VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN CEMENTO ARMATO

Catania, 25 giugno – 2 luglio 2019

08 – Modellazione e analisi: duttilità

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Corso organizzato da: FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CATANIA

Analisi strutturale

in generale e specificamente per edificio in c.a.

Per effettuare qualsiasi tipo di analisi occorre definire i parametri fondamentali:

- Resistenza
  - Parametro meccanico che indica il valore massimo della tensione dei materiali costr[illegible] massimo valore delle caratteristiche di sollecitazioni sopportabili

Già discusso

- Rigidezza
  - Parametro legato alle caratteristiche geometriche della sezione ed elastiche del m[illegible] il rapporto tra azioni e componenti di movimento

Già discusso

- Duttilità
  - capacità deformativa di una sezione o di un'asta oltre il limite elastico

Verifiche per strutture soggette a sisma

Se il sisma è forte si andrà oltre il limite elastico

- Verifiche di resistenza:
  - Per elementi fragili (rottura a taglio delle sezioni o dei nodi, scorrimento testa pilastro-trave)

    La verifica è indispensabile (anche se il collasso si ha solo se contemporaneamente si hanno forti spostamenti)
  - Per elementi duttili (raggiungimento della resistenza a flessione)

    La verifica non è condizionante, perché l'elemento si deforma plasticamente

    Occorre verificare la duttilità

Verifiche per strutture soggette a sisma

- Duttilità = capacità di deformarsi plasticamente dopo aver raggiunto il limite di resistenza
- Per un giudizio realistico sul comportamento sismico di una struttura occorre valutare (e confrontare)
  - La domanda di duttilità
    cioè la deformazione plastica provocata dal sisma
  - La capacità di duttilità
    cioè la deformazione plastica che la struttura è in grado di sopportare

Modellazione

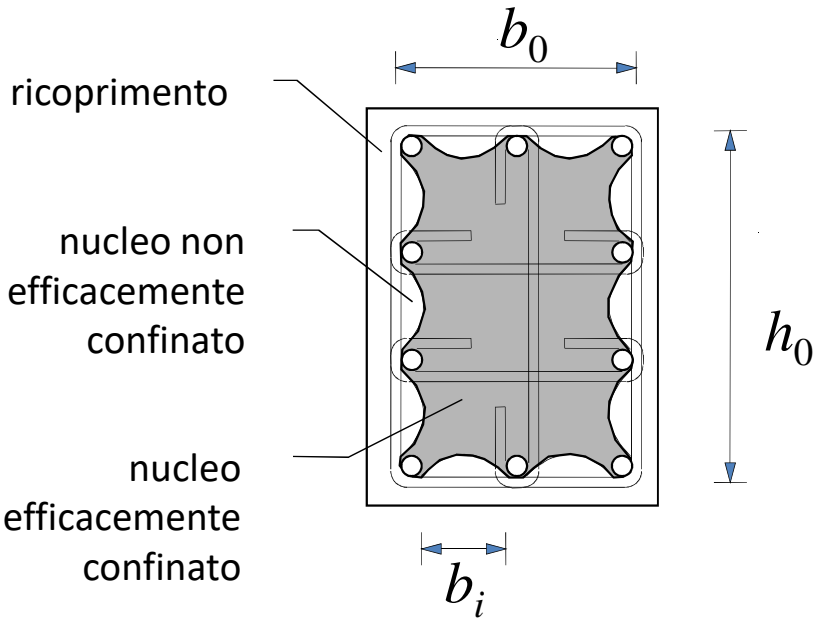
del comportamento di una sezione oltre il limite elastico

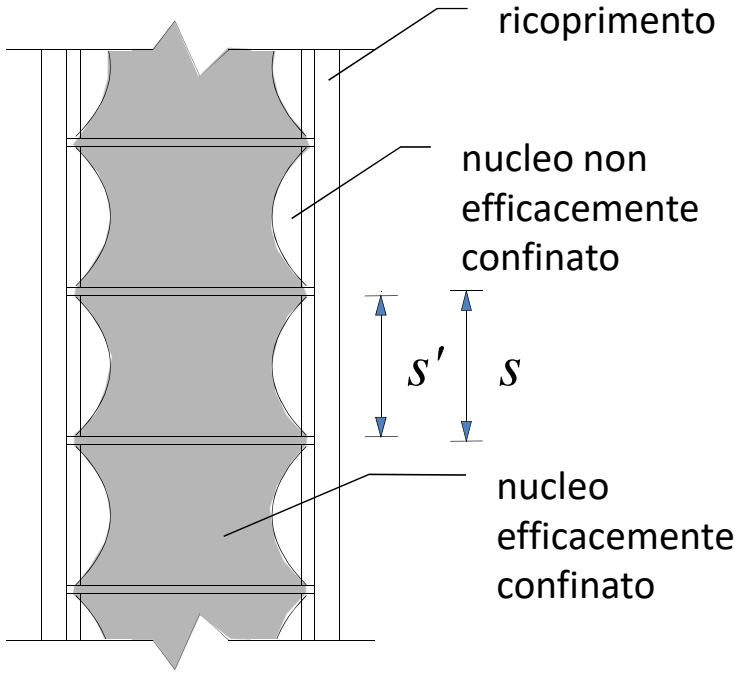
Modello per i materiali

calcestruzzo

Problemi:

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



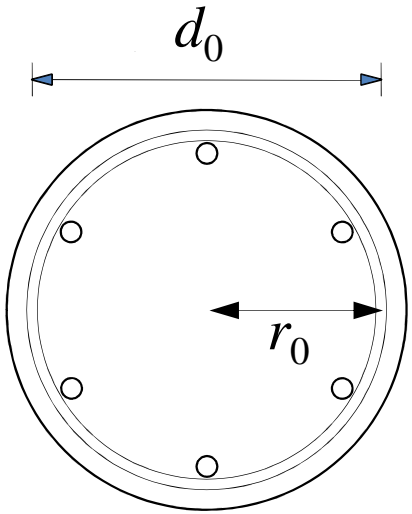


Modello per i materiali

calcestruzzo

Effetto del confinamento:

- Staffe in una sezione circolare



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

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

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

La compressione trasversale migliora il comportamento del calcestruzzo

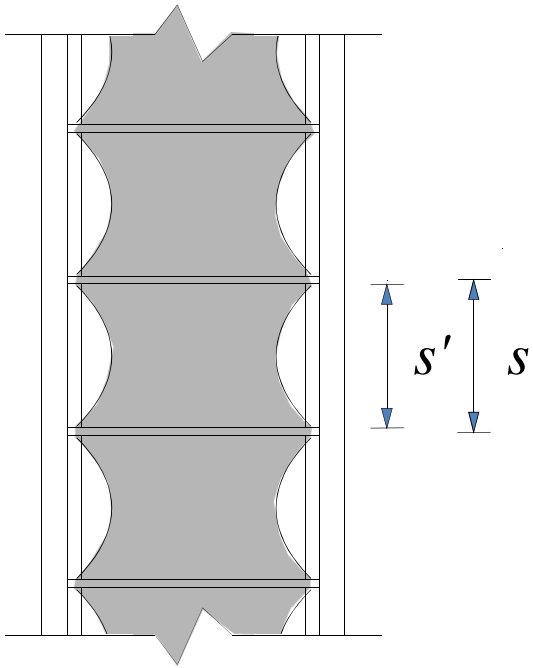
Modello per i materiali

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

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

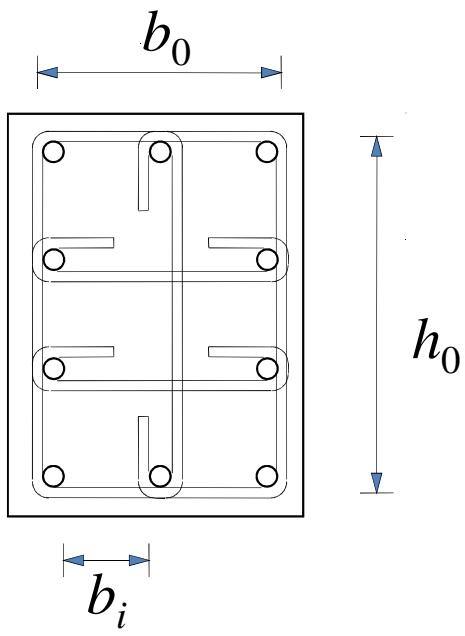
quindi $\sigma_{c,trasv} = 0.5\,\alpha_s\,\omega_{st}\,f_c$

