

Corso di aggiornamento professionale

**Valutazione della vulnerabilità sismica
di edifici esistenti in c.a.**

Parma

27-28 maggio 2016

Aurelio Gheresi

02 - Lineare o non lineare? E non lineare come?

Analisi strutturale

Il comportamento di una struttura (per carichi verticali o per azione sismica) può essere analizzato con

- Analisi lineare
- Analisi non lineare

- Perché questa distinzione?
- Come si comportano realmente le strutture?

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in acciaio

- Materiale: elastico lineare (fino allo snervamento)



Il comportamento è effettivamente elastico lineare

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Acciaio: elastico lineare (fino allo snervamento)
- Calcestruzzo: approssimativamente lineare, ma con scarsa resistenza a trazione



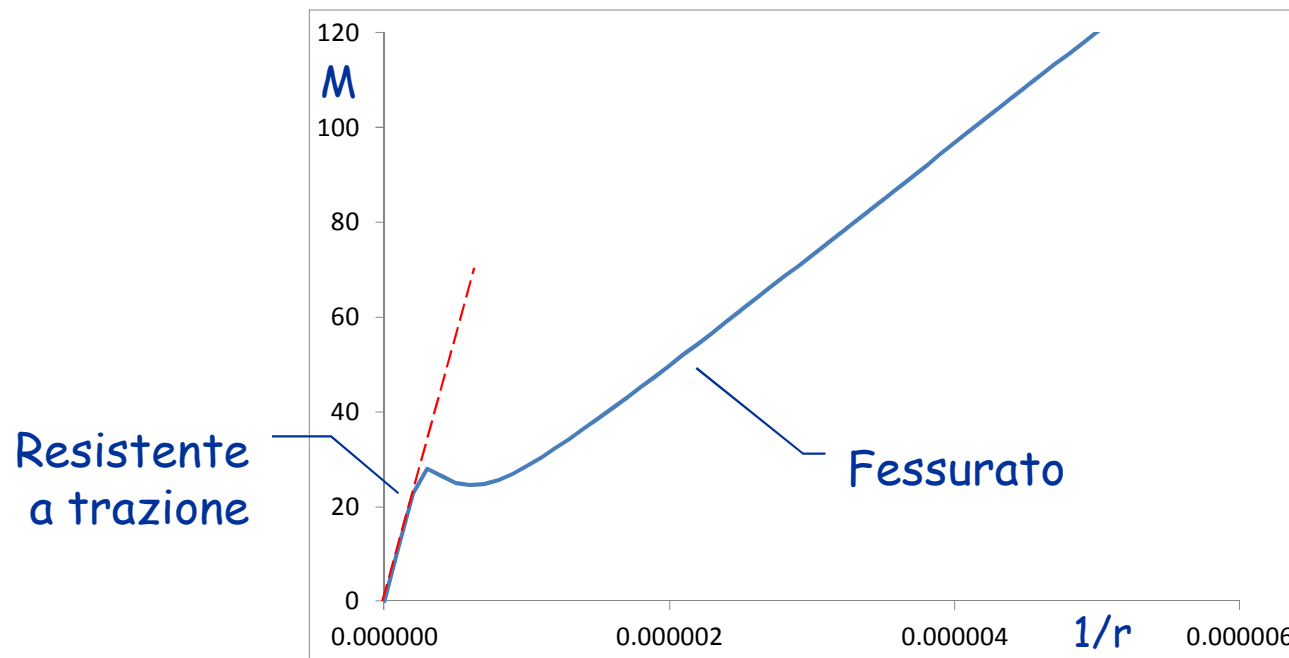
Si fa riferimento alla sezione omogeneizzata (primo stadio) o alla sezione reagente omogeneizzata (secondo stadio di comportamento)

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute alla fessurazione



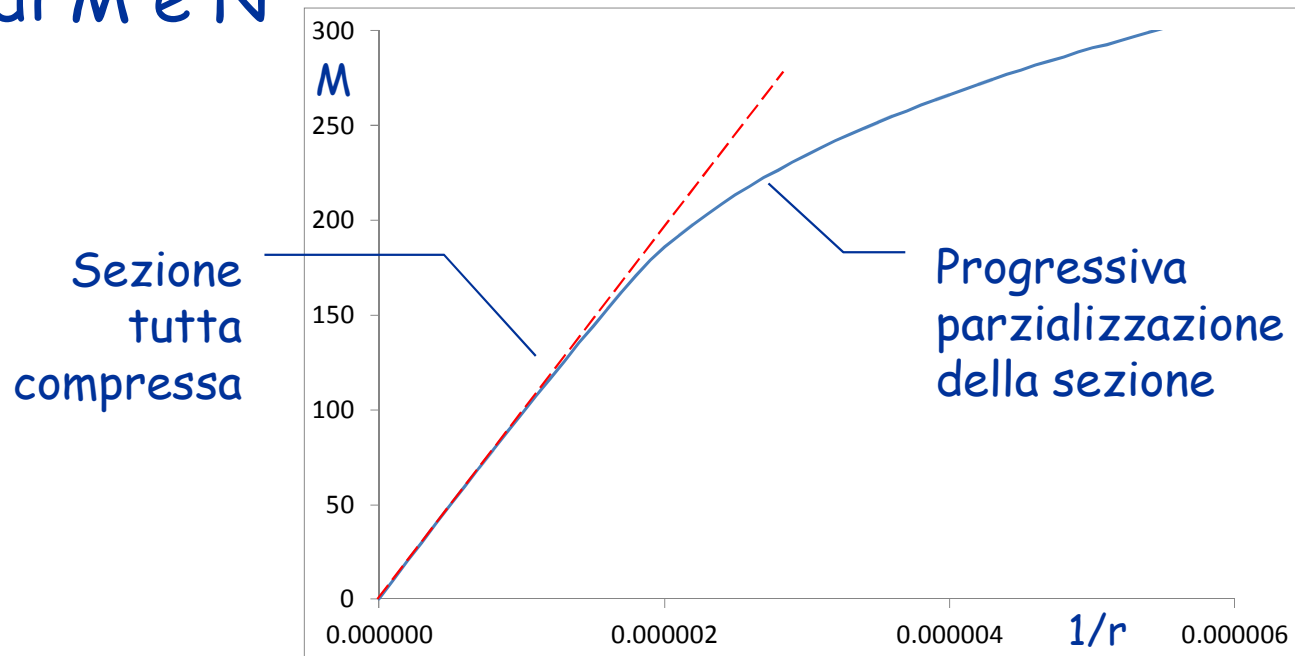
Esempio:
Trave
(elemento
soggetto solo
a flessione)

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute a variazione non proporzionale di M e N



Esempio:
Pilastro
(elemento
soggetto a
flessione
composta)
con N
costante

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato



Il comportamento reale non è elastico lineare



E allora cosa si fa?

