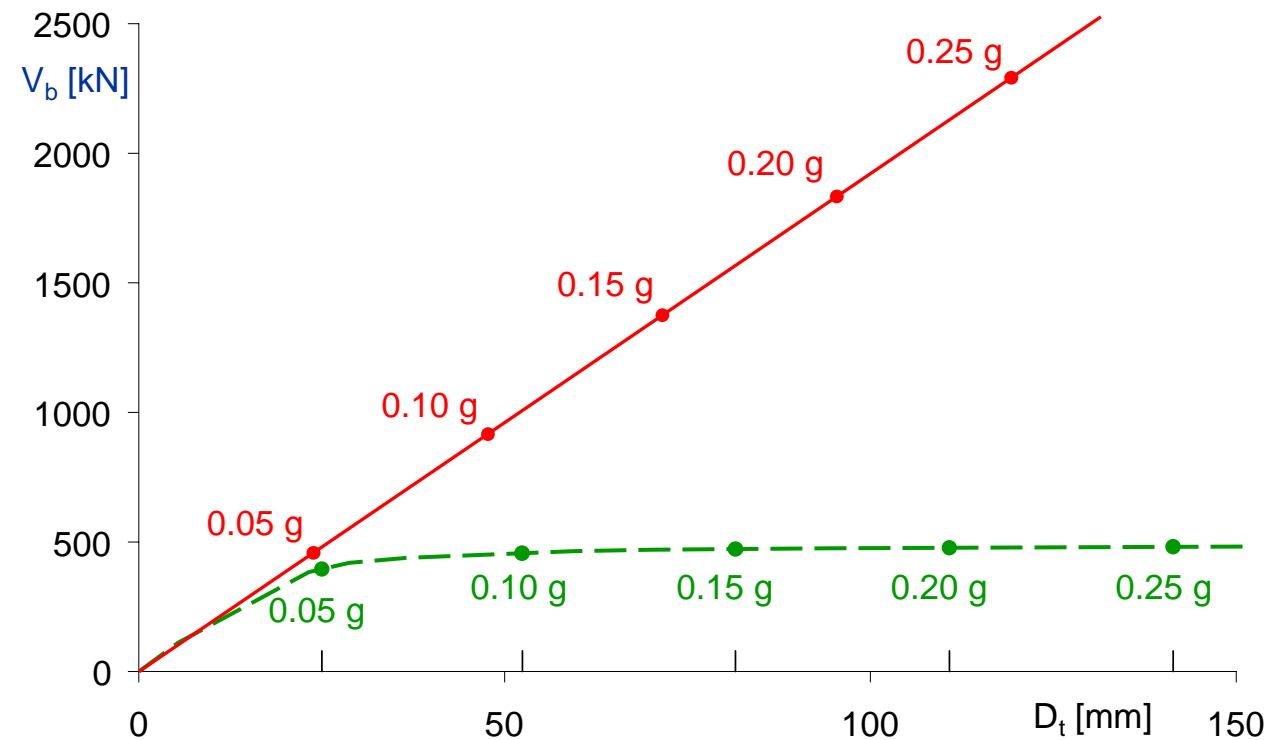
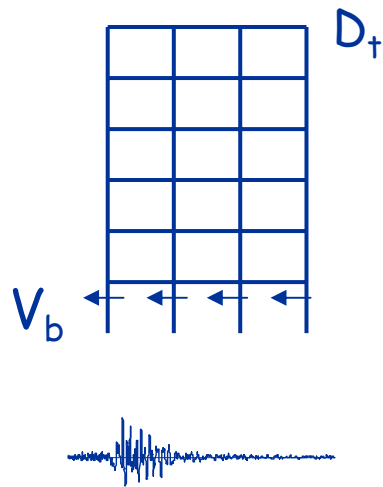