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

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

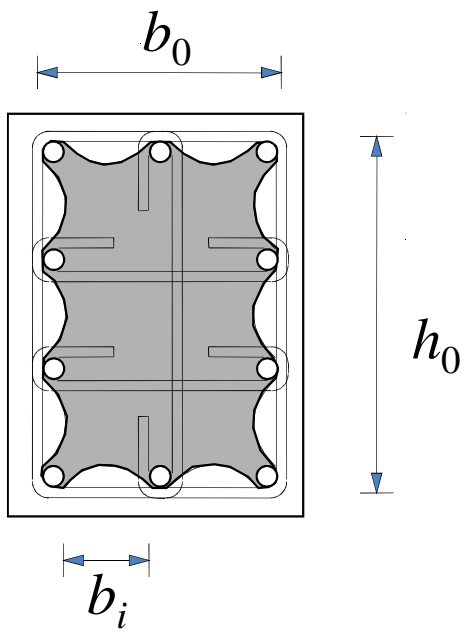
con $$\omega_{st} = \frac{\sum A_{st}\ l_{st}}{b_0\ h_0\ s}\ \frac{f_y}{f_c}$$

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

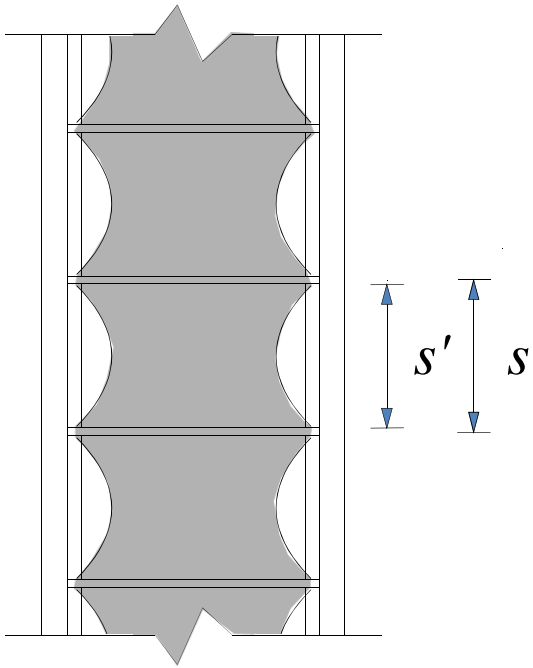
$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6\, b_0\, h_0}$$

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

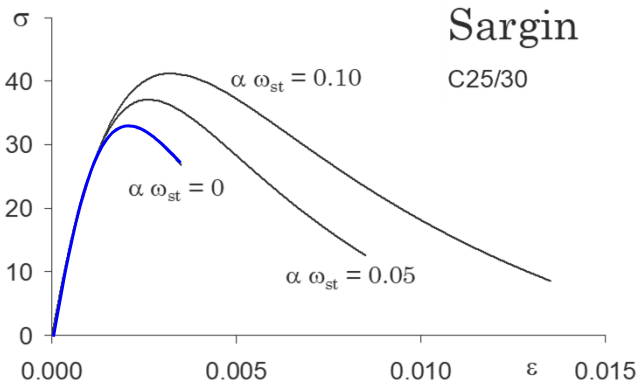
con $\alpha = \alpha_s\,\alpha_n$

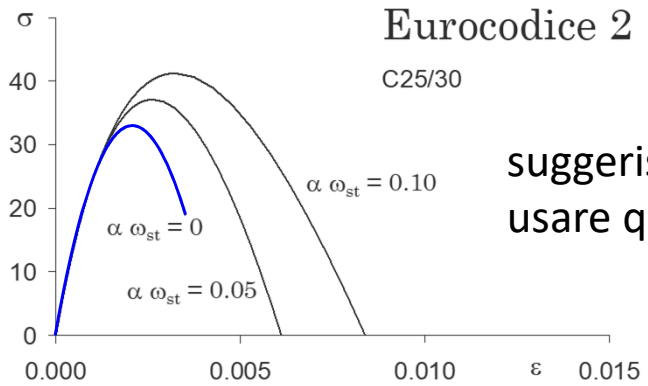
Modello per i materiali

calcestruzzo

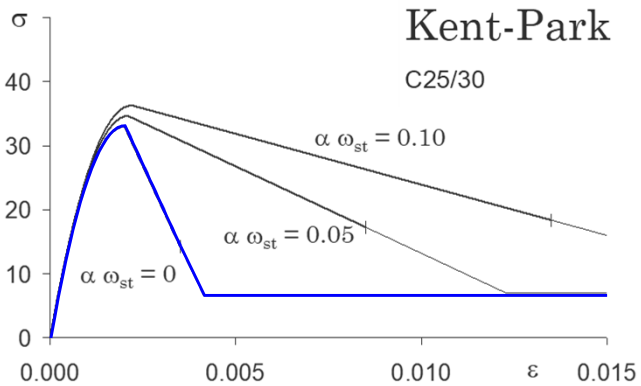
Modelli:

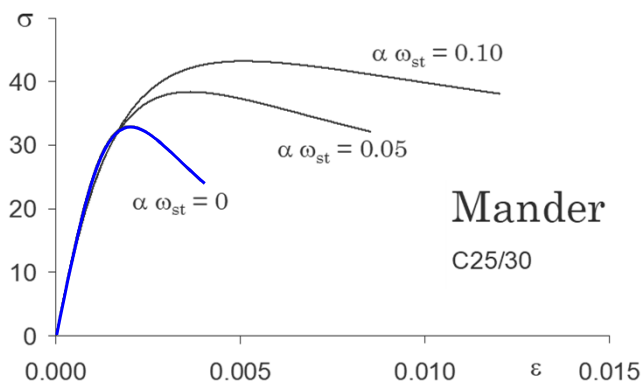
- Esistono numerose proposte, molto diverse





suggerisco di usare questo



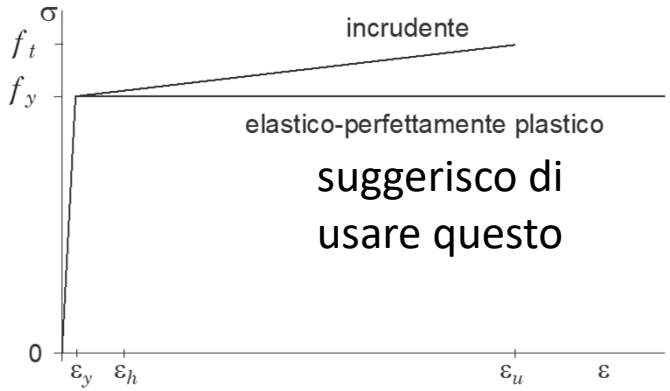


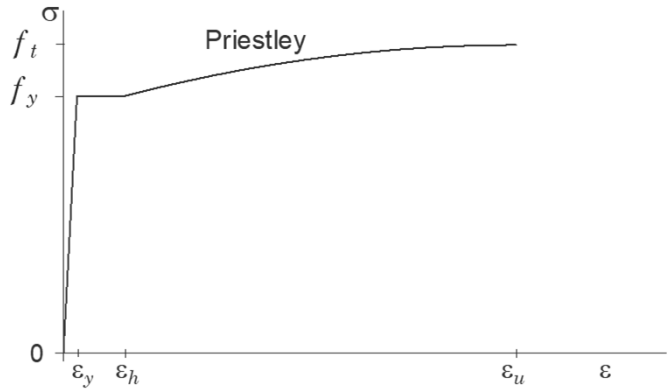
Modello per i materiali

acciaio

Modelli:

- Esistono alcune proposte, leggermente diverse





Un confronto con dati sperimentali indica che il modello EC2 per il calcestruzzo ed elastico-perfettamente plastico per l'acciaio forniscono risultati numerici compatibili e cautelativi

Legame momento-curvatura

mediante modello a fibre

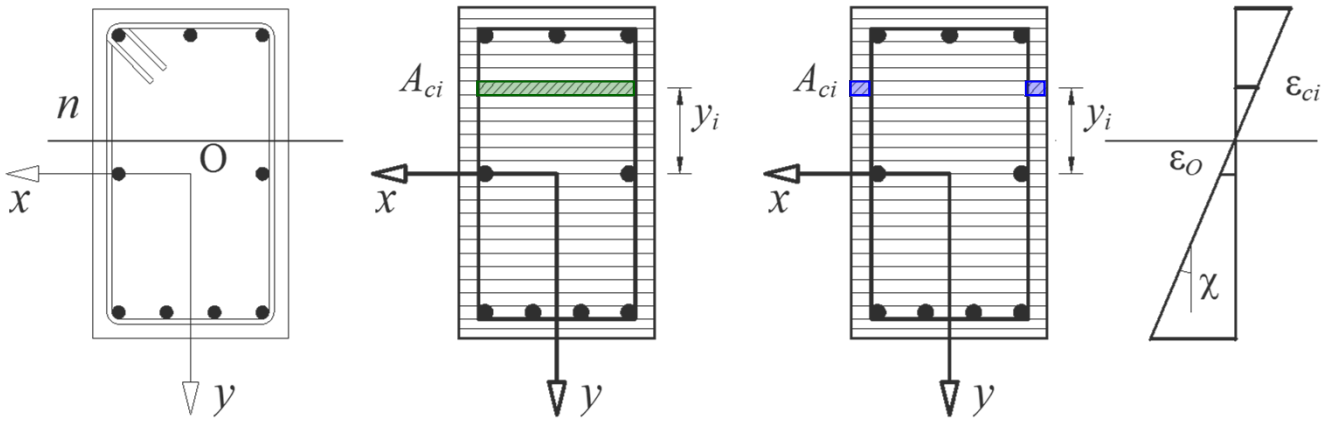
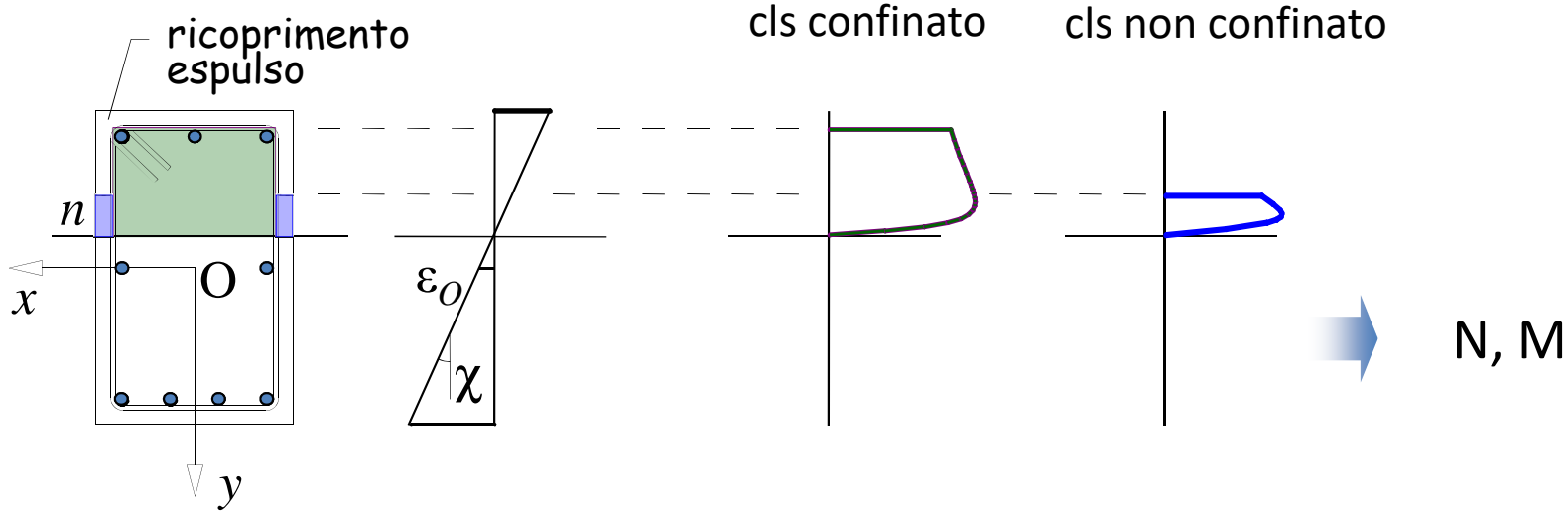