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Prime idee (ad esempio per volte in c.a.):
 - Determinare lo stato tensionale nell'ipotesi di materiale omogeneo a comportamento lineare
 - Disporre armatura diffusa dove il calcestruzzo teso non è in grado di portare tensioni

Non perfettamente identico a livello deformativo,
ma abbastanza corretto

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Successivamente (ad esempio per travi):
 - Disporre armatura non diffusa bensì concentrata agli estremi, per massimizzarne il contributo a flessione
 - Risolvere gli schemi strutturali con modello lineare (per comodità operativa si fa riferimento alla sola sezione geometrica)

Non corretto, ma garantisce adeguata resistenza

Comportamento delle strutture Lineare?

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
 - Per strutture isostatiche nessun dubbio, perché basta garantire adeguata resistenza
 - Per strutture iperstatiche non si valuta correttamente la distribuzione delle azioni tra i singoli elementi ...
... ma gli effetti viscosi (che possono ridistribuire le azioni) e plastici (col teorema statico dell'analisi limite) garantiscono la sicurezza della struttura

Comportamento delle strutture Lineare?

Per carichi più forti

Strutture in acciaio

- Materiale: elasto-plastico, con incrudimento
(trascurabile)



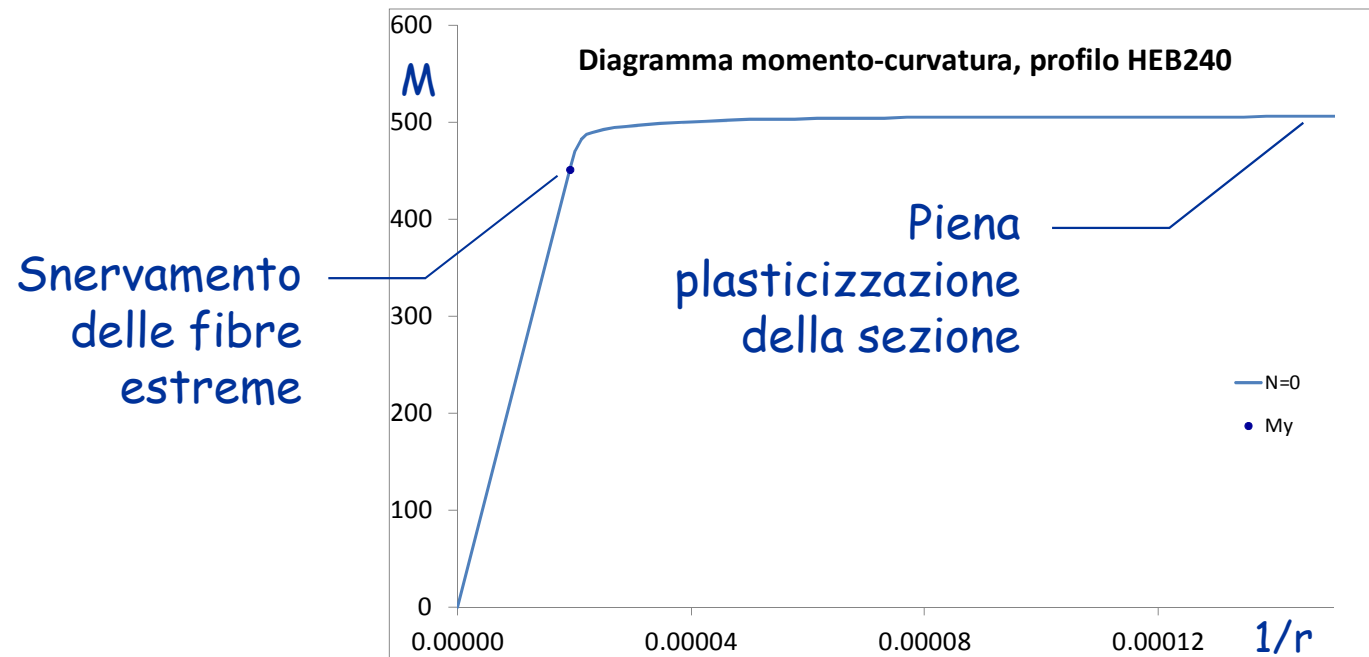
Il comportamento non è più elastico lineare

Comportamento delle strutture Lineare?

Per carichi più forti

Strutture in acciaio

- Non linearità dovute al legame σ - ϵ



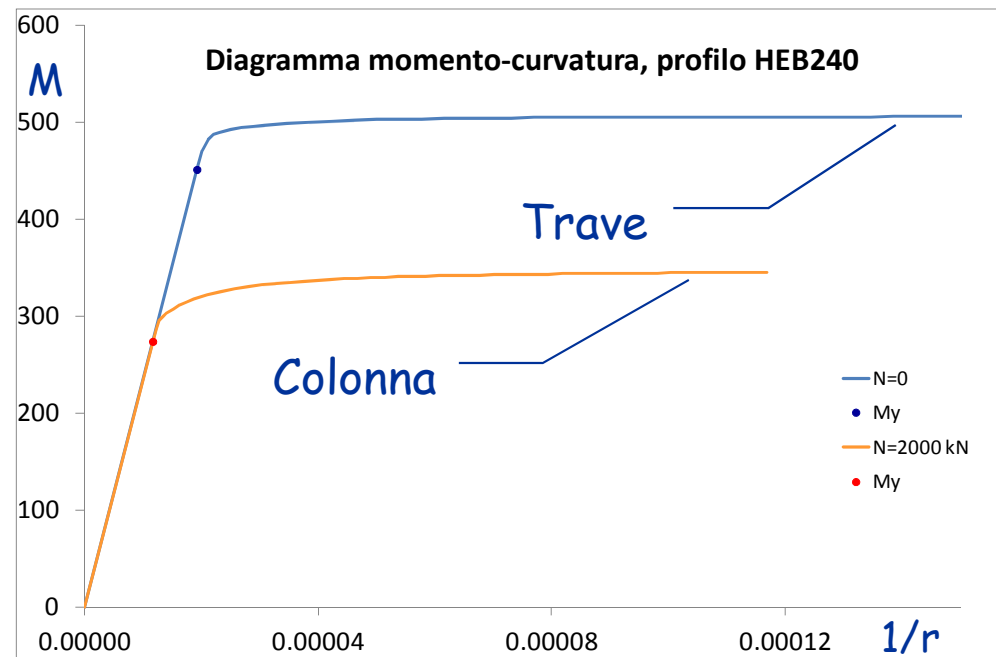
Esempio:
Trave
(elemento
soggetto solo
a flessione)

Comportamento delle strutture Lineare?