L'analisi dinamica non lineare fornisce l'involuppo degli spostamenti

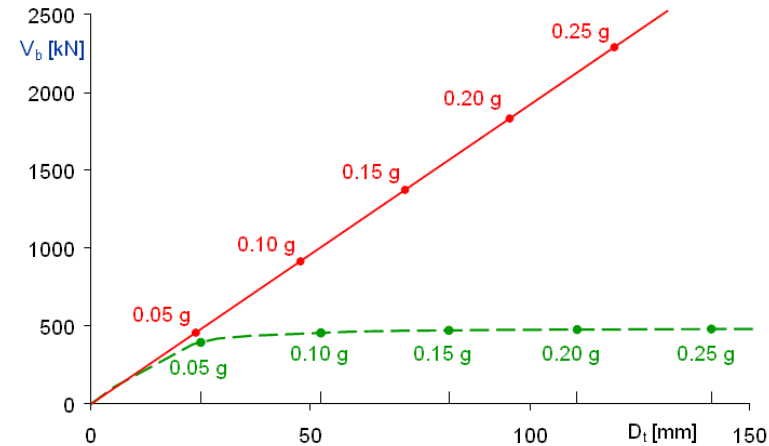
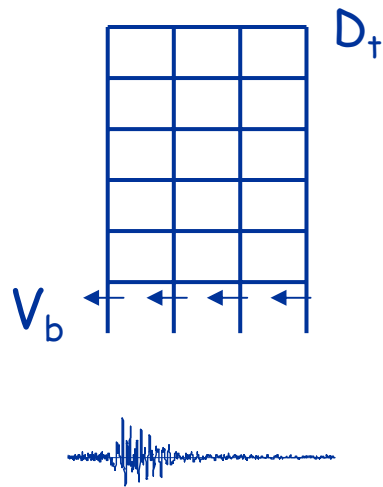
Risposta dinamica inelastica



Confronto tra risposta dinamica elastica e inelastica



Confronto tra risposta dinamica elastica e inelastica



Si noti che gli spostamenti in testa, a parità di a_g , potrebbero non cambiare molto nei due casi (comportamento elastico e plastico)

Può però essere molto diversa la distribuzione di spostamenti lungo l'altezza

Alternative
all'analisi dinamica inelastica

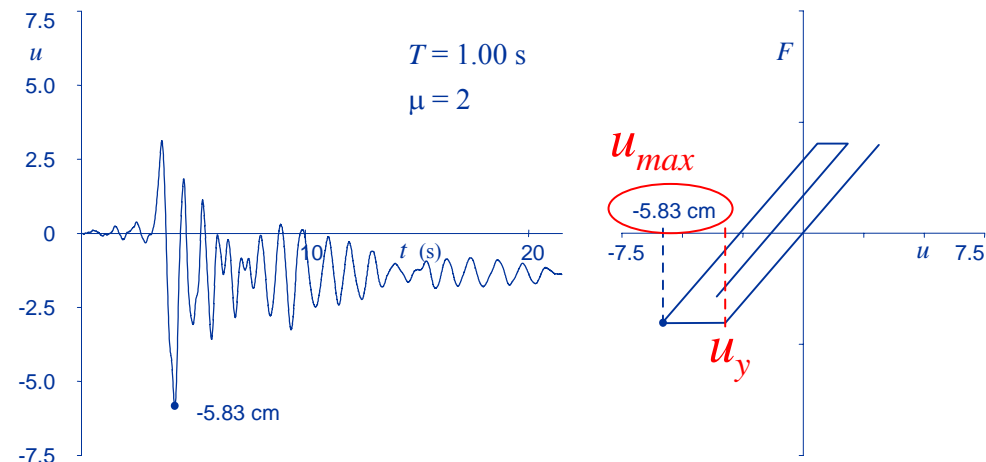
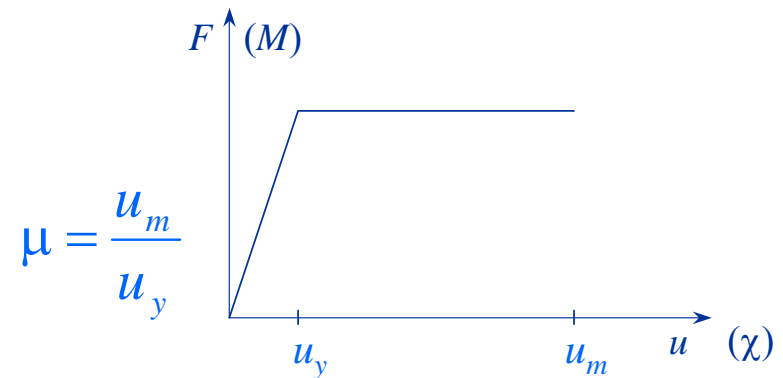
Progetto/verifica di strutture elasto-plastiche

