

## Incontri di approfondimento

per gli studenti del dottorato di ricerca  
in Ingegneria strutturale e geotecnica, 28° ciclo  
e per i partecipanti al workshop  
"Progetto di edifici antisismici con struttura in c.a." 2013

## **Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.**

3a - Capacità deformativa di sezioni e aste

Catania

26 novembre 2013

Aurelio Ghersi

# Procedimenti per la verifica sismica

- Impostazione tradizionale:  
giudizio in termini di sollecitazioni

- Impostazione alternativa:  
giudizio in termini di spostamenti

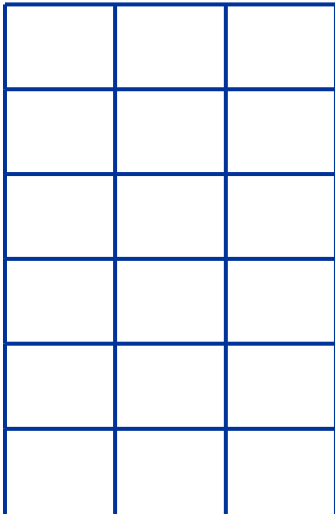
# Perché “giudizio in termini di spostamenti”?

- È impossibile che la struttura sopporti le sollecitazioni indotte dal sisma restando in campo elastico
- Nelle analisi convenzionali si usano azioni minori, ridotte mediante il fattore  $q$  che tiene conto della capacità dissipativa della struttura
- Per la maggior parte delle strutture esistenti la capacità dissipativa è difficilmente valutabile

Occorre cambiare approccio:

~~Verifica sollecitazioni~~ → Verifica deformazioni plastiche

# Analisi della risposta sismica non lineare



Modello per i materiali

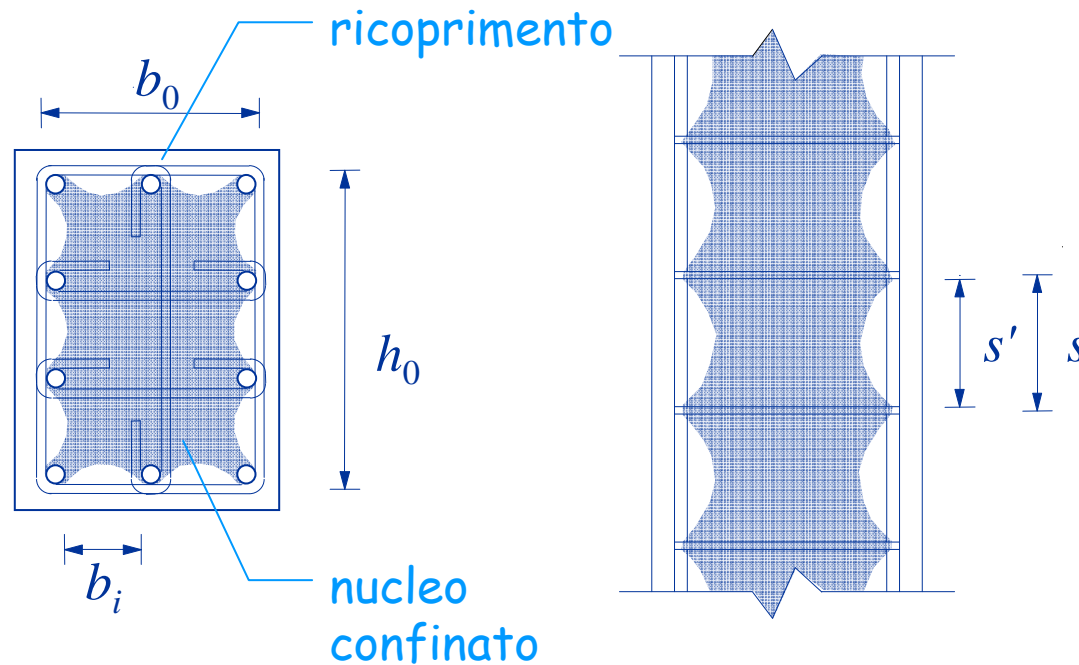


Legame momento-curvatura  
( $M-\chi$ ) per la sezione  
mediante modello a fibre

# Modello per i materiali calcestruzzo

Problemi:

- Distinzione tra ricoprimento e nucleo confinato
- Efficacia del confinamento



# Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

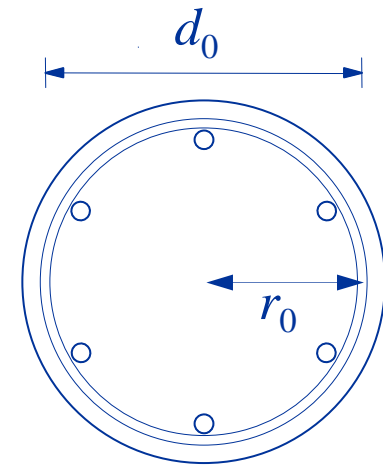
## Staffe in una sezione circolare

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

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

con

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



La compressione trasversale migliora il comportamento del calcestruzzo

# Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

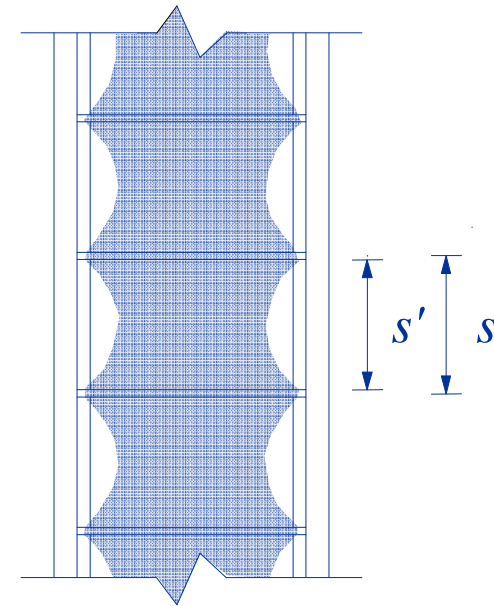
## Staffe in una sezione circolare Efficacia del confinamento

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

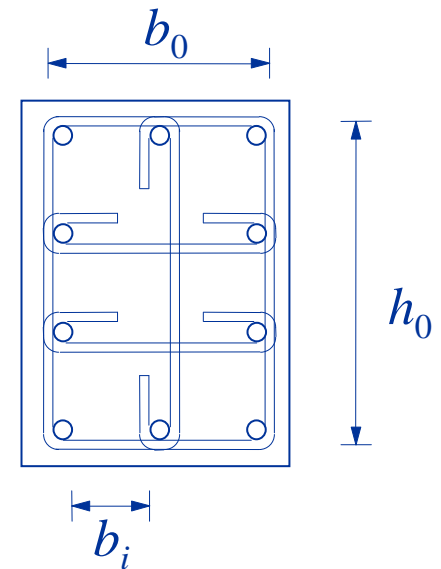
## Staffe in una sezione rettangolare

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

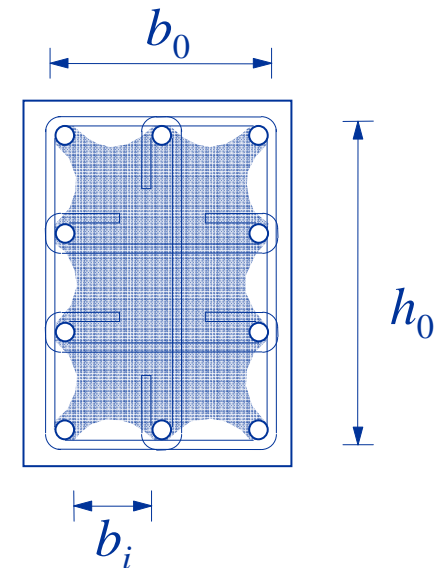
confinamento dovuto alle staffe

## 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

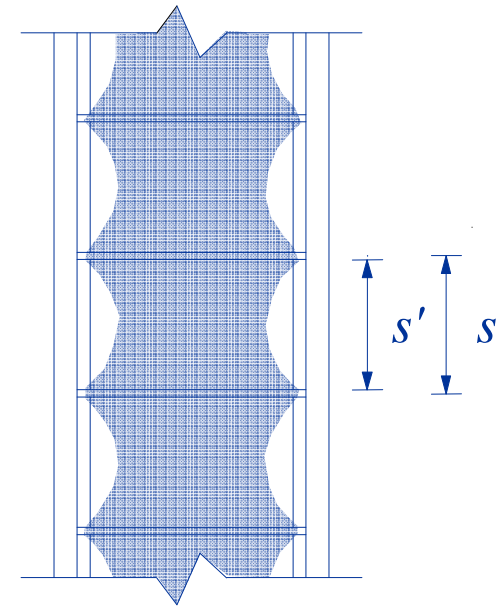
## Staffe in una sezione rettangolare Efficacia del confinamento