Per carichi più forti

Strutture in acciaio

- Non linearità dovute al legame σ - ε



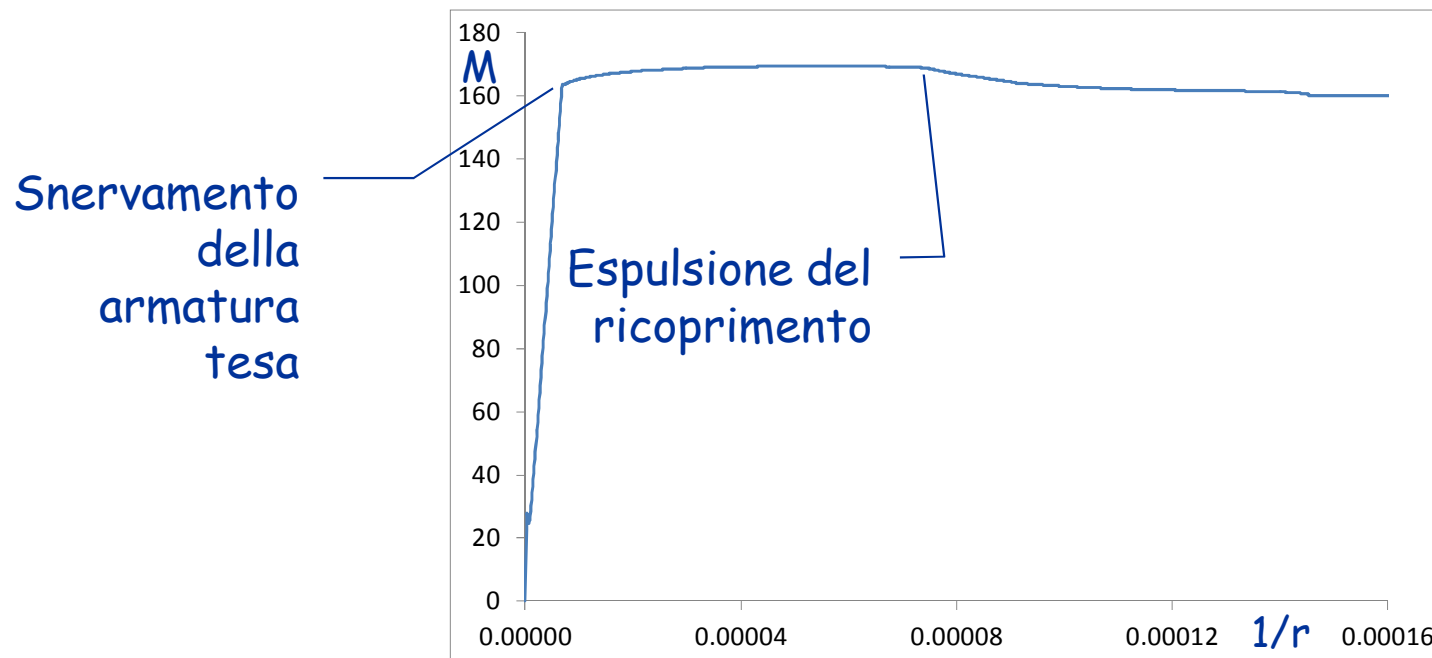
Comportamento
analogo anche
in presenza di
flessione
composta

Comportamento delle strutture Lineare?

Per carichi più forti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ - ϵ



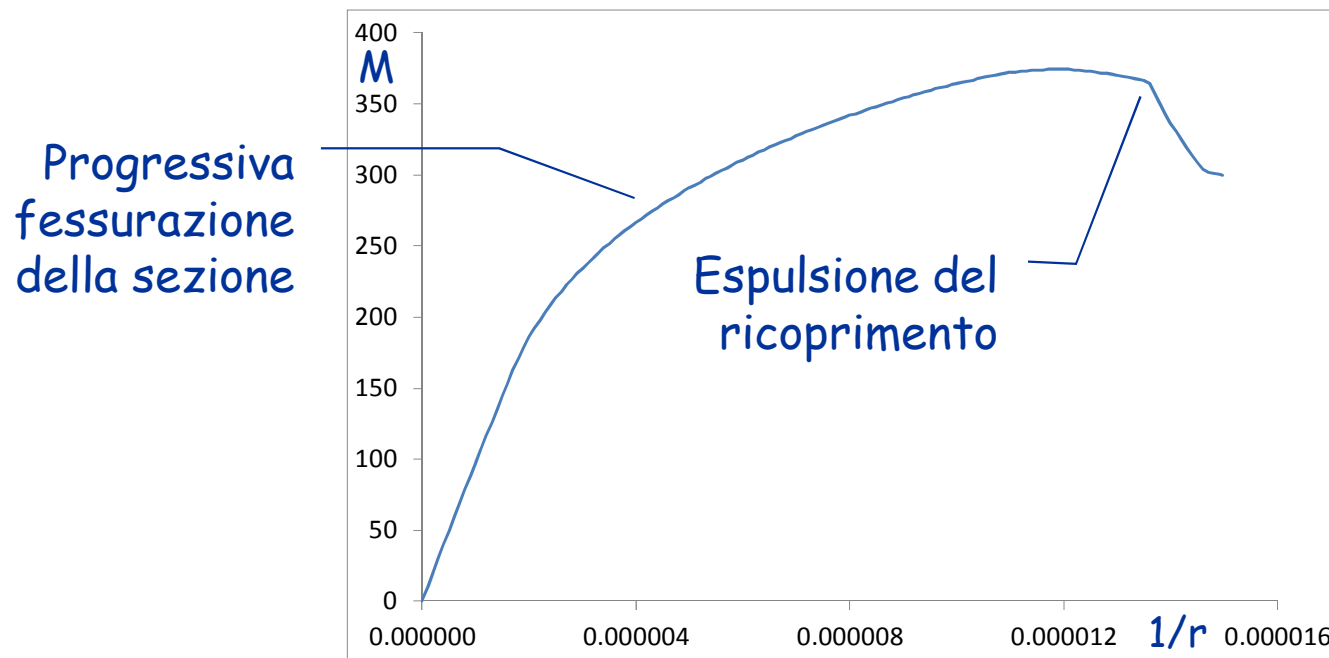
Esempio:
Trave
(elemento
soggetto solo
a flessione)

Comportamento delle strutture Lineare?

Per carichi più forti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ - ϵ



Esempio:
Pilastro
(elemento
soggetto a
flessione
composta)
con N
costante

Comportamento delle strutture Lineare?