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

sia maggiore di
quella richiesta

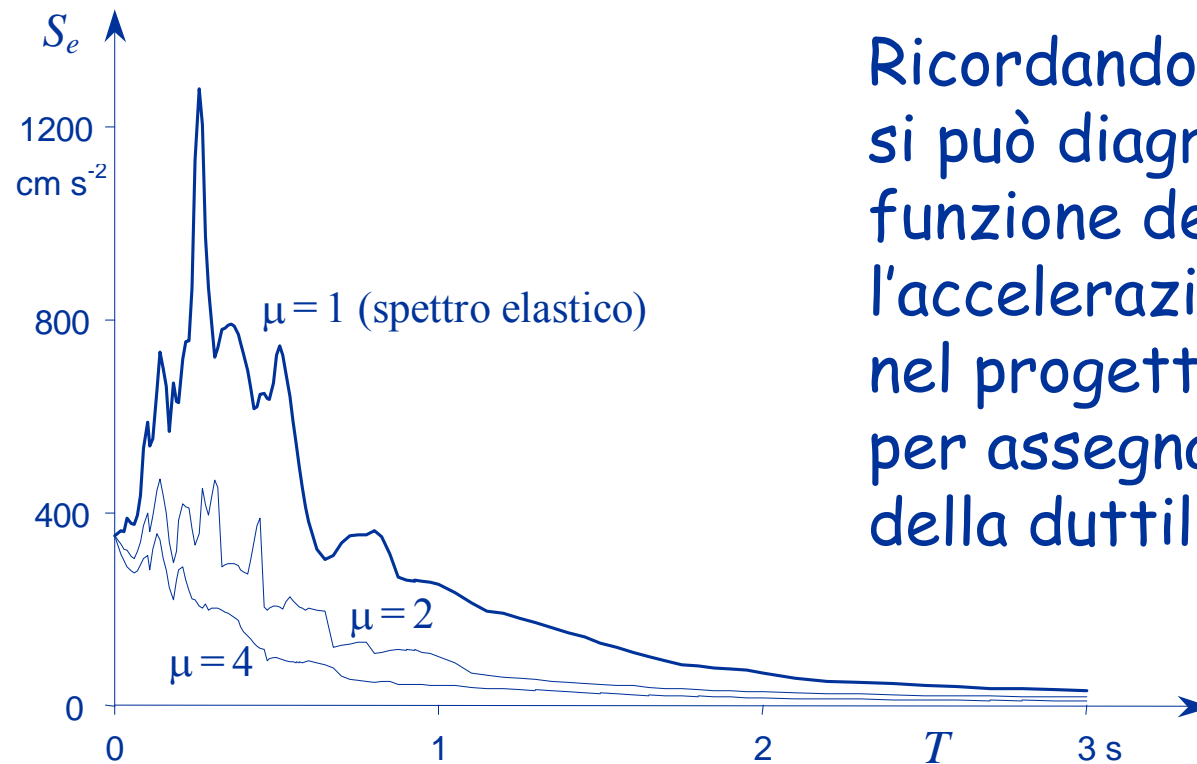
$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y}$$

Risposta
elasto-plastica



Progetto/verifica di strutture elasto-plastiche

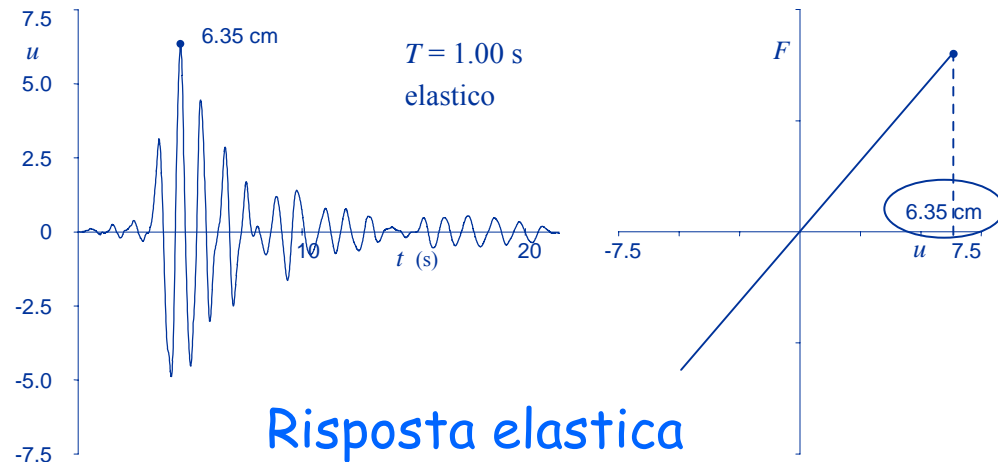
La resistenza può essere ridotta tanto da far coincidere la duttilità disponibile con quella richiesta