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  $\alpha = \alpha_s \alpha_n$

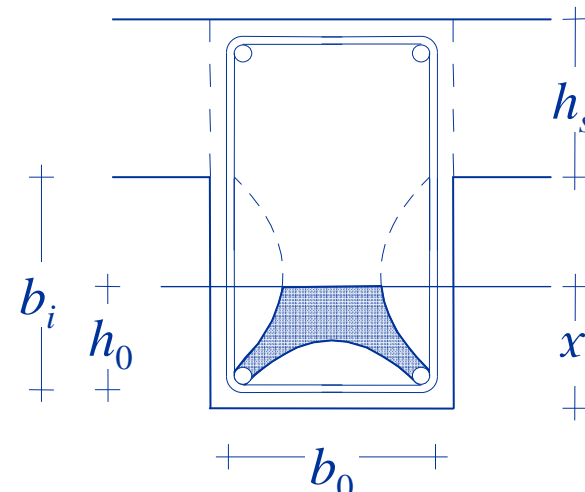
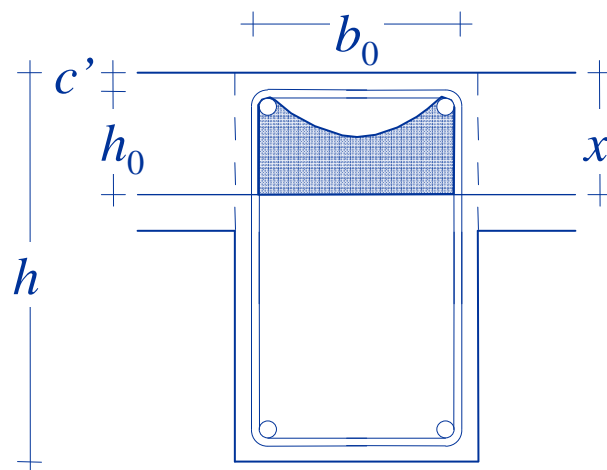


# Calcestruzzo

confinamento dovuto alle staffe

## Staffe in una trave a sezione rettangolare Efficacia del confinamento

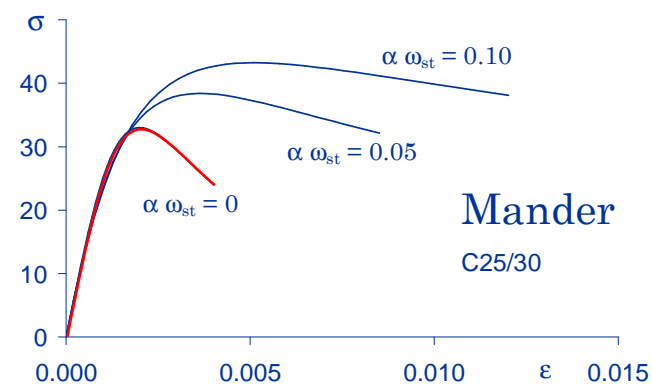
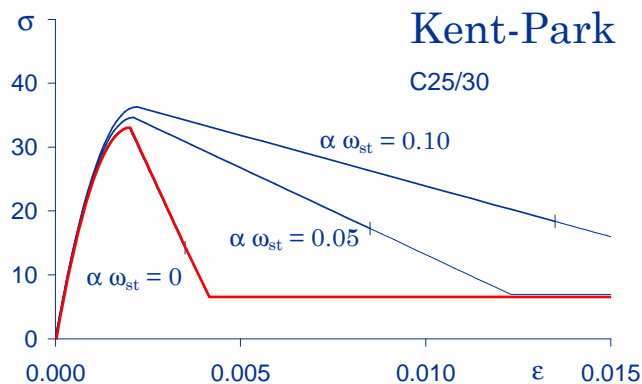
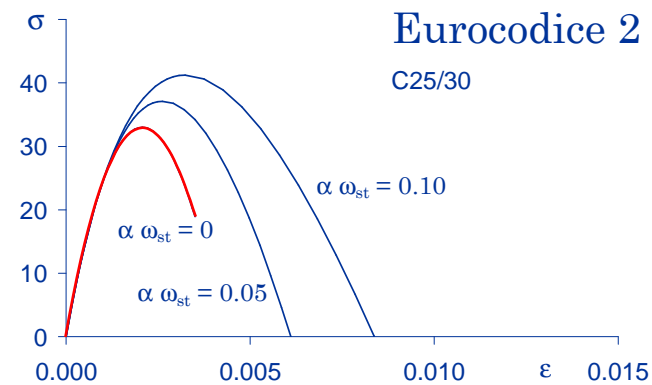
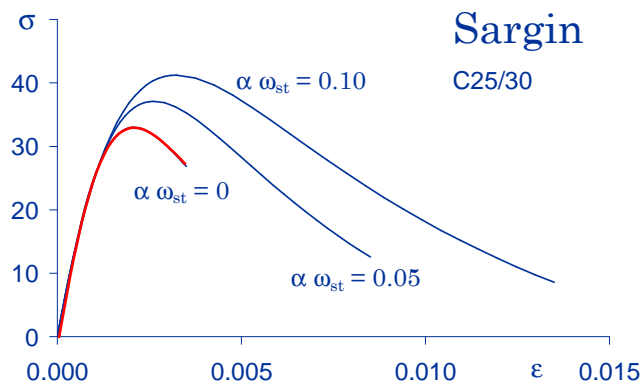
Nel valutare l'efficacia del confinamento bisogna tener conto di qual è la parte compressa e come viene confinata



# Modello per i materiali calcestruzzo

## Modelli:

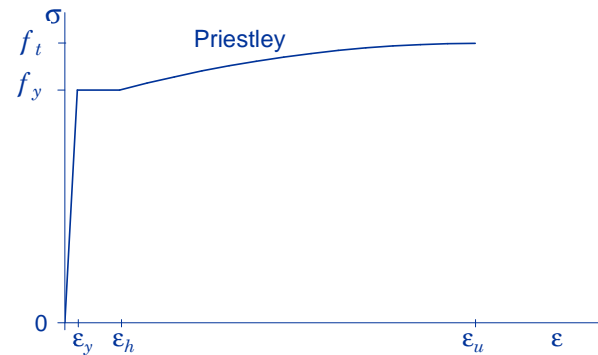
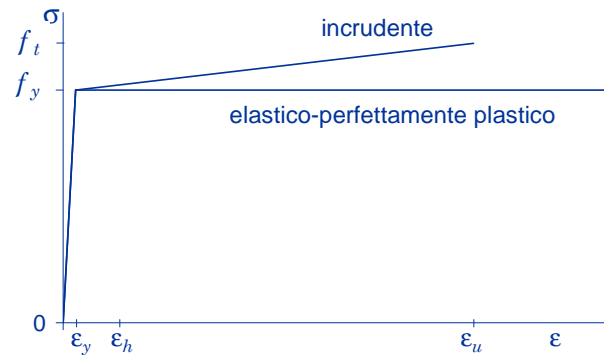
- Esistono numerose proposte, molto diverse