diagramma ε

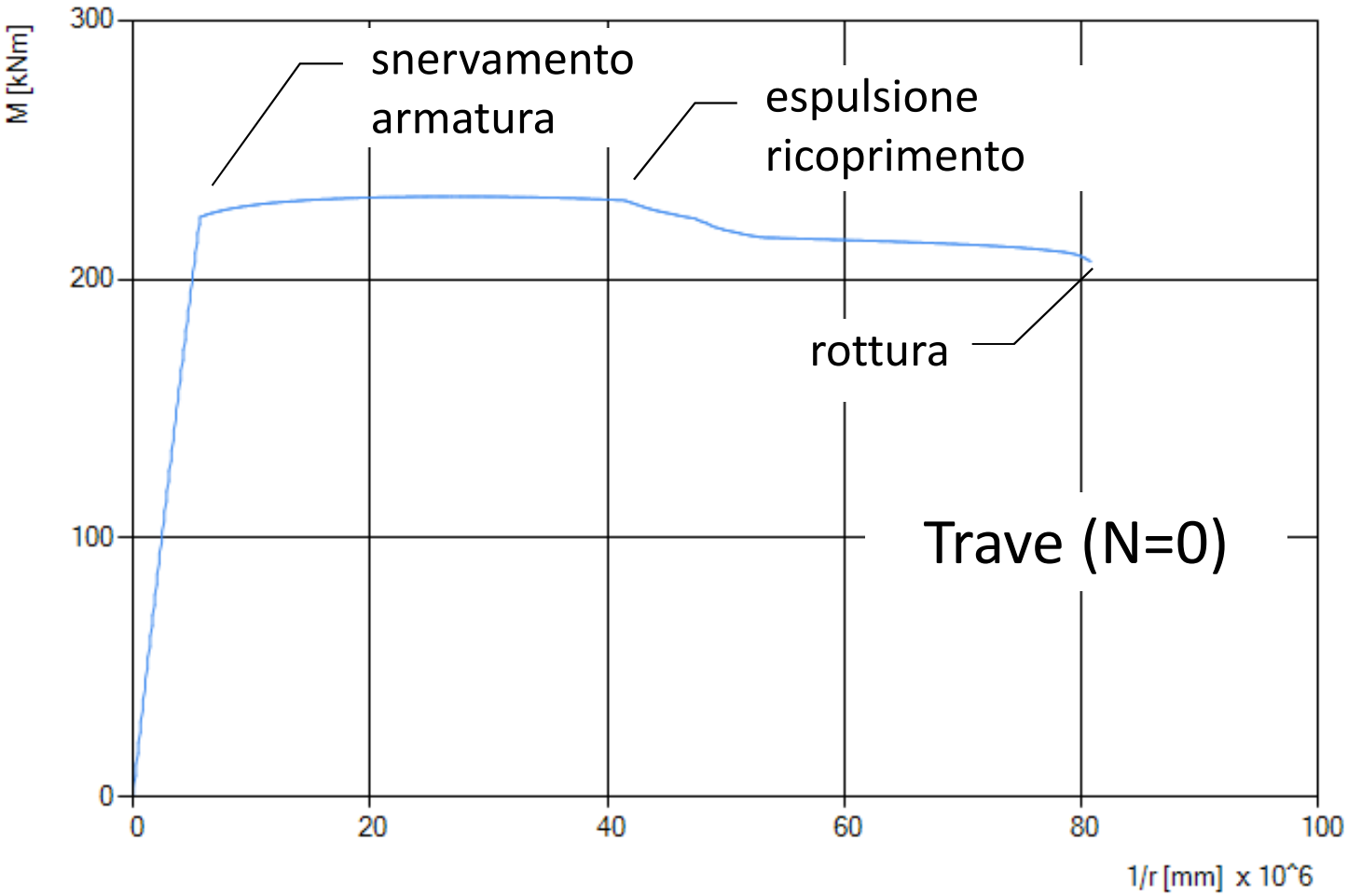
diagramma σ
cls confinato

diagramma σ
cls non confinato



Legame momento-curvatura

mediante modello a fibre

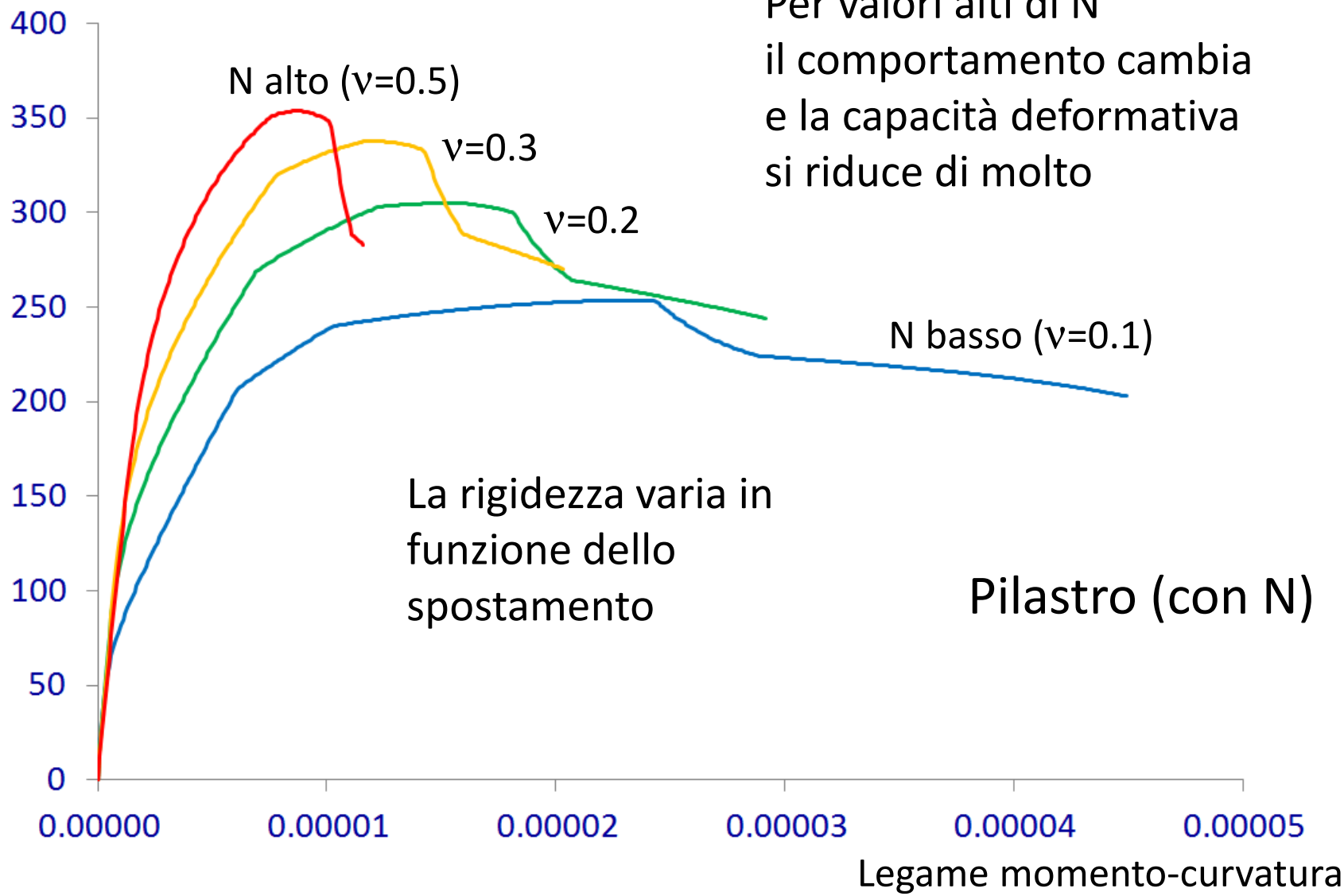


La rigidezza è sostanzialmente
quella della sezione fessurata

Legame momento-curvatura

Legame momento-curvatura

mediante modello a fibre



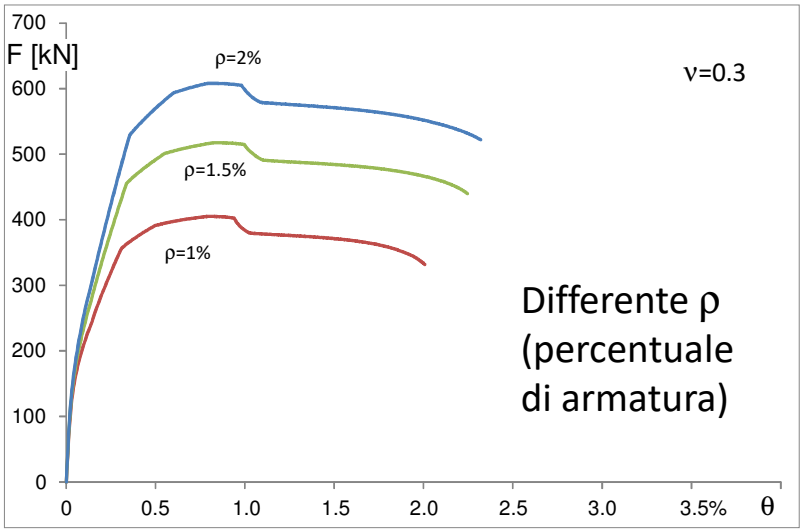
Per valori alti di N
il comportamento cambia
e la capacità deformativa
si riduce di molto

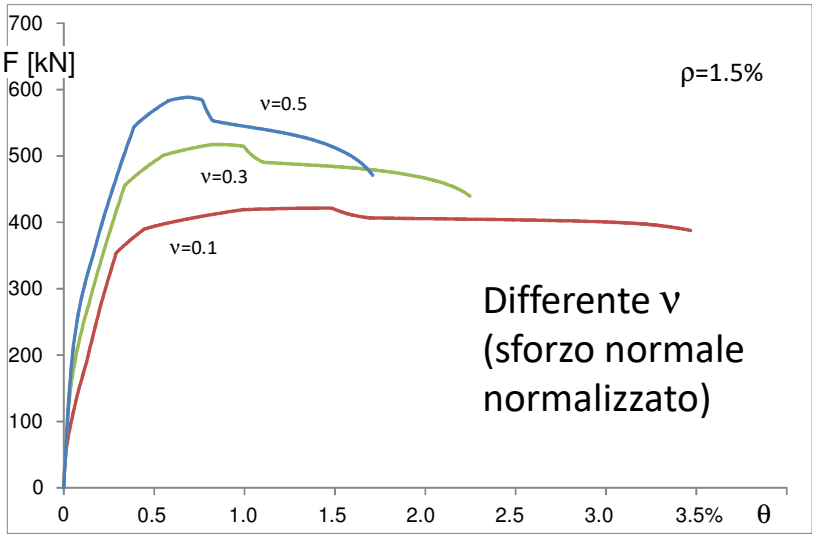
La rigidezza varia in
funzione dello
spostamento