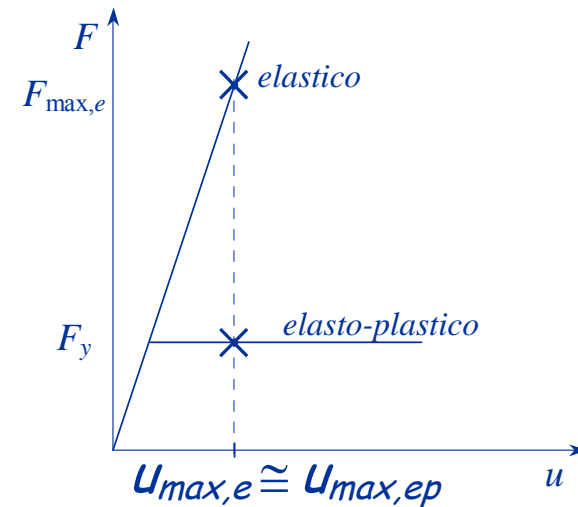
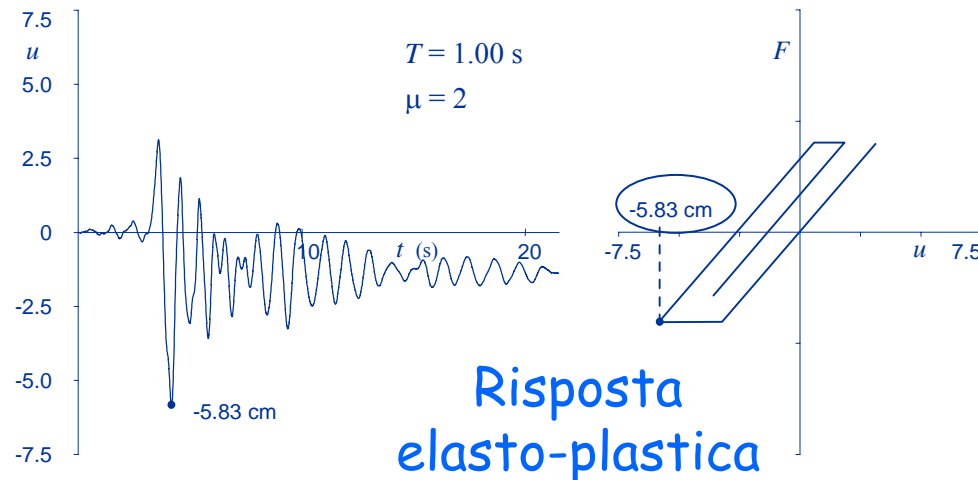
Ricordando che $F = m a$,
si può diagrammare in
funzione del periodo
l'accelerazione da usare
nel progetto,
per assegnati valori
della duttilità μ

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

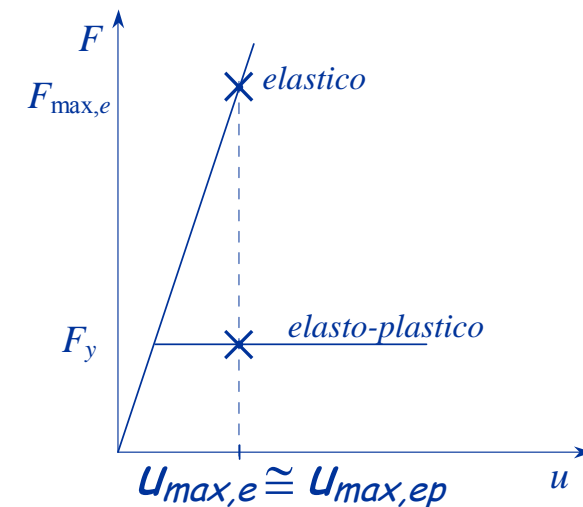
la forza necessaria
per mantenere la
struttura in campo
elastico

per la duttilità

 F_d $F_{max,e}$ μ

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

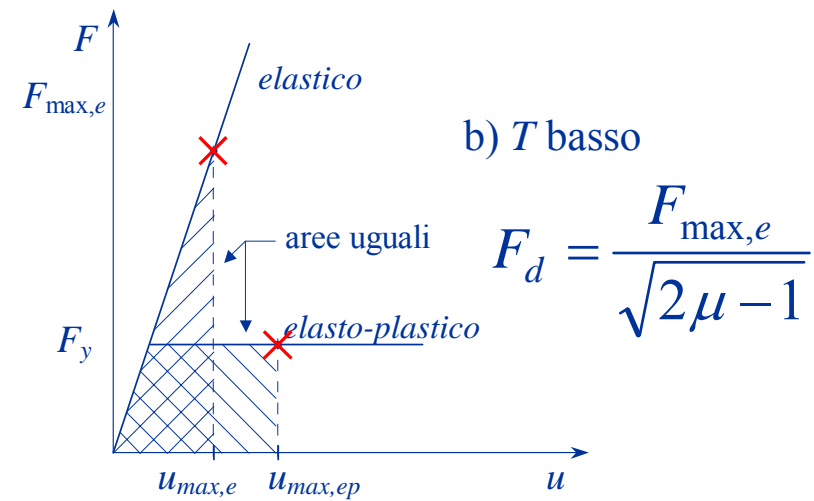
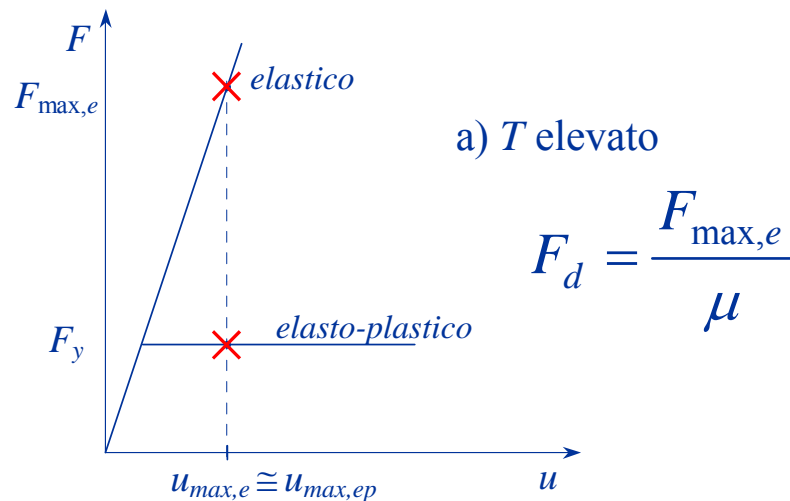
Le analisi numeriche
mostrano che lo
spostamento di
schemi elastici ed
elasto-plastici è più
o meno lo stesso