# Modello per i materiali acciaio

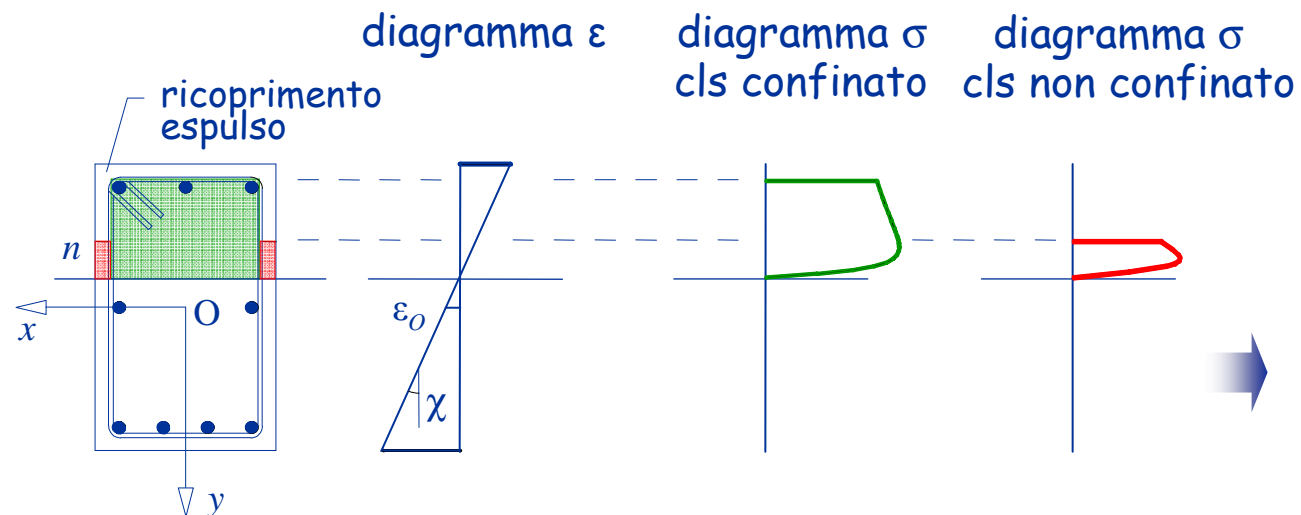
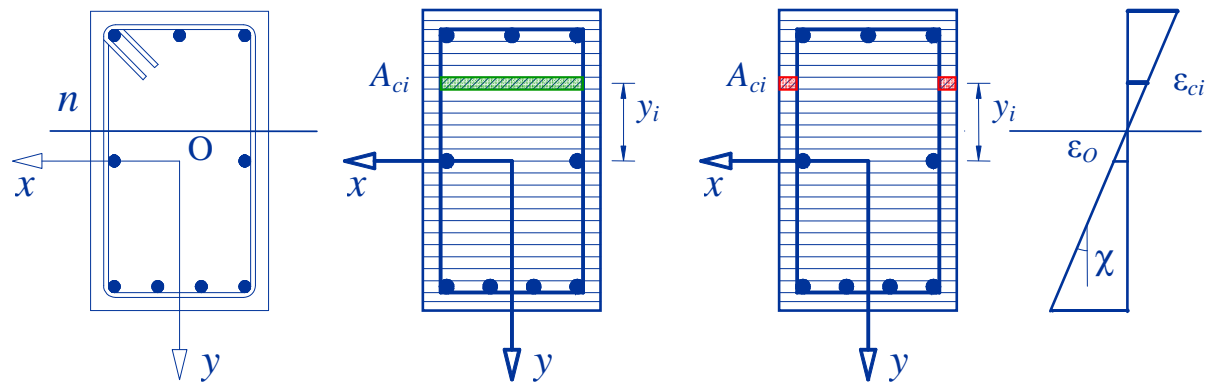
Modelli:

- Esistono alcune proposte, leggermente diverse



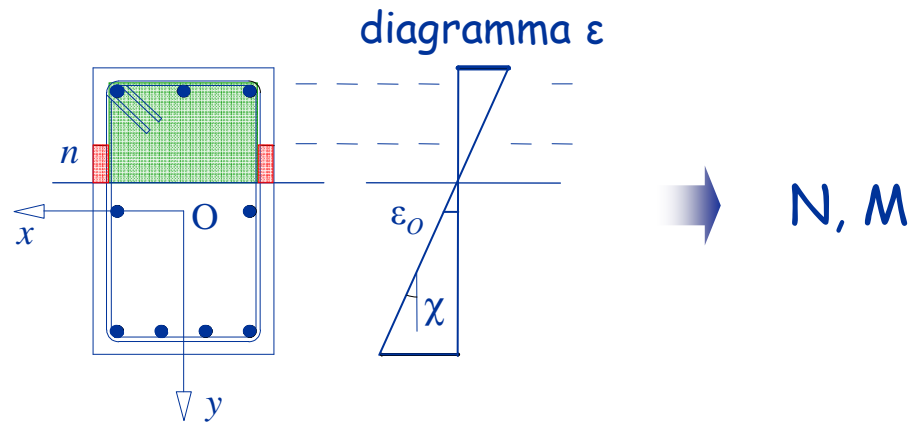
e anche, oltre a queste: Ramberg-Osgood, Menegotto Pinto

# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



$N, M$

# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

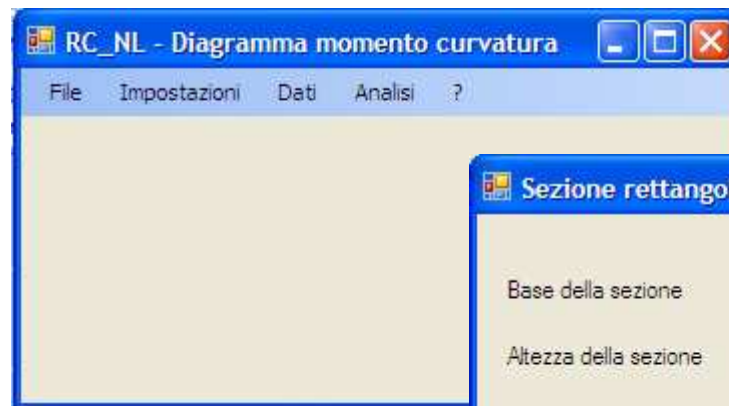


Legami momento curvatura per  $N$  assegnato:

- assegnato  $\chi$ , si determina il valore di  $\varepsilon_g$  cui corrisponde il valore richiesto di  $N$
- facendo variare  $\chi$  da 0 a  $\chi_u$  (valore per cui si raggiunge la deformazione ultima del materiale) si costruisce l'intero diagramma

# Programma RC-NL

Gheresi, Del Zoppo



**Sezione rettangolare**

Base della sezione  $b = 30$  cm

Altezza della sezione  $h = 60$  cm

Copri ferro di calcolo  $c = 4$  cm

Ok Annulla

**Staffe**

Efficacia del confinamento  $\alpha = 0.75$

Rapporto volumetrico  $\rho = 0.00439$

Deformazione ultima  $\epsilon_{su} = 75 \times 10^{-3}$

Suggerimenti Ok Annulla

**Armature sezione rettangolare**

**Armatura bordo superiore**

diametro barre spigolo 20 mm

numero altre barre 1

diametro altre barre 14 mm

**Armatura di parete (un lato)**

numero altre barre 2

diametro altre barre 14 mm

**Armatura bordo inferiore**

diametro barre spigolo 20 mm

numero altre barre 1

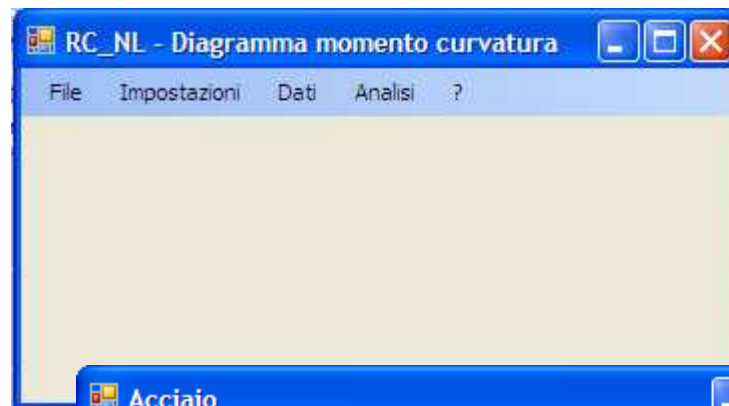
diametro altre barre 14 mm

Ok Annulla



# Programma RC-NL

Gheresi, Del Zoppo



**Calcestruzzo**

Parametri che descrivono il legame costitutivo per il calcestruzzo non confinato

Resistenza cilindrica del calcestruzzo	$f_c =$	<input type="text" value="33"/>	MPa
Resistenza a trazione	$f_{c,t} =$	<input type="text" value="1.72"/>	MPa
Modulo elastico tangente	$E_c =$	<input type="text" value="28723"/>	MPa
Deformazione di picco a compressione	$\epsilon_{co} =$	<input type="text" value="2"/>	$\times 10^{-3}$
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu} =$	<input type="text" value="4"/>	$\times 10^{-3}$