Pilastro (con N)

Legame forza-spostamento
mediante modello a fibre

- In maniera analoga si ottiene il diagramma forza-spostamento (o momento-rotazione) per un'asta





Diagrammi riferiti a pilastri con differente percentuale di armatura e differente sforzo normale

Nelle ascisse lo spostamento è normalizzato dividendolo per la lunghezza dell'asta

Duttilità

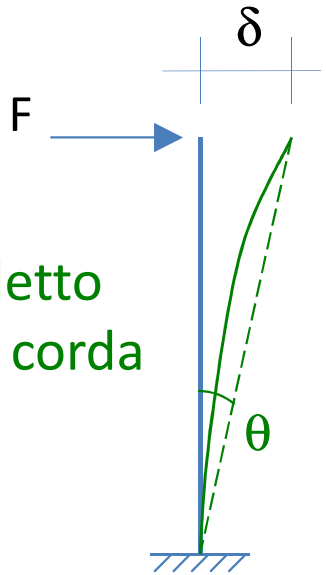
Qual è la capacità deformativa
di un’asta in cemento armato?

Capacità deformativa

valutazione sperimentale

- Molta sperimentazione è stata fatta con schemi a mensola (o analoghi a questo)

L'angolo θ è detto rotazione alla corda



- Misurare le deformazioni nella zona plasticizzata (per trovare il legame momento-curvatura) è difficile.
- È più facile trovare il legame forza-spostamento

Capacità deformativa

verifica strutturale

- Nella verifica di una struttura intelaiata si può assumere che il collasso di un pilastro si abbia quando viene raggiunto il valore limite θ_u della rotazione alla corda
- È possibile calcolare la rotazione limite θ_u in vari modi
  1. Con una formulazione ricavata da studi sperimentali di Panagiotakos e Fardis (Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1)
  2. Con una formulazione analitica (Circolare NTC18, equazione C8.7.2.5)
  3. Con modelli a fibre (come i programmi RC_NL o OpenSees)

Capacità deformativa

verifica strutturale

- Nella verifica di una struttura intelaiata si può assumere che il collasso di un pilastro si abbia quando viene raggiunto il valore limite $\theta_{u(SLC)}$ della rotazione alla corda
- Nelle verifiche allo stato limite di salvaguardia della vita SLV si assume che esso corrisponda al raggiungimento del 75% della rotazione alla corda di collasso

$$\theta_{u(SLV)} = 0.75\ \theta_{u(SLC)}$$

Rotazione alla corda

1. formulazione sperimentale

- Valore limite della rotazione alla corda a collasso (CO, ovvero SLC)

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

  - Moltiplicare per 0.85 negli elementi non dotati di adeguati dettagli antisismici
  - Moltiplicare per 0.75 in presenza di barre lisce o ancoraggi non sufficienti

Da studi di Panagiotakos e Fardis

Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1

Rotazione alla corda

1. formulazione sperimentale

- Valo
  SLC)

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}$$

  – N
    c
  – N
    s

  Da

Note:

OPCM 3431 - Negli elementi non dotati di adeguati dettagli di tipo antisismico il valore deve essere moltiplicato per 0.85. In presenza di barre lisce e di condizioni di ancoraggio insoddisfacenti il valore deve essere moltiplicato per 0.575.

Circolare NTC18 - Negli elementi non dotati di adeguati dettagli di tipo antisismico … quindi con percentuali di armatura trasversale e longitudinale diverse da quelle ottenibili utilizzando le indicazioni riportate per la progettazione delle nuove costruzioni, il valore deve essere moltiplicato per 0.85. … Per gli elementi armati con barre longitudinali lisce continue, senza sovrapposizione in corrispondenza della regione plastica, la capacità di rotazione in condizioni di collasso è inalterata. Viceversa, se le barre longitudinali lisce sono caratterizzate, a partire dalla sezione di estremità dell'elemento, da una sovrapposizione di lunghezza *lo* il valore deve essere moltiplicato per il fattore $0.02\times [10 + \min(40, l_o / d_{bL})]$ dove d_{bL} è il diametro (medio) delle barre longitudinali.

Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1

Rotazione alla corda

1. formulazione sperimentale

- Valore
  SLC)

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,($$

  - Mo
    det
  - Moltiplicare per 0.75 in presenza di barre lisce o ancoraggi non sufficienti

Da studi di Panagiotakos e Fardis

Note:

Eurocodice 8.3 (2005, agg. 2010) – Nelle membrature prive di dettagli locali per la resistenza antisismica il valore deve essere diviso per 1.2. Nelle membrature con barre longitudinali lisce, senza giunzioni vicine alle regioni di estremità dove si prevede lo snervamento, il valore deve essere moltiplicato per 0.8 (questo coefficiente include il fattore di riduzione 1.2 precedentemente citato). Se le barre longitudinali lisce sono giuntate all'inizio della sezione di estremità della membratura … il valore deve essere moltiplicato per il fattore
$0.019\,[10 + \min(40, l_o / d_{bL})]$.

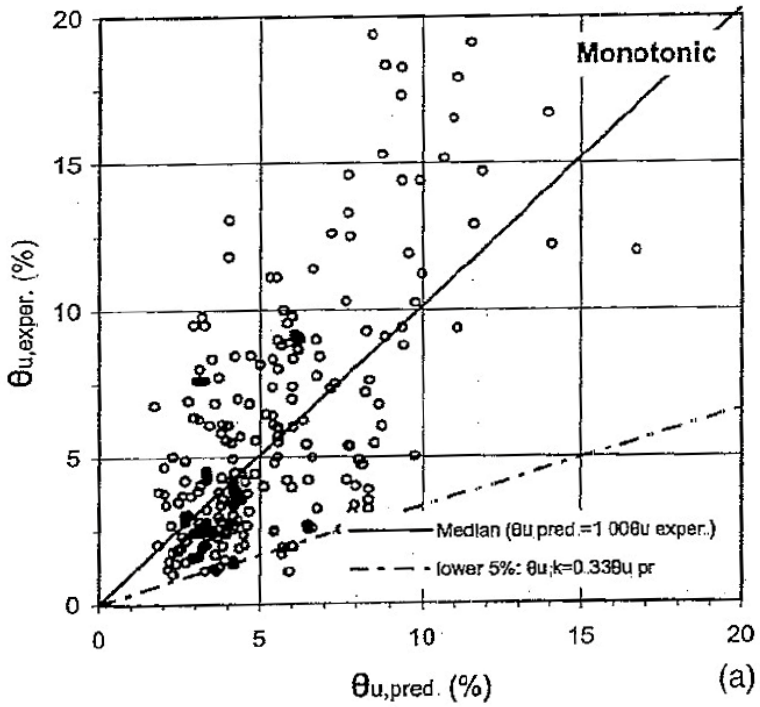
Circolare NTC18, equazione C8.7.2.1

Rotazione alla corda

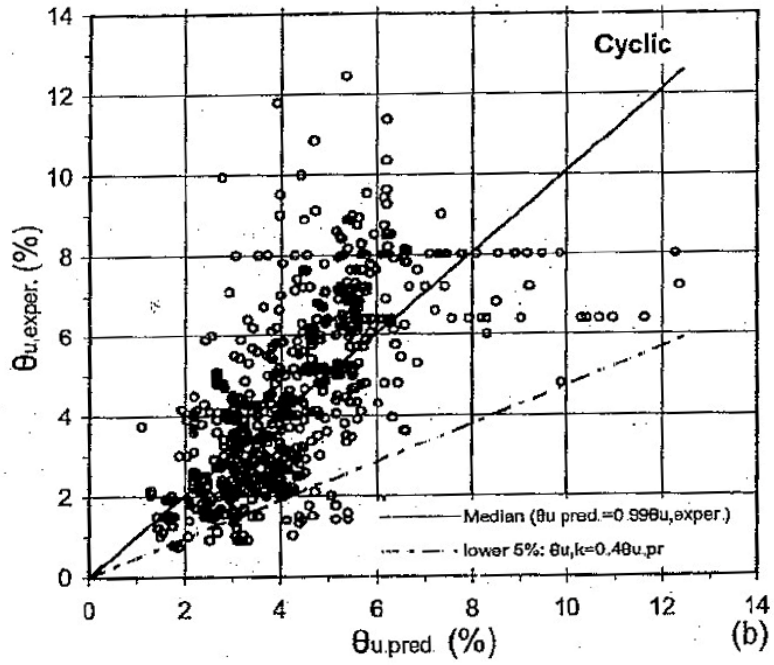
1. formulazione sperimentale

Confronto tra dati sperimentali e valori della formula

prove monotone



prove cicliche



Panagiotakos e Fardis, Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate, ACI Structural Journal, 2001