Per carichi più forti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ - ε

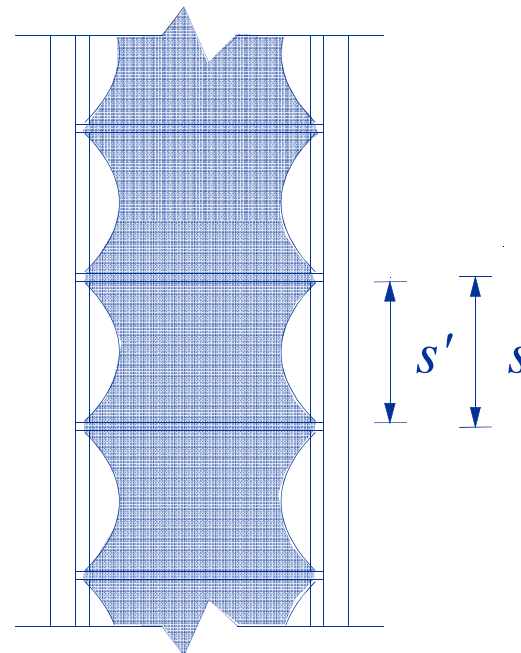
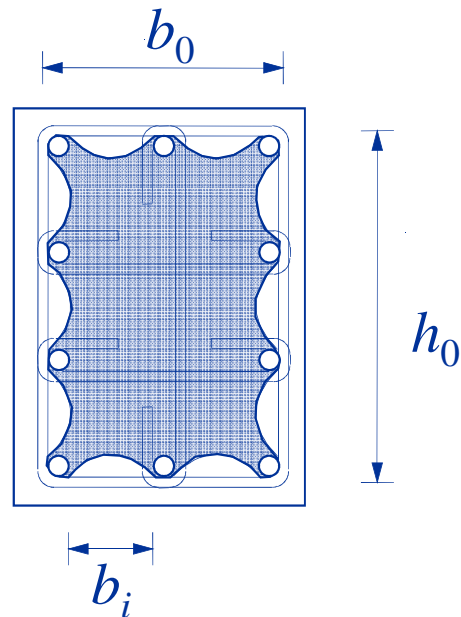
Per una valutazione numerica occorre:

- definire un legame σ - ε per il calcestruzzo
(ne esistono fin troppi)
- tener conto dell'effetto del confinamento sulla resistenza e duttilità del calcestruzzo
- definire un legame σ - ε per l'acciaio
(in genere elastico-perfettamente plastico)

Modello per i materiali calcestruzzo

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Valutazione dell'effetto del confinamento
- Efficacia del confinamento



Modello per i materiali calcestruzzo

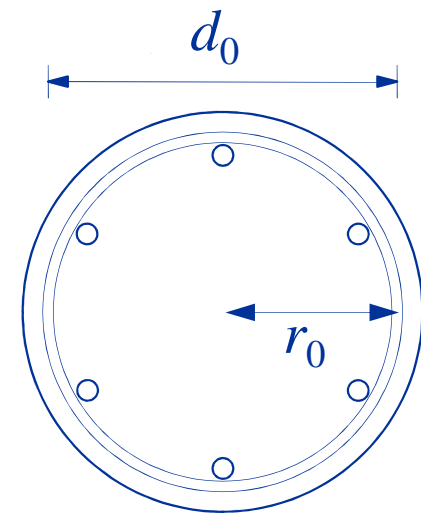
Effetto del confinamento:

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



La compressione
trasversale migliora il
comportamento del
calcestruzzo

Modello per i materiali calcestruzzo

Efficacia del confinamento:

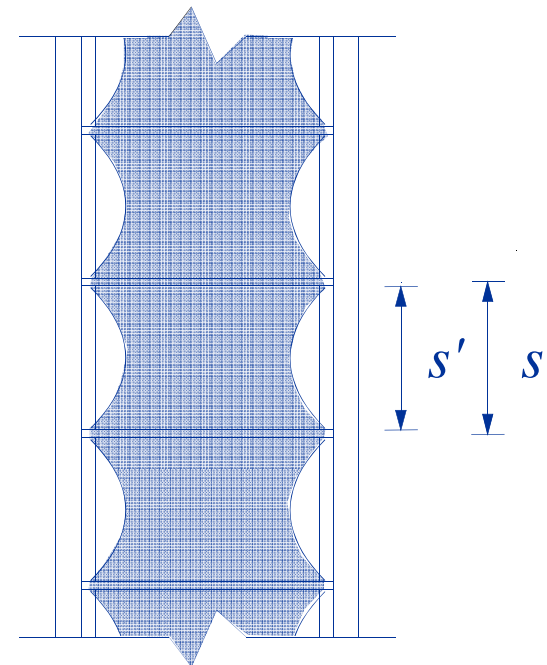
- Staffe in una sezione circolare

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



Modello per i materiali calcestruzzo

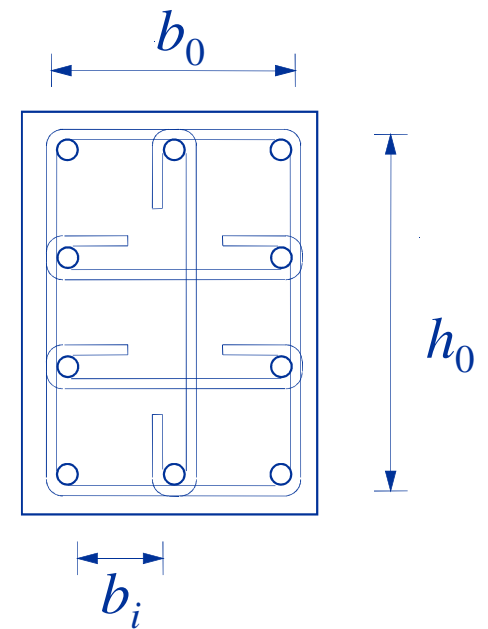
Effetto del confinamento:

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



Modello per i materiali calcestruzzo

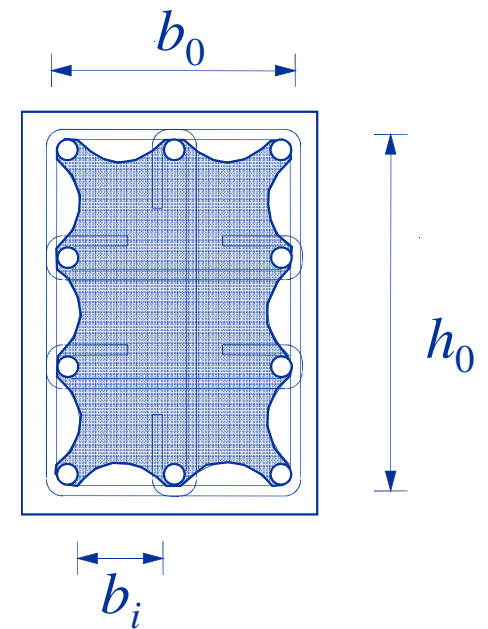
Efficacia del confinamento:

- Staffe in una sezione rettangolare

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

Si considera un coefficiente di efficacia

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



Modello per i materiali calcestruzzo

Efficacia del confinamento:

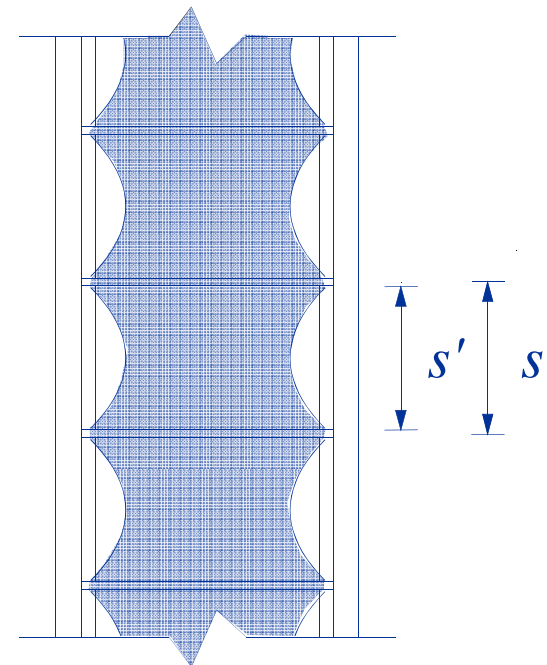
- Staffe in una sezione rettangolare

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

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

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

con $\alpha = \alpha_s \alpha_n$

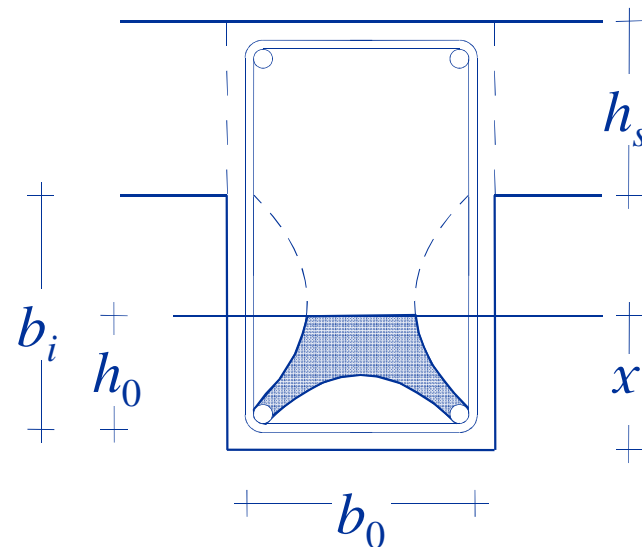
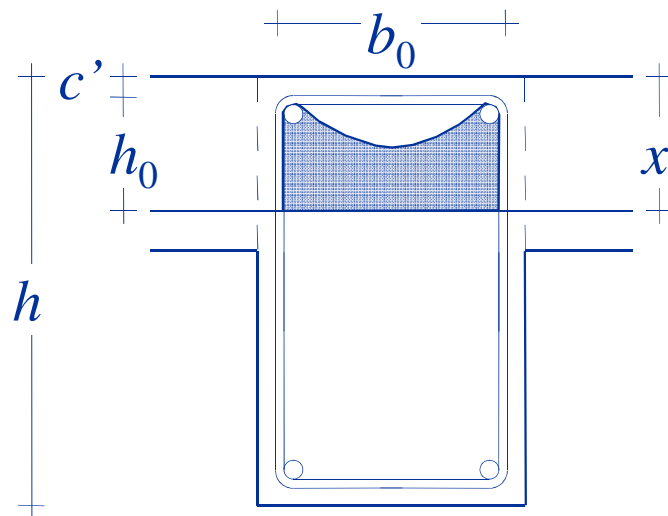


Modello per i materiali calcestruzzo

Effetto del confinamento:

- Staffe in una trave

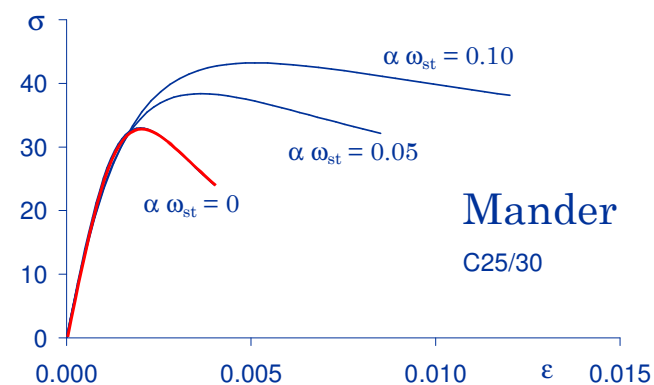
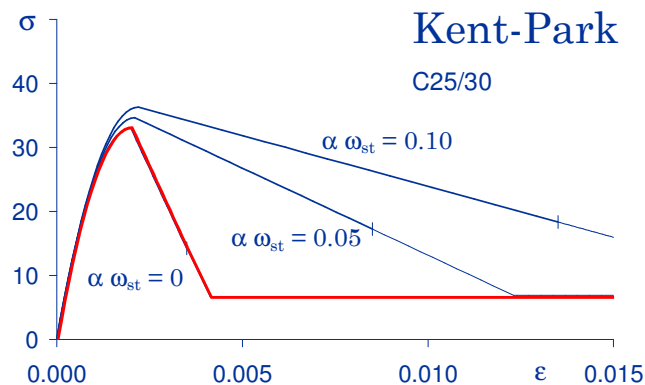
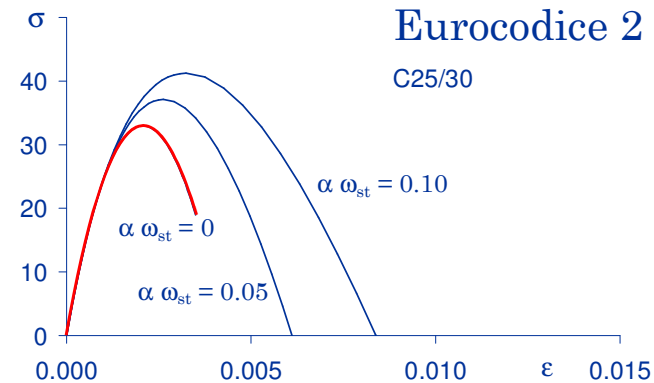
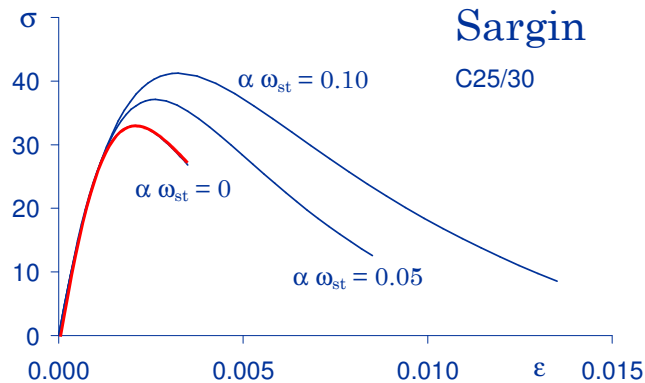
Nel valutare l'efficacia del confinamento bisogna tener conto di qual è la parte compressa e come viene confinata