**Acciaio**

Parametri che descrivono il legame costitutivo per l'acciaio

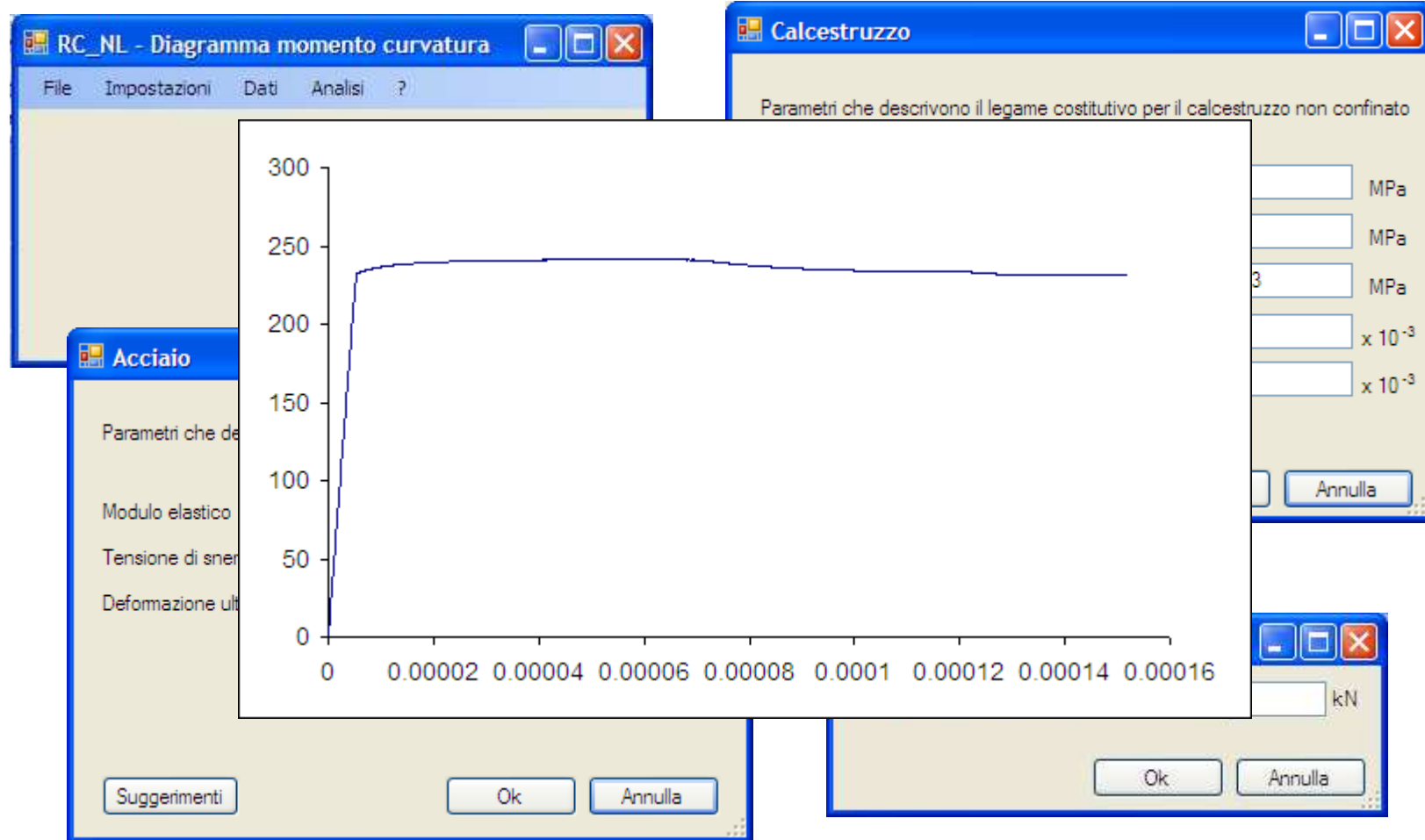
Modulo elastico	$E_s =$	<input type="text" value="210000"/>	MPa
Tensione di snervamento	$f_y =$	<input type="text" value="480"/>	MPa
Deformazione ultima	$\epsilon_{su} =$	<input type="text" value="75"/>	$\times 10^{-3}$