Progettazione di strutture elasto-plastiche

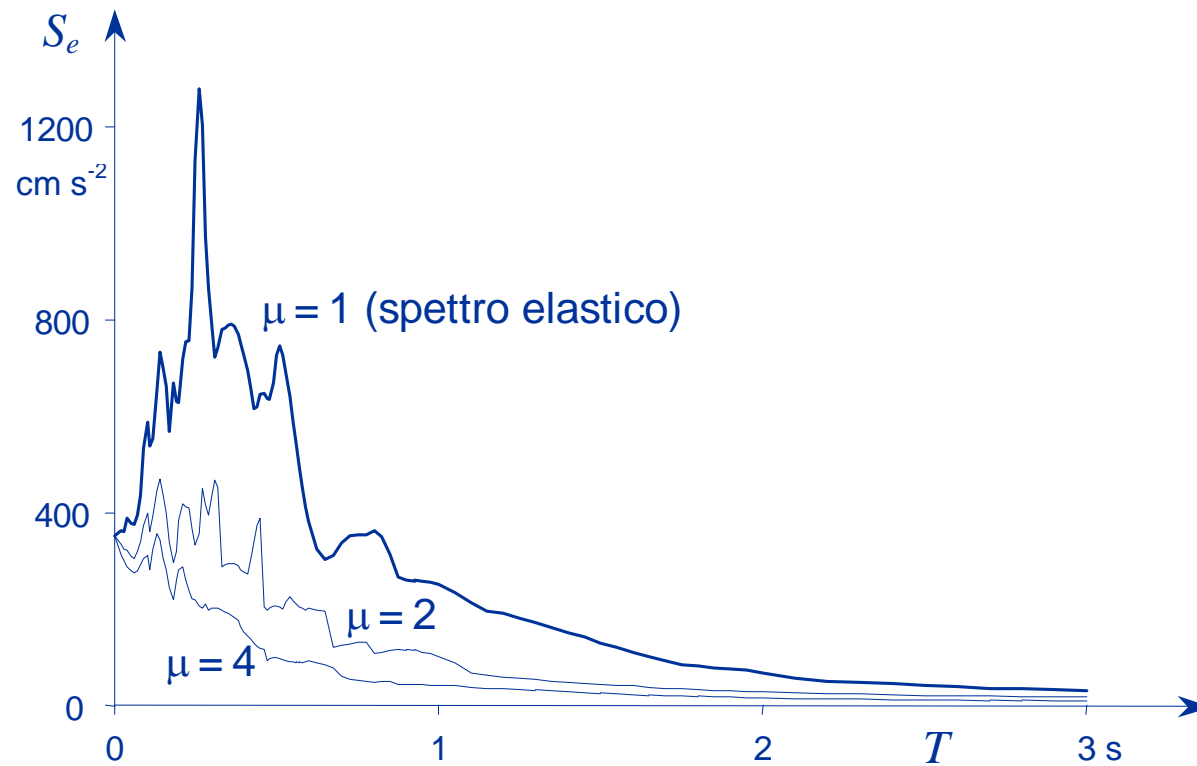
Il principio di uguaglianza di spostamenti vale solo
per strutture con periodo medio-alto