Modello per i materiali calcestruzzo

Modelli:

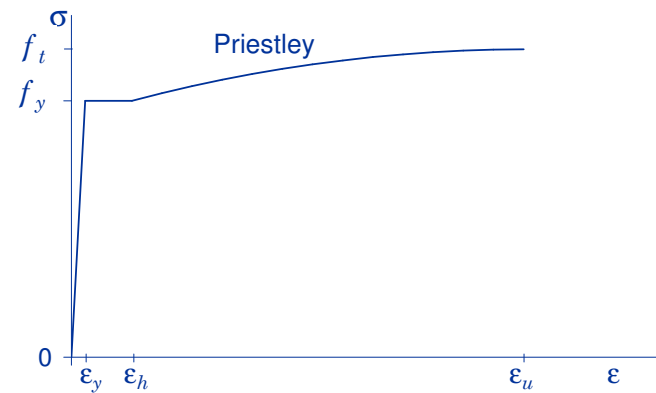
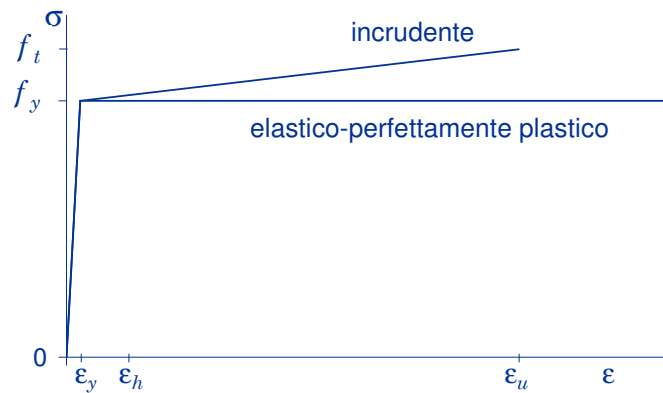
- Esistono numerose proposte, molto diverse



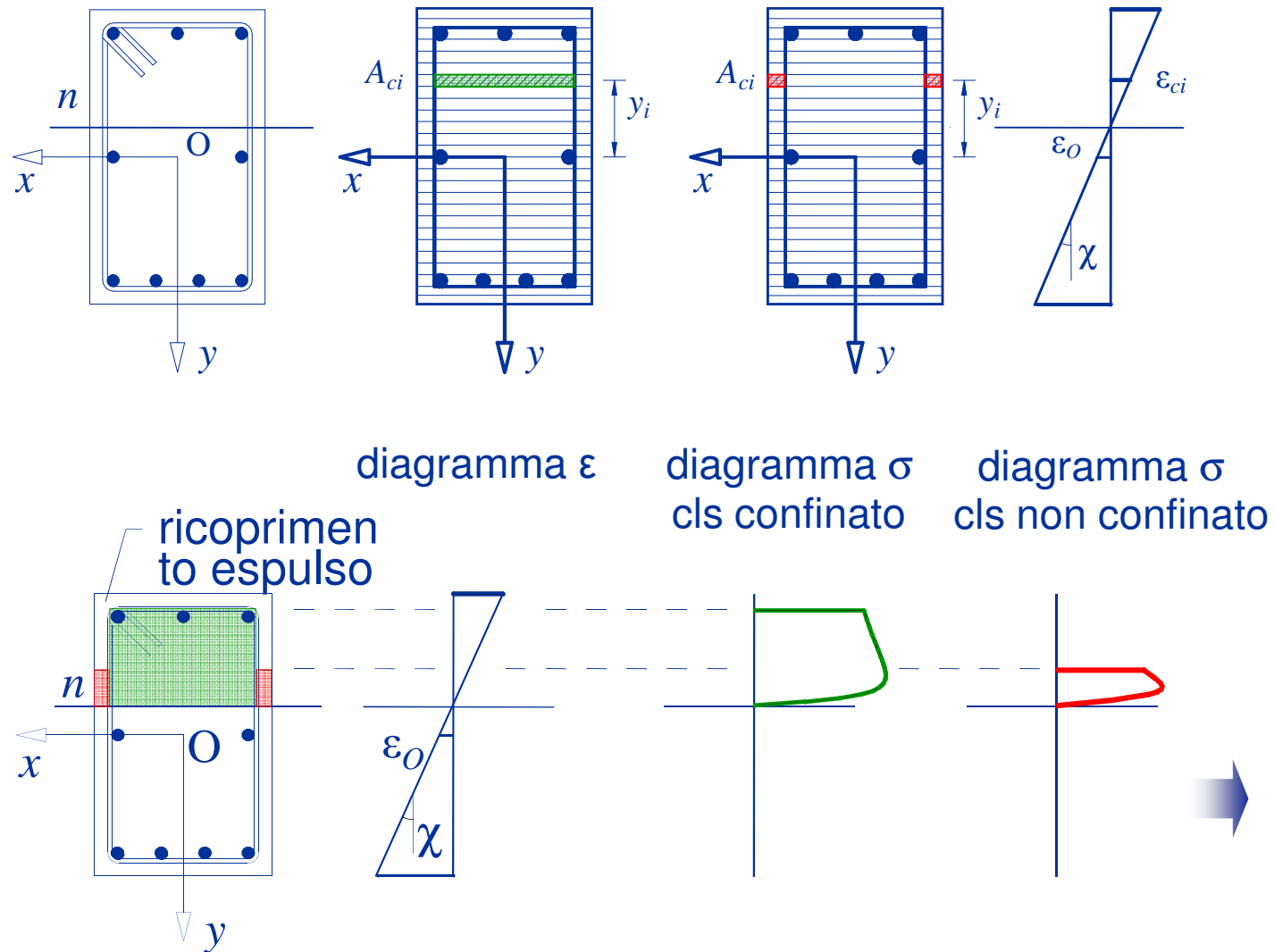
Modello per i materiali acciaio

Modelli:

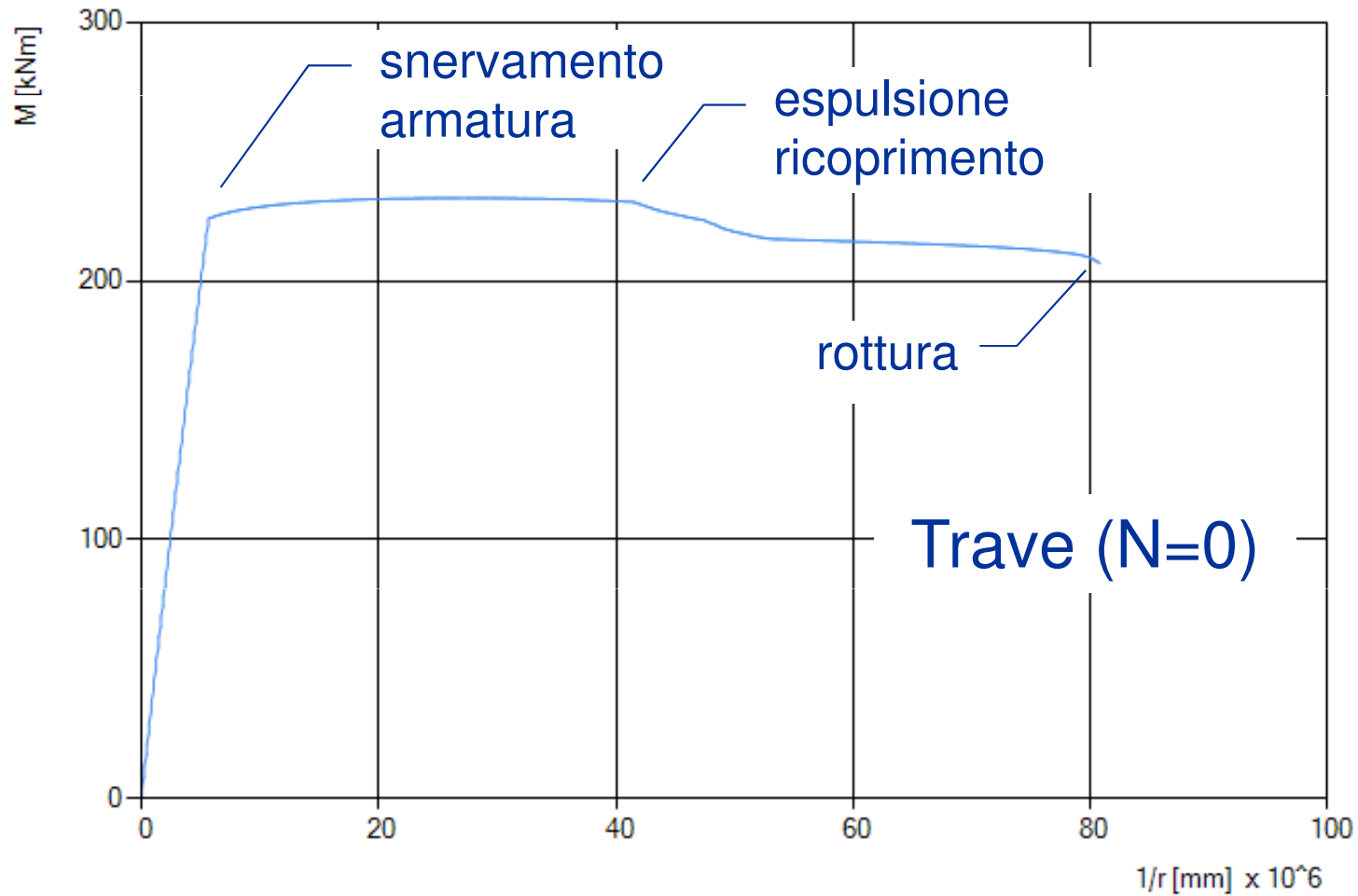
- Esistono alcune proposte, leggermente diverse



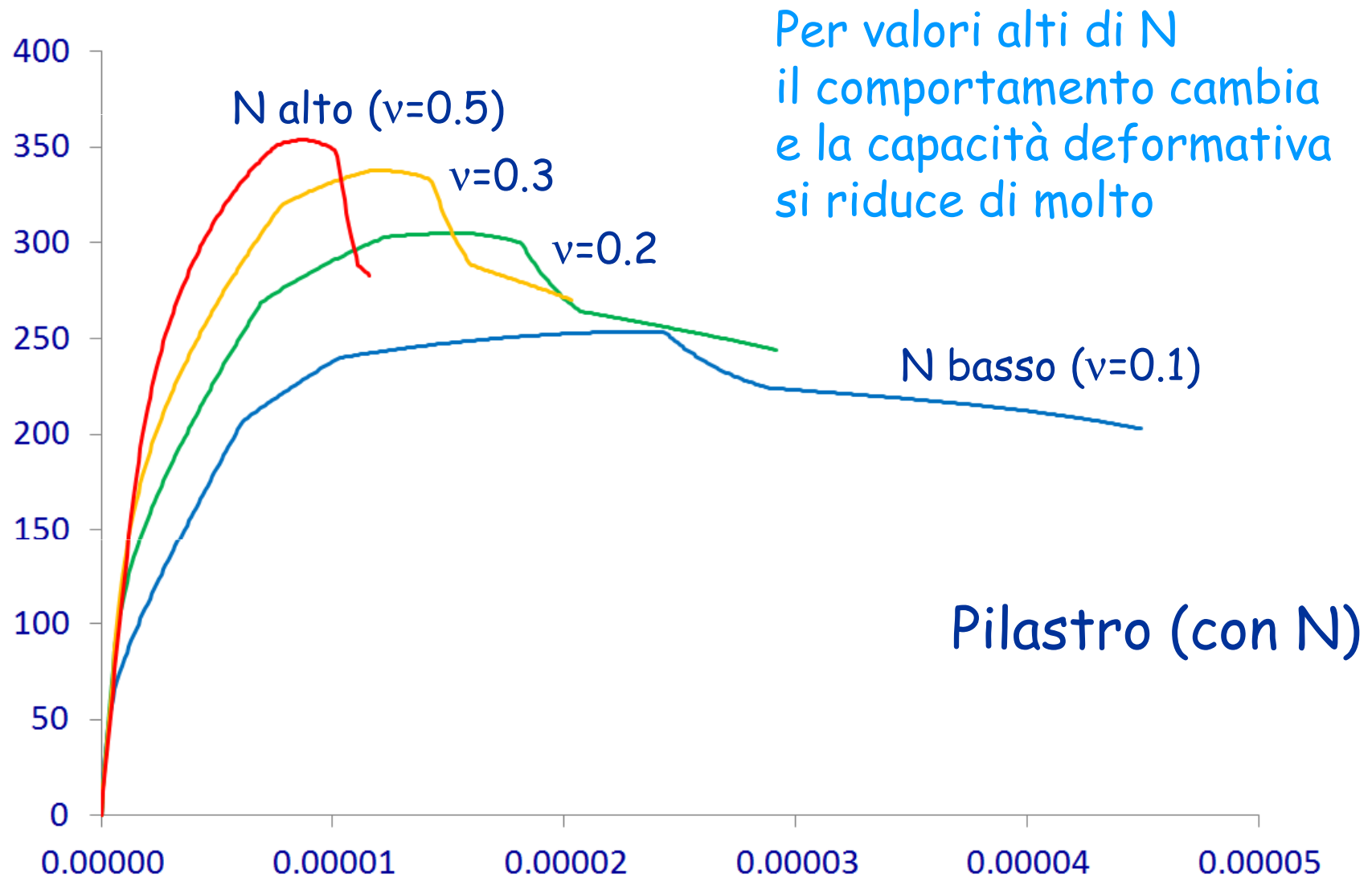
Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



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)

Il programma RC_NL può essere scaricato liberamente dal sito www.agherssi.it

Comportamento delle strutture

Quando occorre tener conto della non linearità?