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

$\gamma_{el} = 1.5$ per gli elementi primari

$$\frac{1}{\gamma_{el}} = 0.6667$$

Questo coefficiente non compare negli studi sperimentali
Ritengo abbia un significato analogo ai coefficienti parziali di sicurezza dei materiali

File TelY.xls – foglio rot corda

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

f_{cm} = 19 MPa, FC = 1.2

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

$$f_c = \frac{f_{cm}}{FC} = \frac{19}{1.2} = 15.83 \text{ MPa}$$

$$\nu = \frac{N}{A_c \; f_c} = \frac{400 \times 10^3}{900 \times 10^2 \times 15.83} = 0.2808$$

$$0.3^{\nu} = 0.7132$$

Nota:
La normativa dice di usare i valori non divisi per γ, forse perché γ_{el} ha la stessa funzione

Ma se si usano modelli a fibre si dovrebbero usare come riferimento le resistenze divise per γ perché la rottura è fragile

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

$$\omega = \frac{A_s}{b\,h} \frac{f_y}{f_c} \qquad \omega' = \frac{A'_s}{b\,h} \frac{f_y}{f_c}$$

per pilastri $\omega = \omega'$

Nota:
La normativa dice di usare i valori non divisi per γ, forse perché γ_{el} ha la stessa funzione

$$\left[\frac{\max(0.01,\omega')}{\max(0.01,\omega)} f_c \right]^{0.225} = 15.83^{0.225} = 1.8616$$

Ma se si usano modelli a fibre si dovrebbero usare come riferimento le resistenze divise per γ perché la rottura è fragile

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

L_{netta} = 2.70 m

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

$L_v = 135\ \text{cm}$

$h = 30\ \text{cm}$

luce di taglio = distanza dal punto di flesso (metà della lunghezza netta del pilastro)

$$\left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.35} = \left(\frac{135}{30} \right)^{0.35} = 1.6929$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

staffe ∅6/25

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

Contributo delle staffe: per staffatura modesta viene circa 1

$$\rho_{st} = \frac{A_{st}\ l_{tot,st}}{s\ b_0\ h_0} = \frac{0.2827 \times 88}{25 \times 22 \times 22} = 0.002056$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

Contributo delle staffe: per staffatura modesta viene circa 1

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{3\,b_0}\right)\left(1 - \frac{s'}{3\,h_0}\right) = \left(1 - \frac{25}{3\times 22}\right)\left(1 - \frac{25}{3\times 22}\right) = 0.3859$$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6\,b_0\,h_0} = 1 - 4\times\frac{22^2}{6\times 22\times 22} = 0.3333 \qquad \alpha = \alpha_s\,\alpha_n = 0.1286$$

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

Contributo delle staffe: per staffatura modesta viene circa 1

Più precisamente, in questo caso, 1.0248 – lo trascuro

Contributo di ferri piegati – non ce ne sono

Rotazione alla corda

formulazione sperimentale - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0{,}016 \cdot (0{,}3^{\nu}) \left[\frac{\max(0{,}01;\omega')}{\max(0{,}01;\omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h} \right)^{0{,}35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1{,}25^{100\rho_d})$$

- Dotato di adeguati dettagli antisismici: NO (x 0.85)
- Barre lisce o ancoraggi non sufficienti: NO

Quindi, per CO (SLC):

$$\theta_{u(CO)} = 0.85 \times 0.6667 \times 0.0160 \times 0.7132 \times 1.8616 \times 1.6929 =$$
$$= 0.020380$$

Rotazione alla corda

2. formulazione analitica

- Valore limite della rotazione alla corda a collasso (CO, ovvero SLC):

  Può essere calcolato partendo dalla rotazione della cerniera plastica

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}\left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y)L_{pl}\left(1 - \frac{0{,}5L_{pl}}{L_V}\right)\right)$$

  È meno agevole utilizzarla, perché occorre determinare preliminarmente la rotazione ultima della cerniera plastica