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



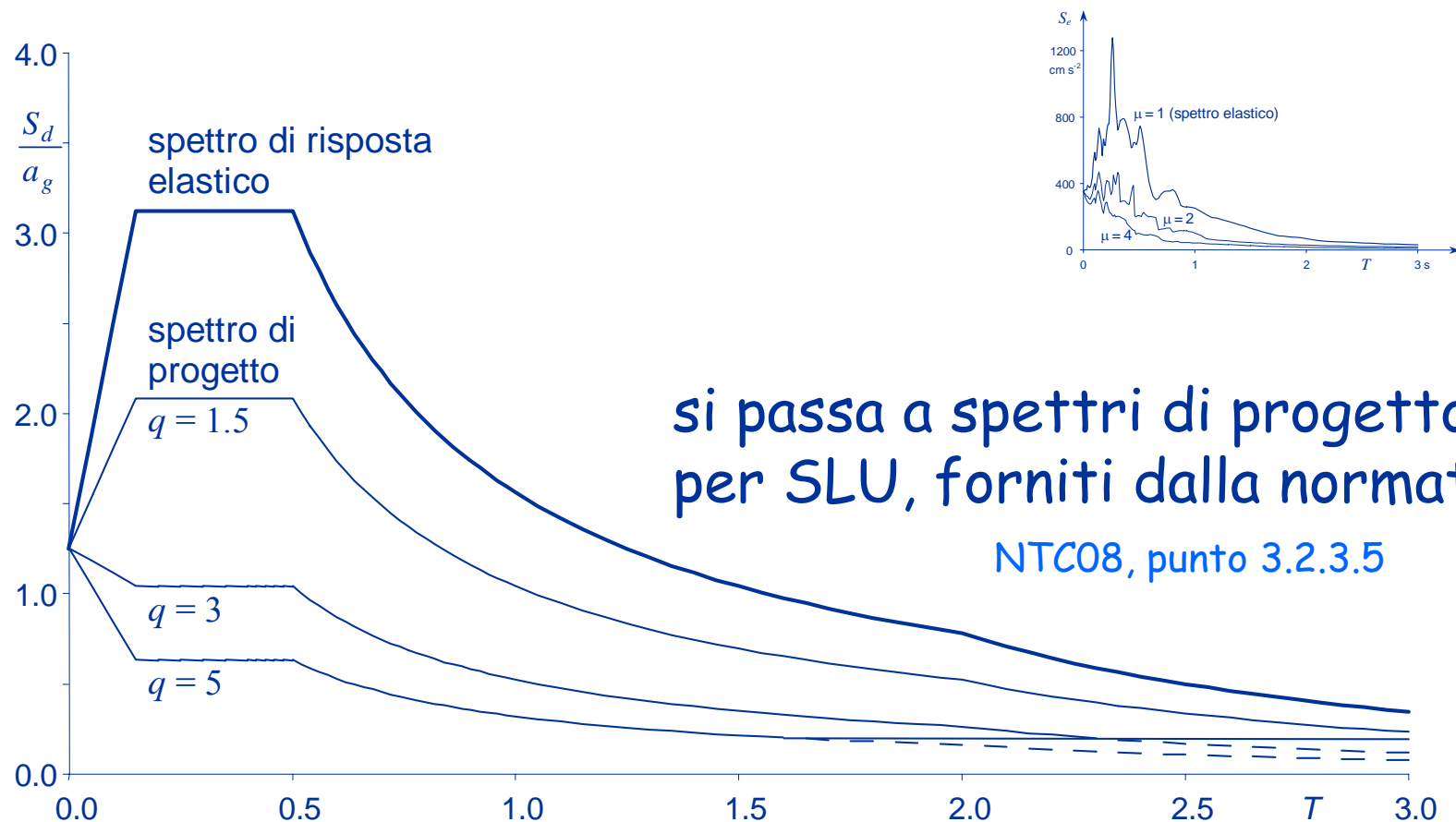
Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata



Spettri di progetto di normativa

Dagli spettri di risposta a duttilità assegnata

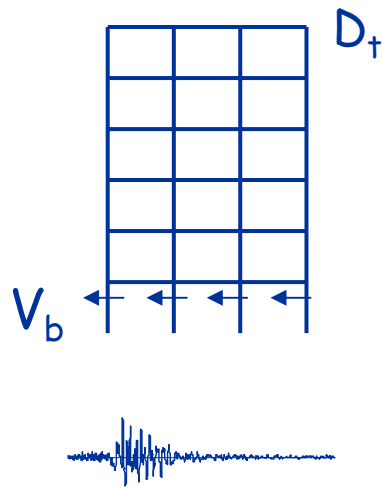


Progetto a duttilità assegnata

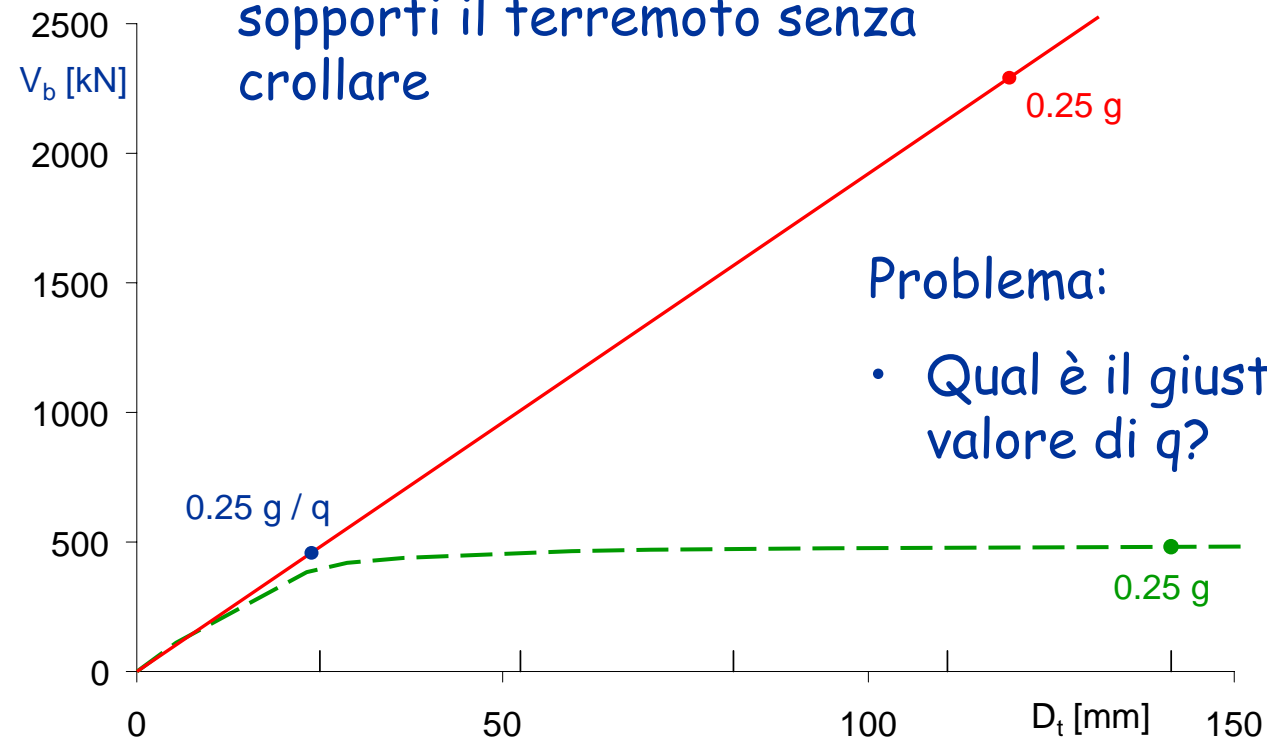
- Nota la duttilità, si può ricavare l'accelerazione (e quindi le forze) di progetto dagli spettri di risposta a duttilità assegnata.
- Risolvendo lo schema strutturale soggetto a queste forze (con analisi lineare) si verificano le sezioni.
- Se la struttura sopporta queste azioni ed ha la duttilità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

Alternative all'analisi dinamica inelastica

Analisi modale e riduzione con fattore di struttura q



Si ipotizza che, grazie alla duttilità, una struttura progettata con forze ridotte sopporti il terremoto senza crollare

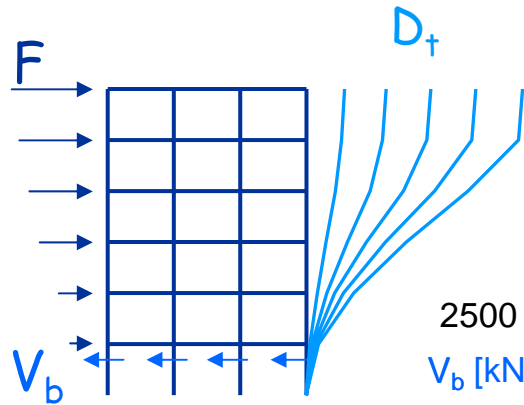


Problema:

- Qual è il giusto valore di q ?