**Assegna sforzo normale**

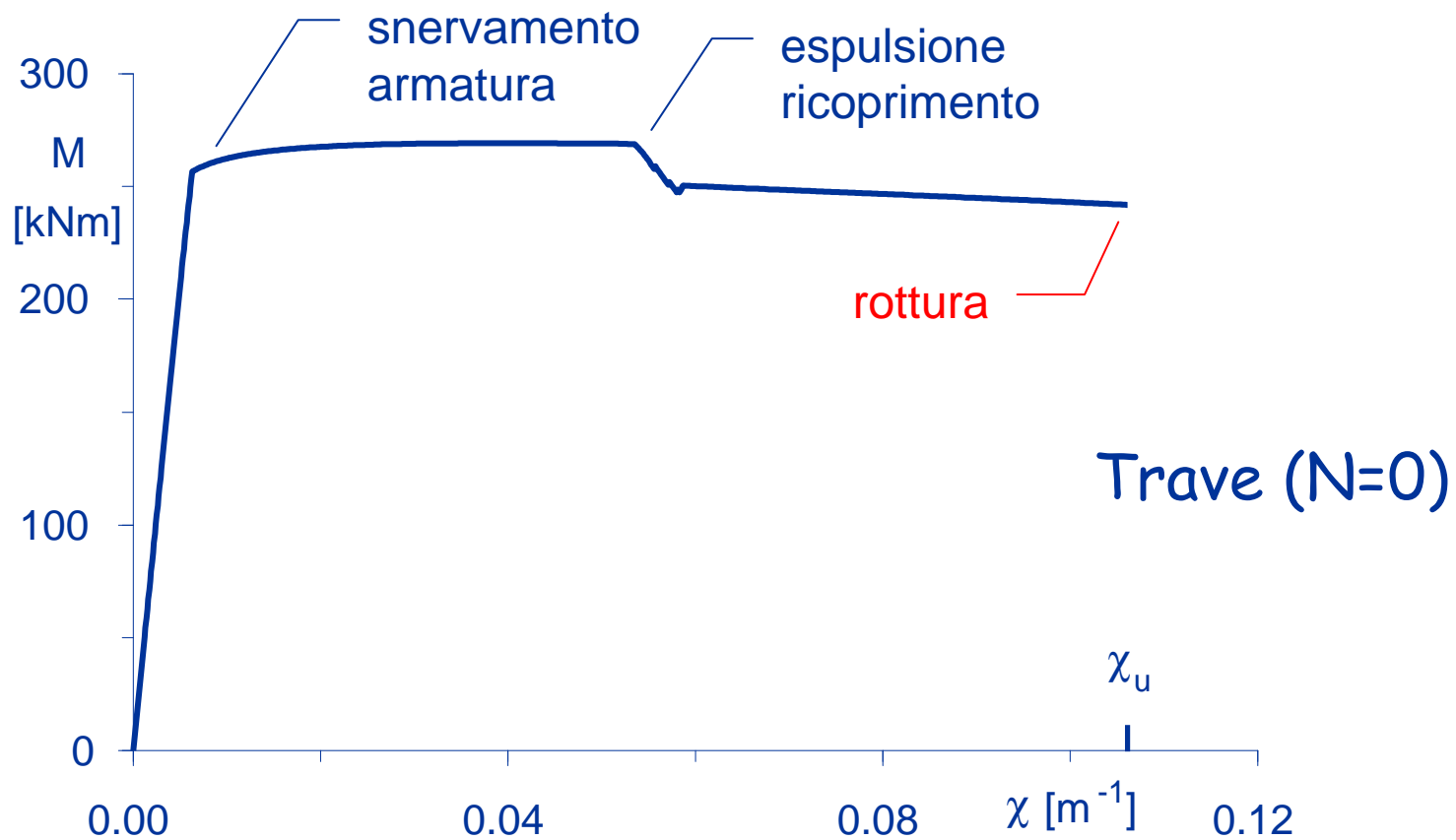
Sforzo normale sollecitante  $N =$   kN

# Programma RC-NL

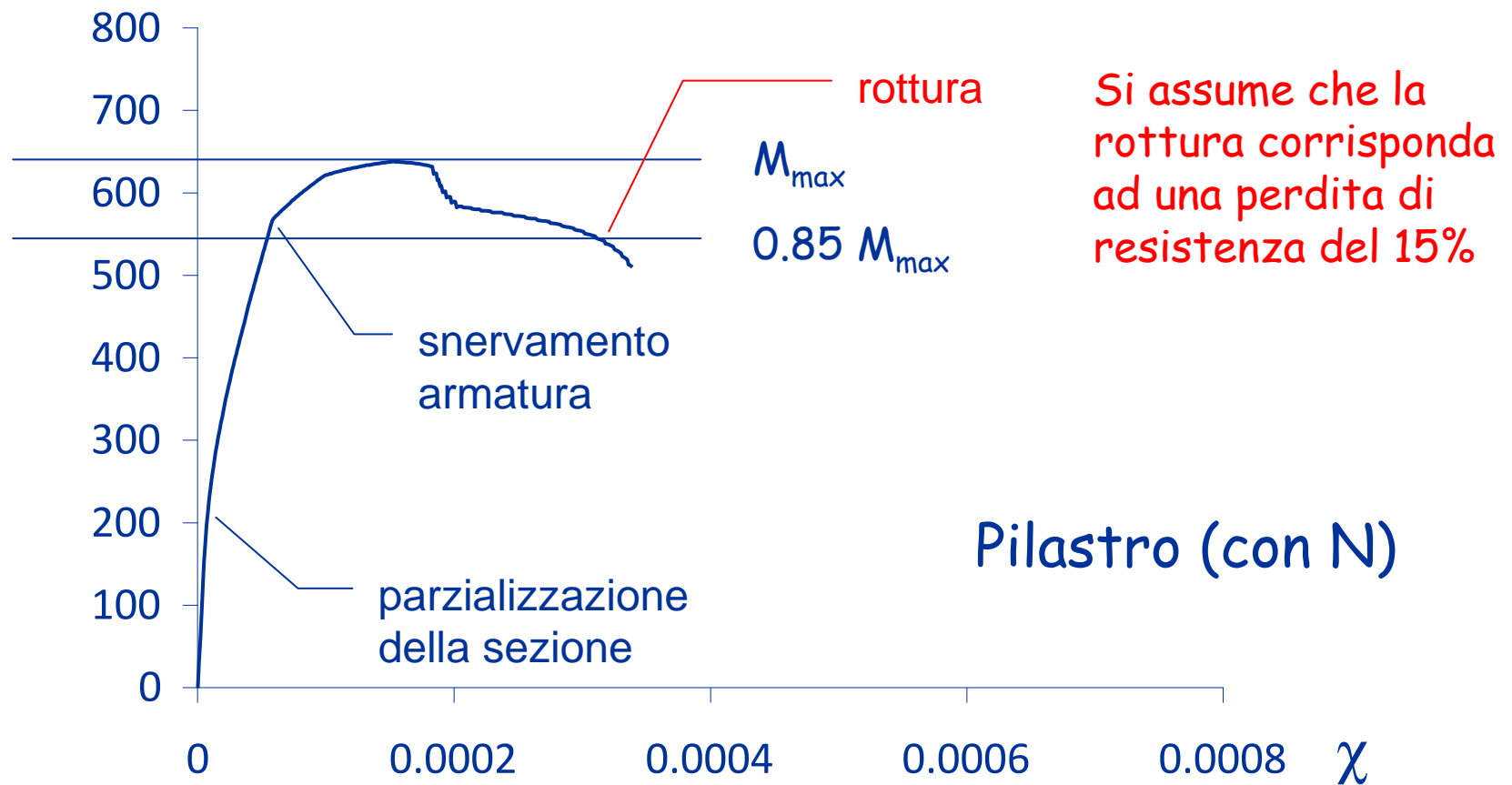
Gheresi, Del Zoppo



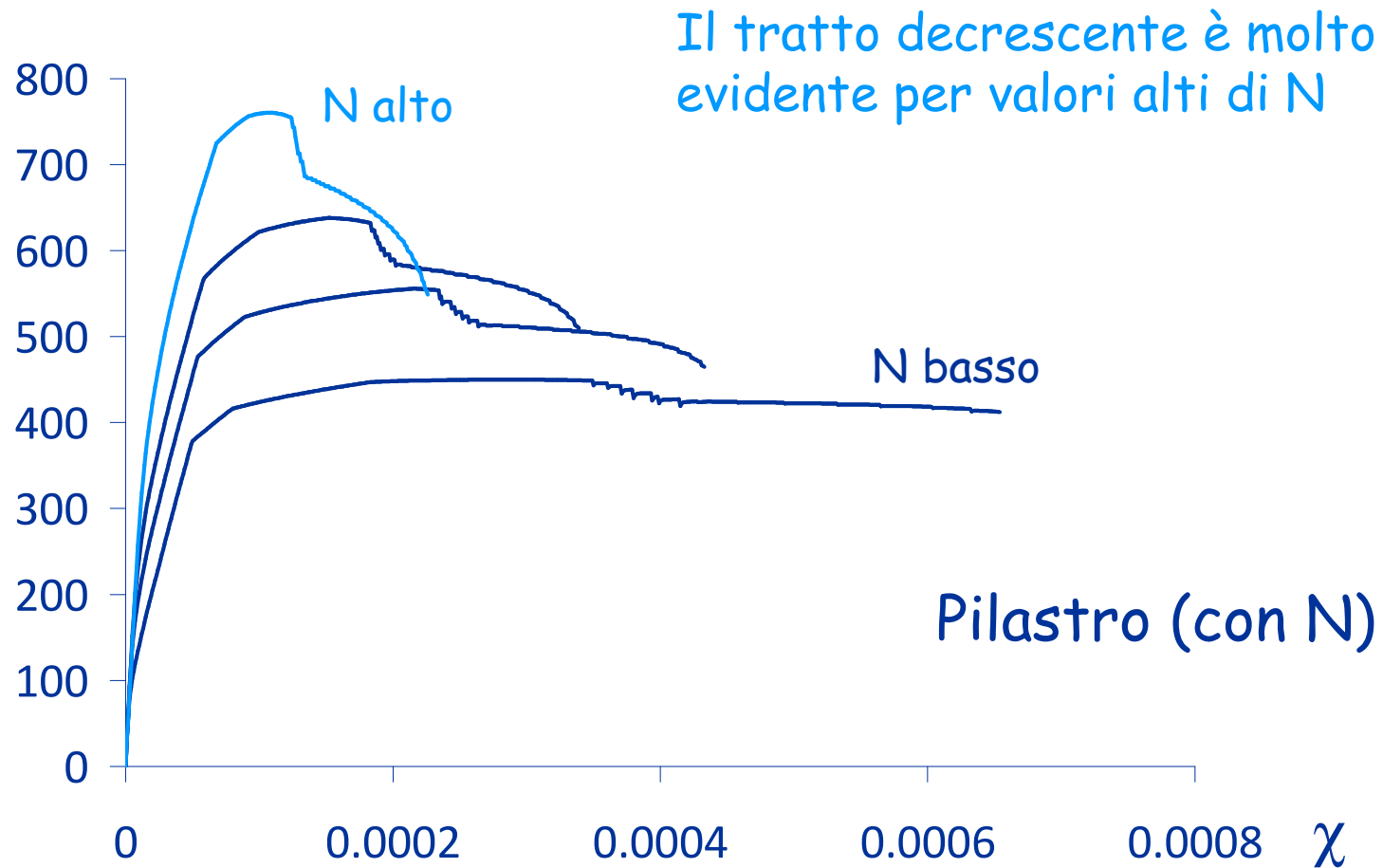
# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