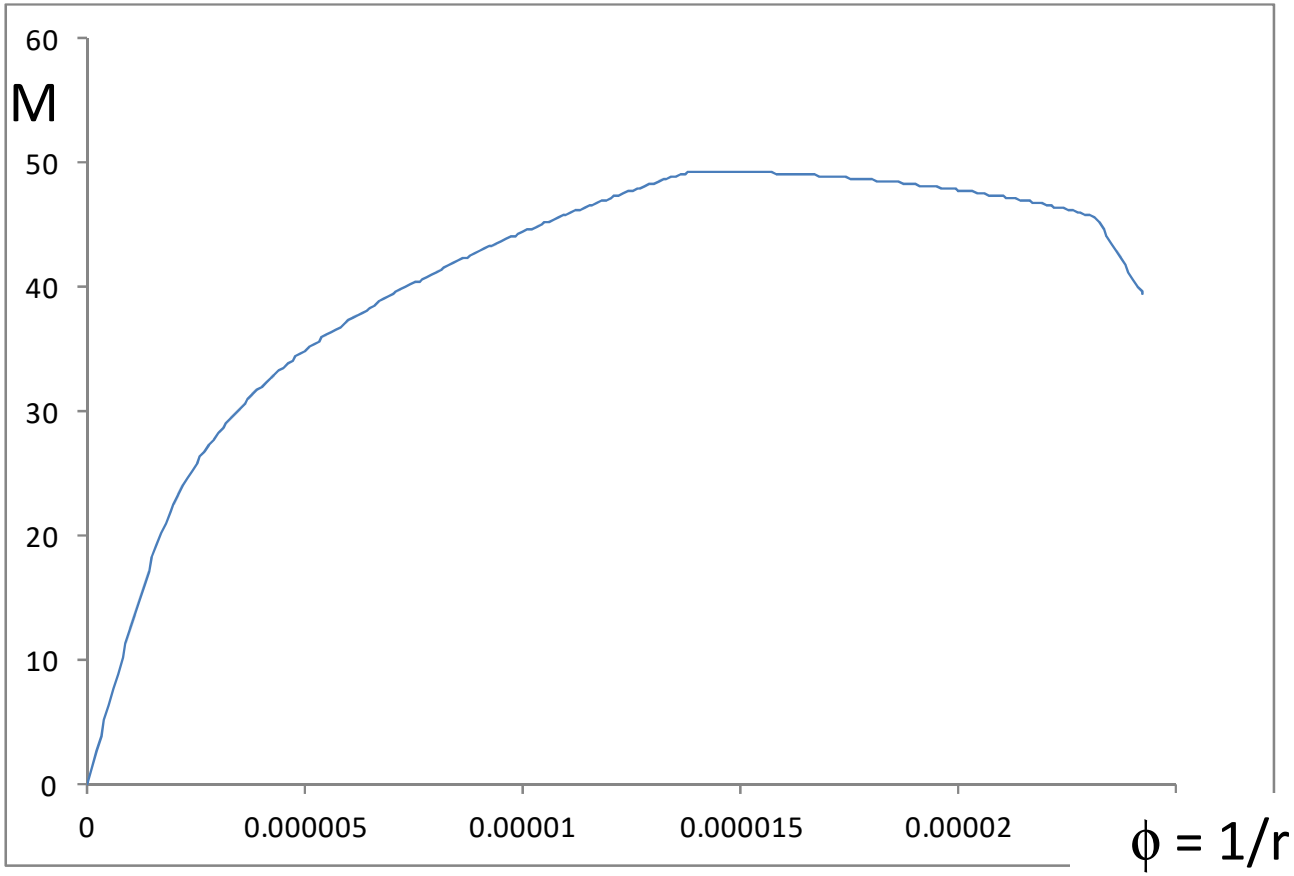
Circolare NTC18, equazione C8.7.2.5

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- Usando il programma RC_NL



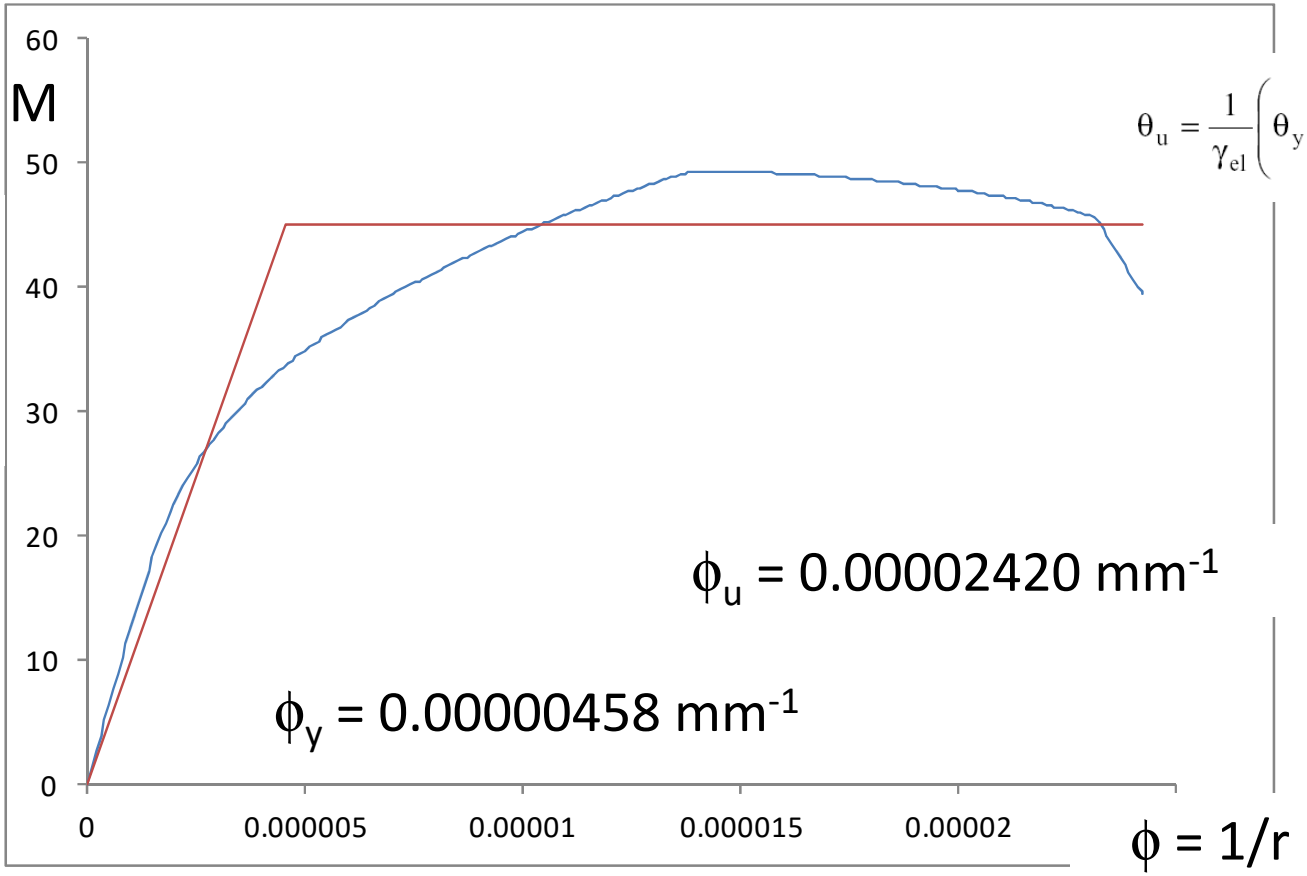
Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- e sostituendo la curva con una bilatera

M_y = 45.09 kNm



$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}\left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y)L_{pl}\left(1 - \frac{0{,}5L_{pl}}{L_V}\right)\right)$$

$\phi = 1/r$

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- L_v = 135 cm metà dell'altezza netta del pilastro

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}\left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y)L_{pl}\left(1 - \frac{0{,}5L_{pl}}{L_V}\right)\right)$$

- L_{pl} lunghezza della cerniera plastica

$$L_{pl} = 0{,}1L_V + 0{,}17h + 0{,}24\frac{d_{bL}f_y}{\sqrt{f_c}}$$

d_{bL}, diametro delle barre longitudinali = 12 mm

f_y = 420/1.2/1.15 = 304.4 MPa

f_c = 19/1.2/1.5 =10.56 MPa

si ottiene L_{pl} = 455.8 mm

Nota:
La normativa dice di usare i valori non divisi per γ, forse perché γ_{el} ha la stessa funzione

Circolare NTC18, equazione C8.7.2.6

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}\left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y)L_{pl}\left(1 - \frac{0{,}5L_{pl}}{L_V}\right)\right)$$

- θ_y rotazione alla corda al primo snervamento

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V}{3} + 0{,}0013\left(1 + 1{,}5\frac{h}{L_V}\right) + 0{,}13\phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