Alternative all'analisi dinamica inelastica

Analisi statica non lineare



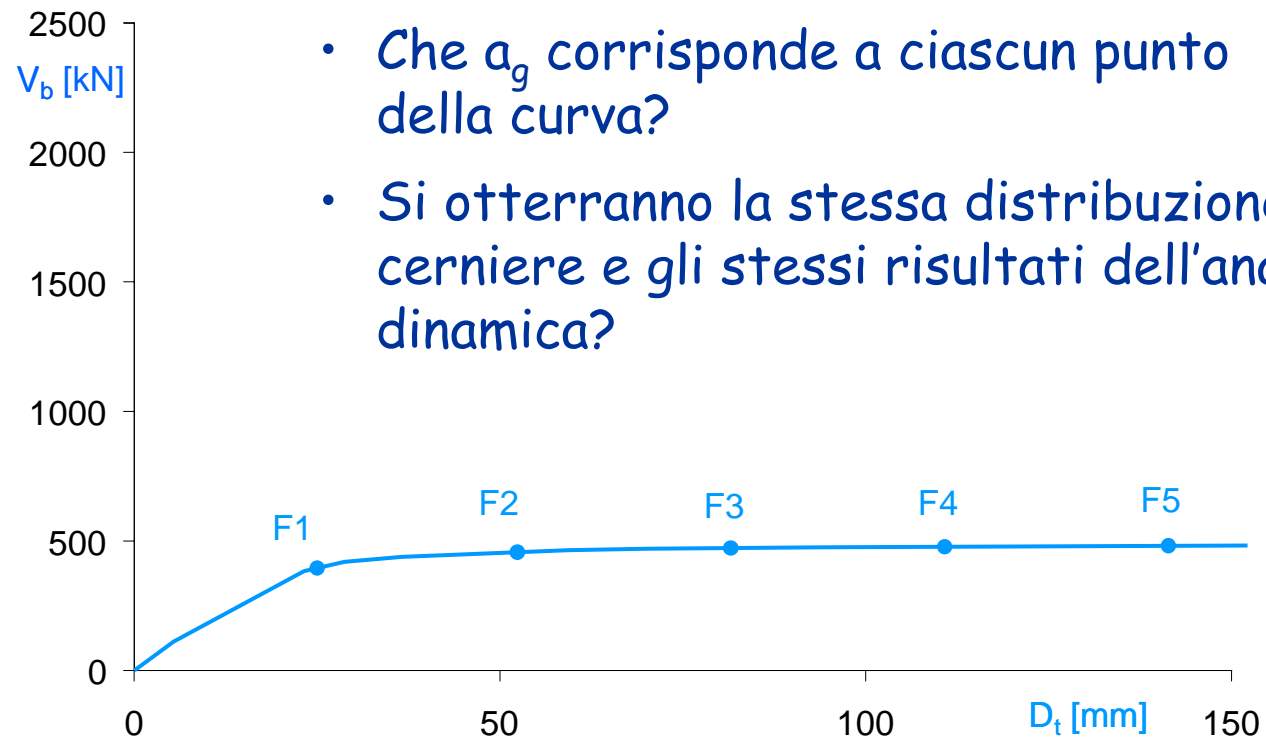
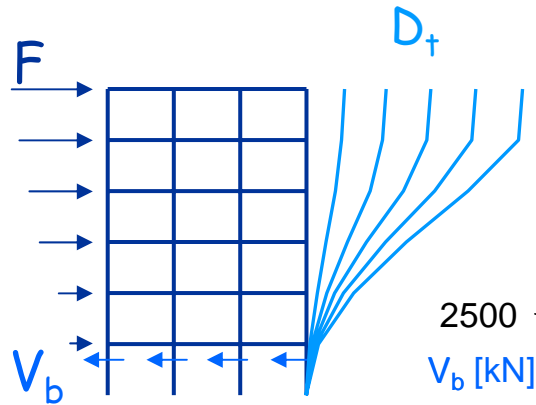
Si applica una distribuzione di F
e la si fa crescere

Al crescere di F si ha una
progressiva plasticizzazione
della struttura



Alternative all'analisi dinamica inelastica

Analisi statica non lineare



Problemi:

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

Collasso di un edificio

- Rottura fragile:
rottura a taglio delle sezioni di pilastri e travi,
rotture a taglio dei nodi, scorrimento tra testa
pilastro e trave in corrispondenza alle riprese di
getto
- Rottura per esaurimento della duttilità:
estese plasticizzazioni agli estremi delle aste, fino
al raggiungimento della rotazione ultima di una
sezione

Rottura fragile

- Edifici antisismici di nuova progettazione:
la rottura fragile viene evitata con il criterio di gerarchia delle resistenze
(gerarchia taglio-flessione)
- Edifici esistenti:
il rischio di rottura fragile è forte
la rottura spesso avviene già per bassi valori di a_g

Si può verificare in termini di resistenza,
con analisi lineare, senza fattore di struttura (o con
valore molto basso)

Rottura per esaurimento della duttilità

- Edifici antisismici di nuova progettazione:
una richiesta eccessiva di duttilità viene evitata con
il criterio di gerarchia delle resistenze
(gerarchia pilastro-trave, per evitare meccanismi di
piano)
- Edifici esistenti:
potrebbero esserci meccanismi di piano che fanno
esaurire presto la duttilità

Si può verificare in termini di resistenza,
con analisi lineare, con basso fattore di struttura

Oppure in termini di deformazioni,
con analisi lineare o non lineare