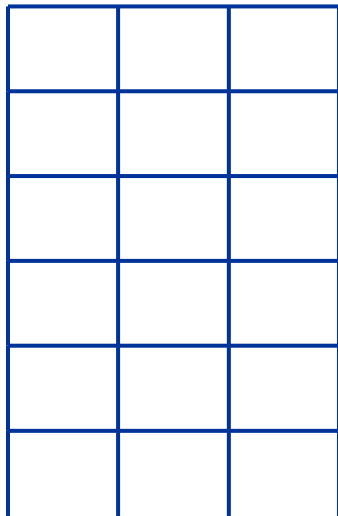
# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre



# Analisi della risposta sismica non lineare



Modello per i materiali



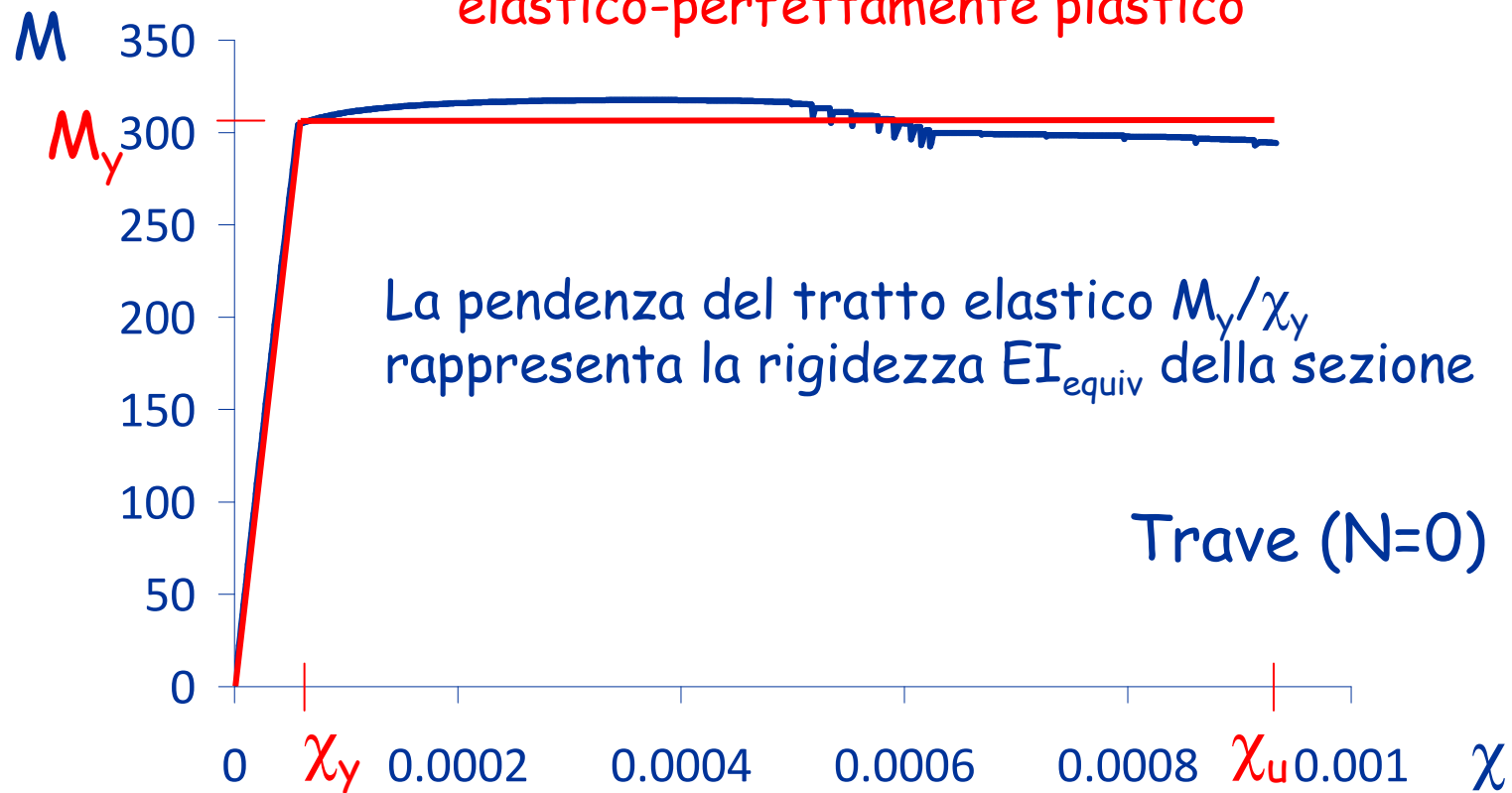
Legame momento-curvatura  
( $M-\chi$ ) per la sezione  
mediante modello a fibre



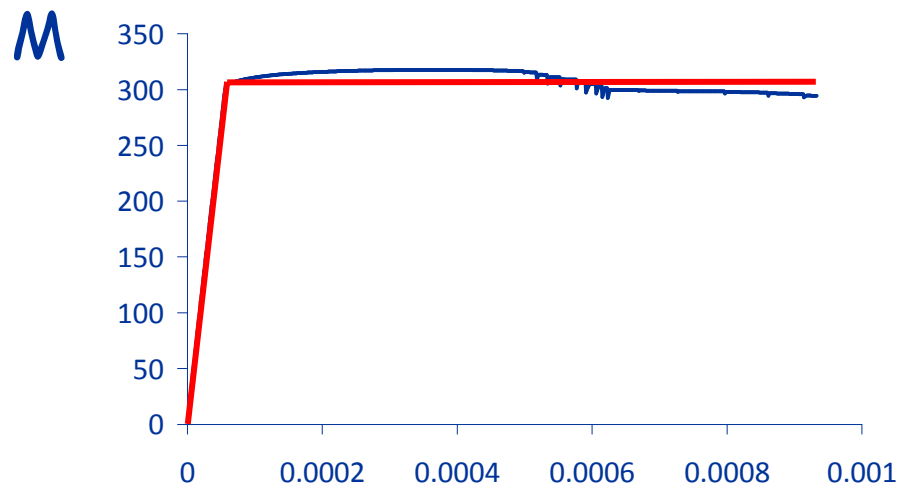
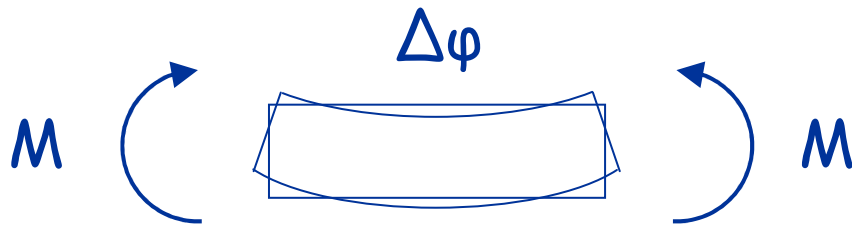
Modello di telaio con  
cerniere plastiche

# Legame momento-curvatura mediante modello a fibre

È facile schematizzarlo come  
elastico-perfettamente plastico



# Cerniera plastica concio di trave



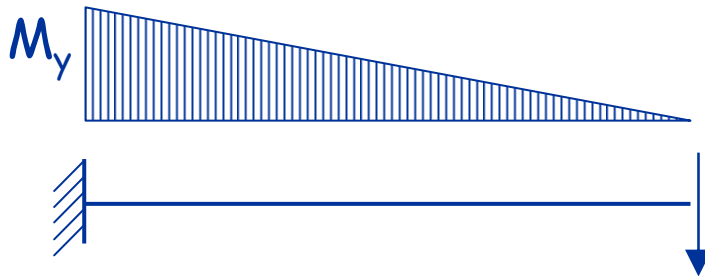
Trave ( $N=0$ )

$$\chi \Rightarrow \Delta \phi = \chi \Delta \ell$$



# Cerniera plastica

## problemi ...



- Il momento di plasticizzazione si raggiunge in una sezione (cioè in un tratto di ampiezza nulla)



$$\Delta\varphi_{pl} = \chi_{pl} \Delta\ell = 0$$

- Occorre assegnare una ampiezza della zona plasticizzata (in genere  $0.5 h \div h$ )