- Strutture soggette solo a carichi verticali o vento
 - No, perché non si va molto oltre il limite elastico
- Progetto di strutture soggette solo a sisma
 - Non essenziale, perché i criteri di progettazione garantiscono comunque una resistenza, una duttilità locale ed un meccanismo di collasso voluti
- Verifica sismica di strutture esistenti
 - Si, perché si va molto oltre il limite elastico e la duttilità locale e il meccanismo di collasso spesso non saranno quelli desiderati

Comportamento delle strutture

In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità diffusa:
 - Si valuta il comportamento della sezione (legame momento-curvatura) e quindi di un concio di trave (legame momento-rotazione)
 - Si divide ogni trave in conci
 - Assegnato un diagramma del momento flettente, si integra la curvatura (ovvero la rotazione relativa tra gli estremi dei conci) per determinare la deformazione dell'asta

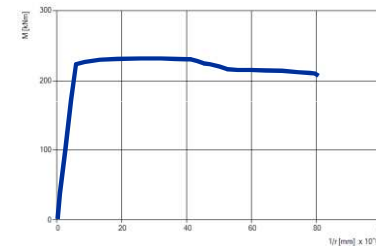
Comportamento delle strutture

In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità diffusa
Esempio - trave incastrata e appoggiata



1. Legame momento-curvatura



momento-curvatura

2. Divisione in conci



Comportamento delle strutture

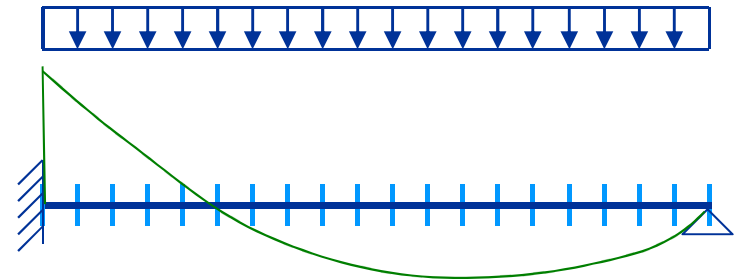
In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità diffusa
Esempio - trave incastrata e appoggiata



3. Applicazione carico

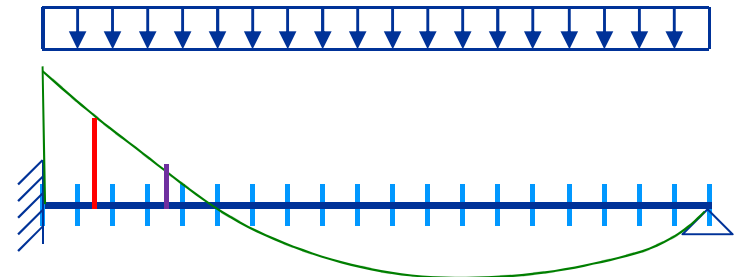
Poiché lo schema è iperstatico, il momento all'incastro è una incognita



Comportamento delle strutture

Integrando si trova la deformazione dell'asta
In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità diffusa
Esempio - trave incastrata e appoggiata

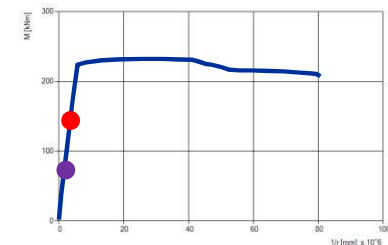


4. Integrazione

Ad ogni momento corrisponde una curvatura e
quindi una deformazione del concio

Integrando si trova la deformazione dell'asta

Con condizioni di congruenza si trova il
momento all'incastro, incognito



momento-curvatura

Comportamento delle strutture

In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità concentrata:
 - Si valuta il comportamento della sezione (legame momento-curvatura)
 - Si schematizza il legame con un andamento elastico-perfettamente plastico
 - Quando si raggiunge il momento di plasticizzazione la sezione può ruotare liberamente, come se ci fosse una cerniera
- Quindi si incrementa progressivamente il carico, variando via via lo schema con formazione di cerniere

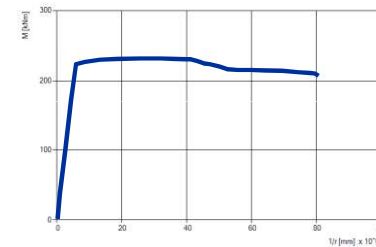
Comportamento delle strutture

In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità concentrata
Esempio - trave incastrata e appoggiata

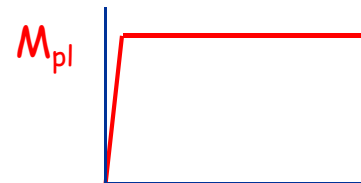


1. Legame momento-curvatura



momento-curvatura

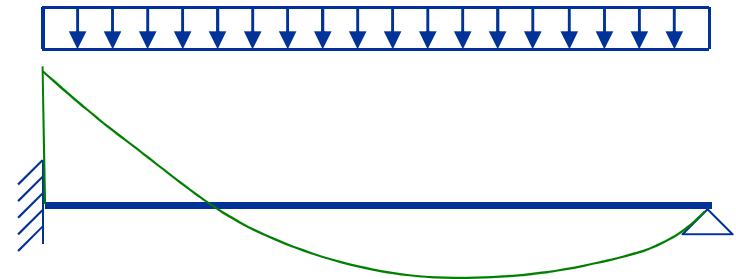
2. Bilinearizzazione del legame



Comportamento delle strutture

In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità concentrata
Esempio - trave incastrata e appoggiata



3. Applicazione carico

Il carico viene fatto crescere progressivamente, fino a raggiungere M_{pl}

Comportamento delle strutture

In che modo tener conto della non linearità?

- Modelli a plasticità concentrata
Esempio - trave incastrata e appoggiata



3. Applicazione carico

Per l'ulteriore incremento di carico si
usa uno schema variato, con cerniera

Il risultato complessivo è
somma dei due schemi