# Formulazioni numeriche

Panagiotakos e Fardis, 2001, ACI Structural Journal

- Formulazioni approssimate, tarate su oltre 1000 prove sperimentali disponibili in letteratura
- Riferimento a un parametro "globale" - **rotazione alla corda** - anziché a quelli relativi alla sezione



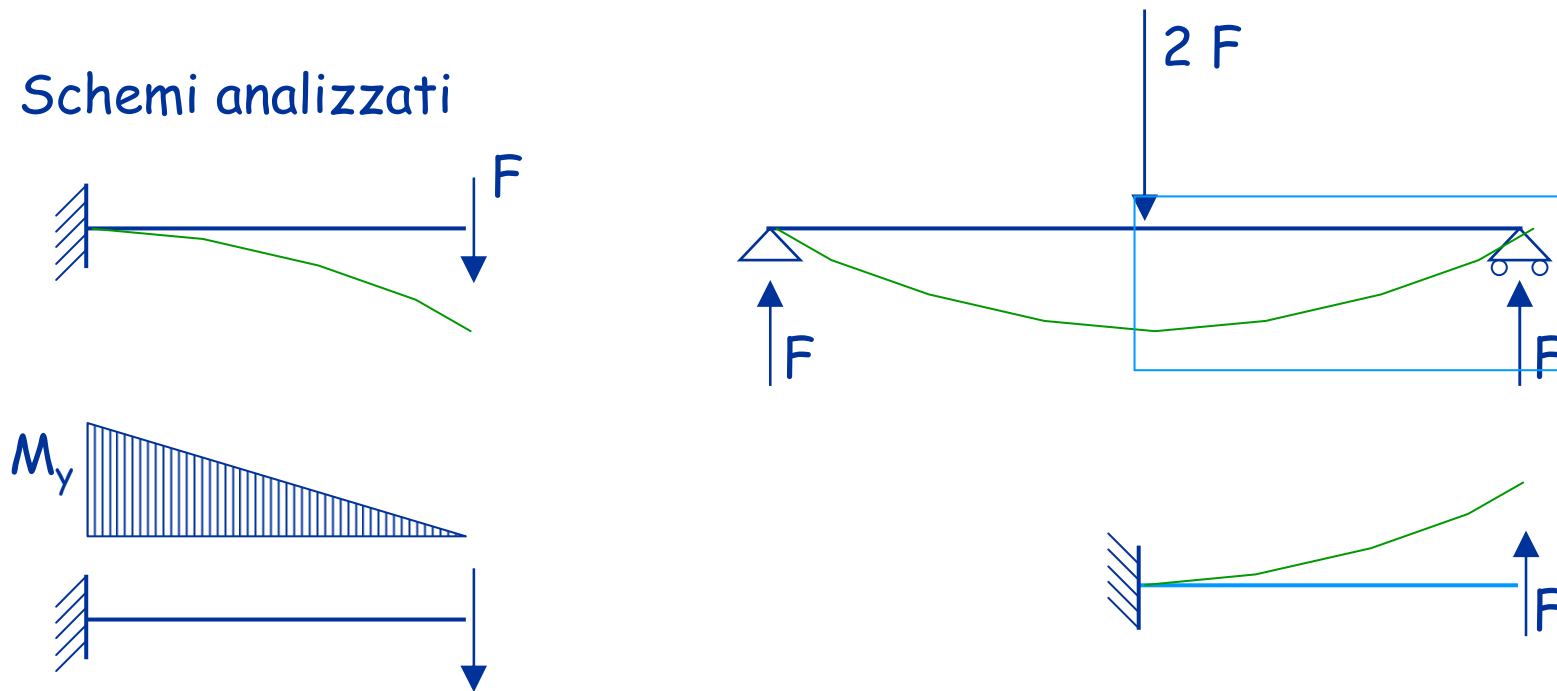
## Indicazioni di normativa

(Eurocodice 8, Ordinanza 3274,  
Circolare per NTC08)

# Formulazioni numeriche

Panagiotakos e Fardis, 2001, ACI Structural Journal

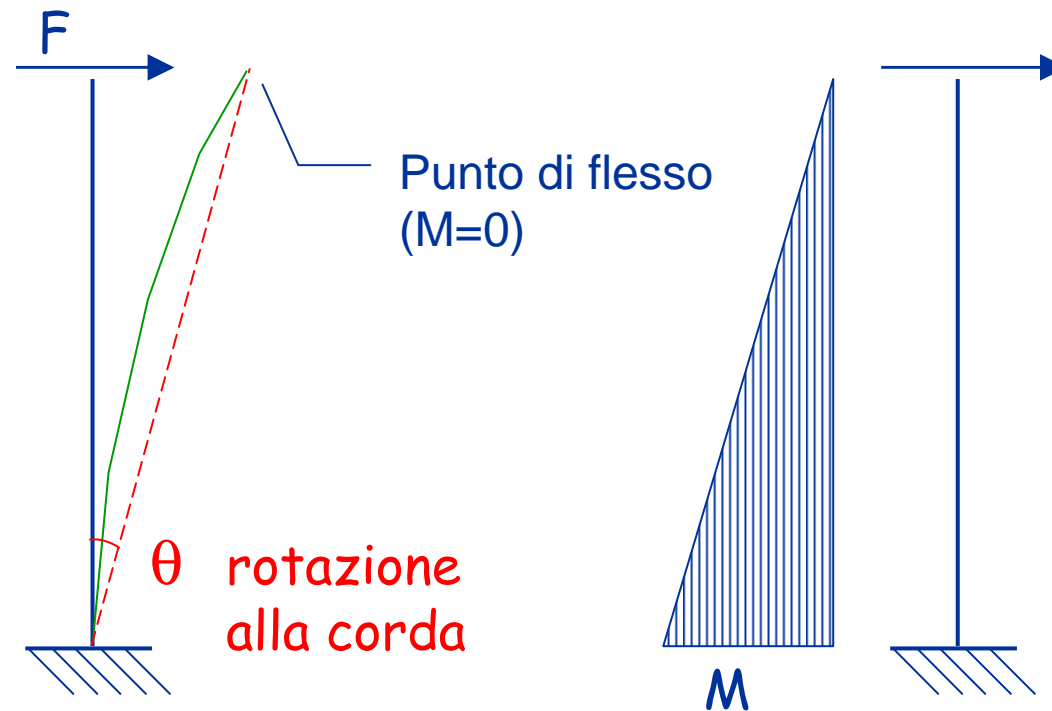
Schemi analizzati



I due schemi sono equivalenti

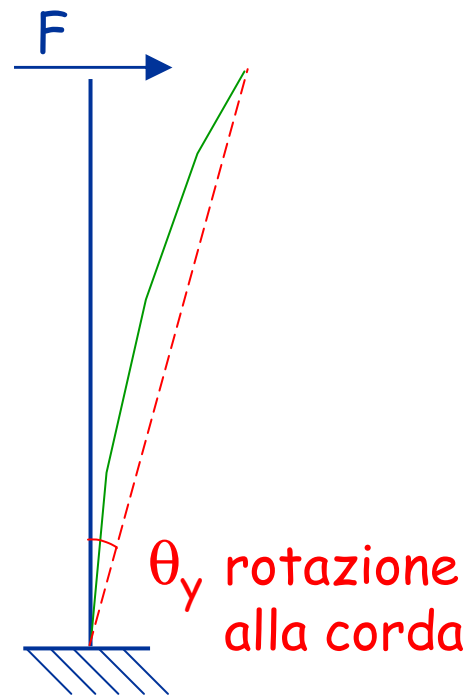
# Formulazioni numeriche

Panagiotakos e Fardis, 2001, ACI Structural Journal



# Formulazioni numeriche

Panagiotakos e Fardis, 2001, ACI Structural Journal



Al limite elastico

$$\delta_y = \frac{F \ell^3}{3 E I}$$

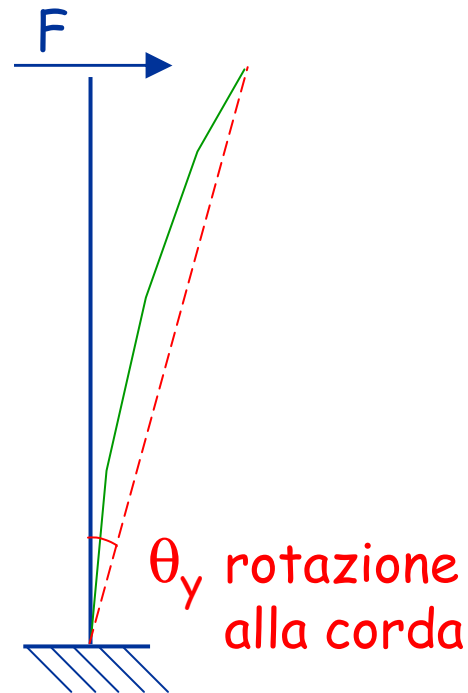
$$\theta_y = \frac{F \ell^2}{3 E I} = \frac{M_y \ell}{3 E I}$$

$$\chi_y = \frac{M_y}{E I} \Rightarrow \theta_y = \chi_y \frac{\ell}{3}$$

Nota: io uso il simbolo  $\chi$  ma nella formulazione di Panagiotakos e Fardis viene usato il simbolo  $\phi$

# Formulazioni numeriche

Panagiotakos e Fardis, 2001, ACI Structural Journal



Al limite elastico

$$\theta_y = \chi_y \frac{\ell}{3}$$

Formula proposta:

$$\theta_y = \chi_y \frac{\ell}{3} + 0.0025 + \alpha_{sl} \frac{0.25 \varepsilon_y d_b f_y}{(d - c) \sqrt{f_c}}$$

deformazione  
per taglio

scorrimento barre  
nell'ancoraggio

# Formulazioni numeriche limite elastico

Panagiotakos e Fardis:

$$\theta_y = \chi_y \frac{\ell}{3} + 0.0025 + \alpha_{sl} \frac{0.25 \varepsilon_y d_b f_y}{(d-c) \sqrt{f_c}}$$

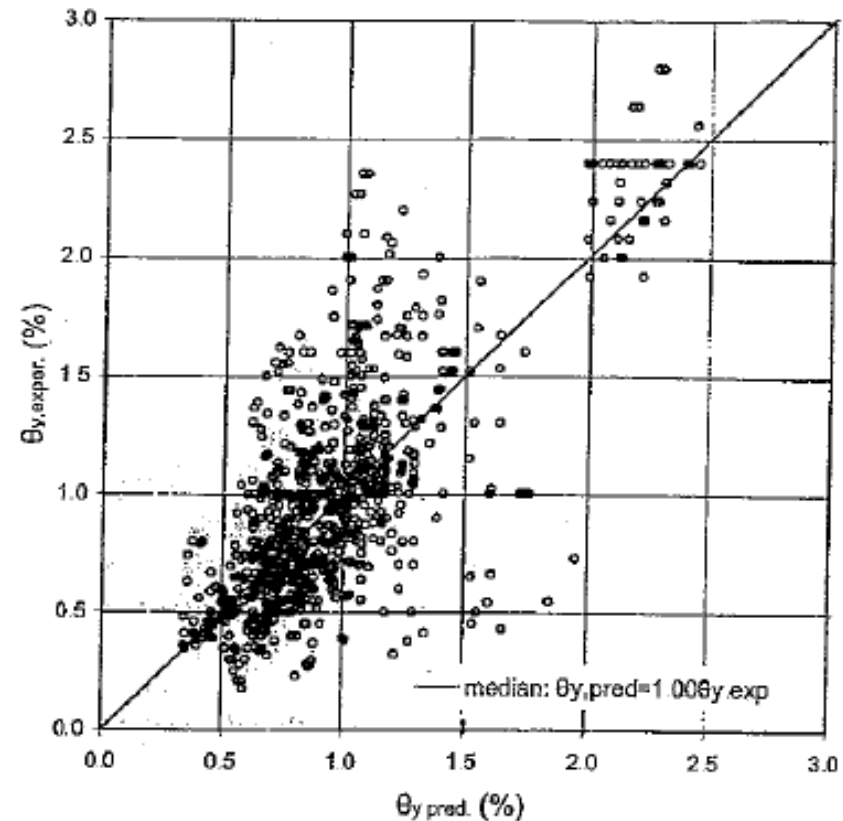


Fig. 2—Comparison of experimental and predicted values of chord rotation (or drift) at yield (963 tests).

# Formulazioni numeriche limite elastico

Panagiotakos e Fardis:

$$\theta_y = \chi_y \frac{\ell}{3} + 0.0025 + \alpha_{sl} \frac{0.25 \varepsilon_y d_b f_y}{(d - c) \sqrt{f_c}}$$

Circolare NTC08:

$$\theta_y = \chi_y \frac{\ell}{3} + 0.0013 \left( 1 + 1.5 \frac{h}{\ell} \right) + 0.13 \chi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$



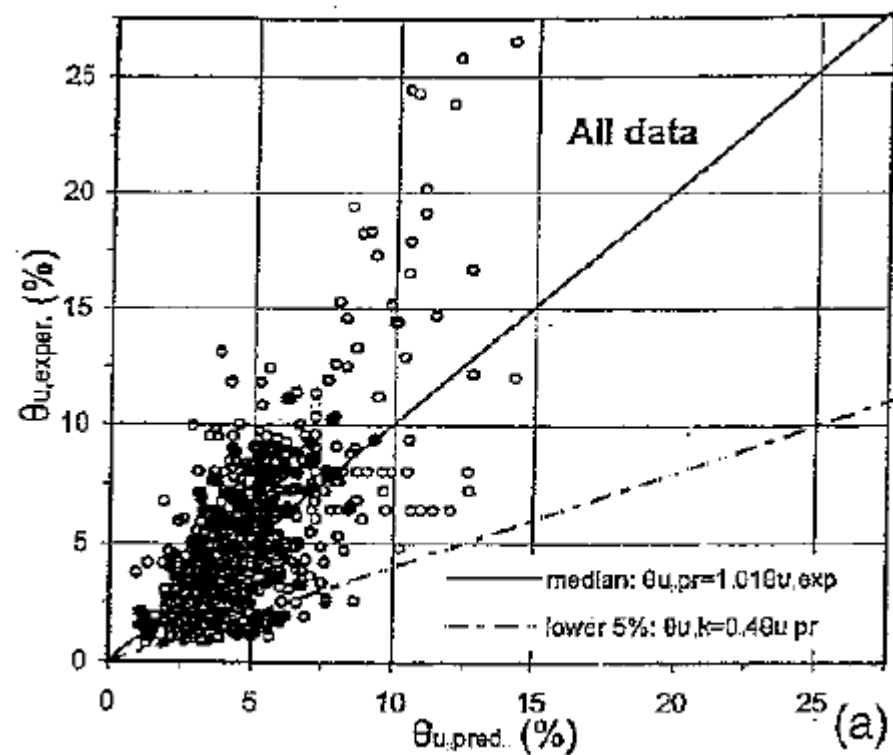
# Formulazioni numeriche limite ultimo

Panagiotakos e Fardis,  
su base empirica:

$$\theta_u = \alpha_{st} \alpha_{cyc} \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2.3}\right) \left(1 - \frac{\alpha_{wall}}{3}\right) (0.2^v)$$

$$\left[ \frac{\max\left(0.01, \frac{\rho' f_y'}{f_c}\right)}{\max\left(0.01, \frac{\rho f_y}{f_c}\right)} f_c \right]^{0.275} \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0.45}$$

$$1.1^{\left(100 \alpha_{ps} \frac{f_{yh}}{f_c}\right)} 1.3^{100 \rho_d}$$



# Formulazioni numeriche limite ultimo

Panagiotakos e Fardis,  
su base empirica:

$$\theta_u = \alpha_{st} \alpha_{cyc} \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2.3}\right) \left(1 - \frac{\alpha_{wall}}{3}\right) (0.2^v) \left[ \frac{\max\left(0.01, \frac{\rho' f_y'}{f_c}\right)}{\max\left(0.01, \frac{\rho f_y}{f_c}\right)} f_c \right]^{0.275} \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0.45} 1.1^{\left(100 \alpha_{psx} \frac{f_{yh}}{f_c}\right)} 1.3^{100 \rho_d}$$

Circolare NTC08:

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3^v) \left[ \frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0.35} 25^{\left(\alpha_{psx} \frac{f_{yh}}{f_c}\right)} 1.25^{100 \rho_d}$$