si ottiene $\theta_y = 0.004423$

Circolare NTC18, equazione C8.7.2.7a

Rotazione alla corda

formulazione analitica - esempio

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN

- γ_{el} coefficiente di sicurezza per elementi primari

  $\gamma_{el} = 1.5$

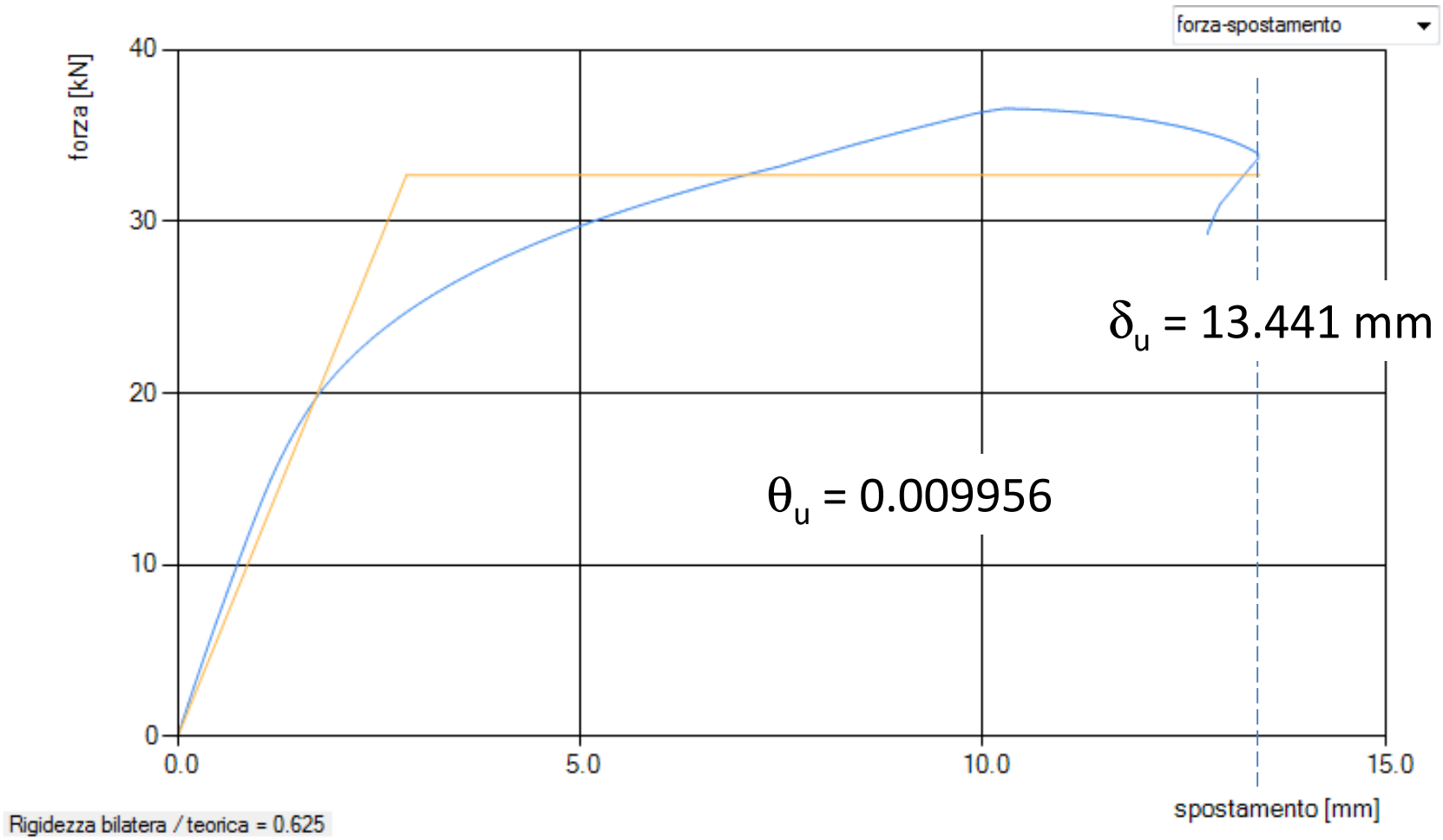
- θ_u rotazione alla corda al collasso

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}}\left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y)L_{pl}\left(1 - \frac{0{,}5L_{pl}}{L_V}\right)\right) = 0.007904$$

Rotazione alla corda

3. modello a fibre (programma RC_NL 3.0)

Sezione 30x30 con 4Ø12, N=400 kN – L_{asta}=135 cm



Rotazione alla corda

confronto tra formulazioni

	1. sperim.	2. analit.	3. RC_NL
• Rotazione ultima alla corda, per SLC	0.015711	0.007904	0.009956
• Rotazione ultima alla corda, per SLV (ottenuta moltiplicando x 0.75)	0.011783	0.005366	0.007467
• Spostamento ultimo alla corda, per SLV (ottenuta moltiplicando per h_{netta} = 2700 mm)	31.81 mm	16.01 mm	20.16 mm

La differenza è veramente forte

Rotazione alla corda

altre formulazioni possibili

- Esistono numerose altre formulazioni, ad esempio

Modello "Zhu et al 2007"
Per la *mediana* si può utilizzare l'espressione:

$$\theta_f = 0.049 + 0.716\rho + 0.120\frac{\rho_{sx} f_{yw}}{f_c} - 0.042\frac{s}{h} - 0.070\nu$$

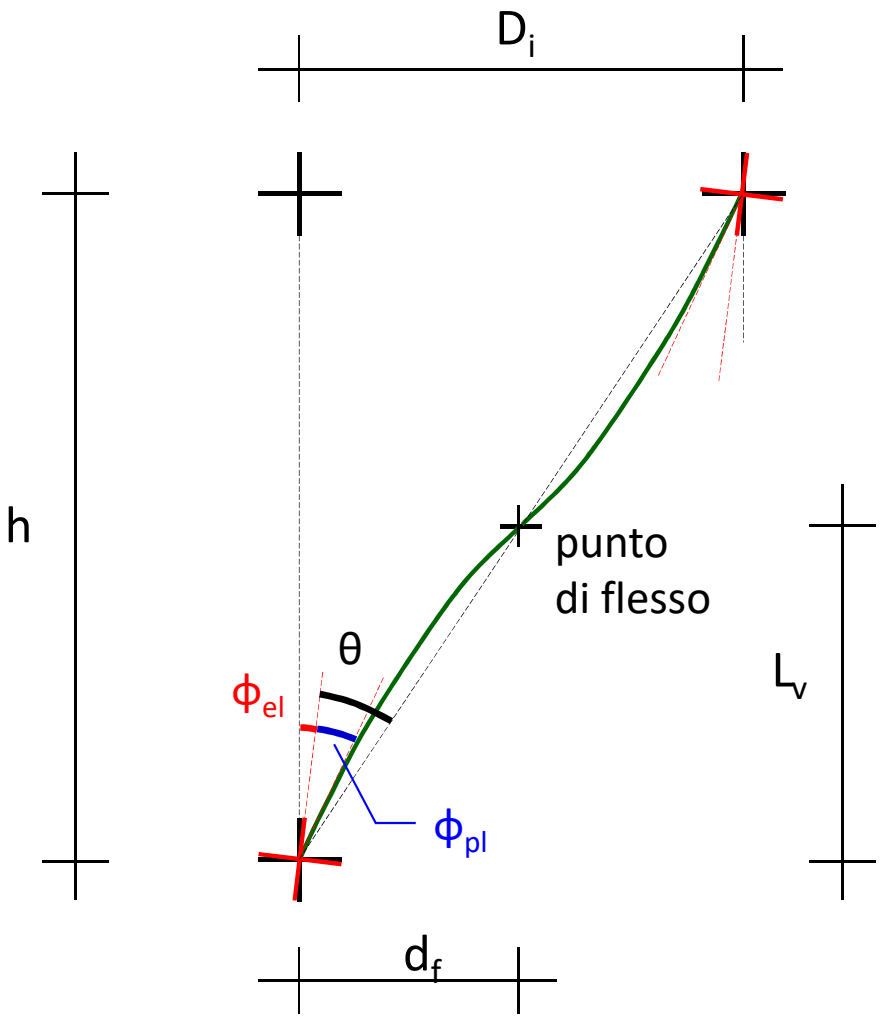
Modello "Haselton et al 2007"
Per la *mediana* si può utilizzare l'espressione:

$$\theta_f = 0.14(1 + 0.4a_{sl})(0.19)^{\nu}(0.02 + 40\rho_{sh})^{0.54}(0.62)^{0.01 f_c}$$

Quindi qualunque numero deve essere preso solo come una indicazione di massima

Deformazione dei pilastri

e rotazione alla corda



θ rotazione rispetto alla corda

$$\theta = \frac{d_f}{L_v} \cong \frac{d_f}{h/2}$$

Se la situazione è uguale in testa e al piede

$$\theta = \frac{D_i}{h}$$

$$D_i = \theta\, h$$

Deformazione plastica dei pilastri

e rotazione alla corda

- Se la rotazione elastica dei nodi è molto piccola ed il punto di flesso è circa a metà altezza è molto comodo usare nel giudizio lo spostamento di interpiano D_i, assumendo $D_i = \theta\ h_{net}$

  Perfetto per un primo giudizio rapido

- Se questo non è vero occorre calcolare θ tenendo conto dell'effettivo valore di φ_{el} e L_v
  - Più complicato
  - Più semplice ragionare in termini di φ_{pl} (fornito direttamente dal programma)
  - Occorre conoscere $\varphi_{pl,u}$ o correlarlo a θ_u

  Necessario a volte per un giudizio più preciso

Deformazione plastica delle travi

e rotazione alla corda

- La sperimentazione da cui sono ricavate le formule di normativa e il concetto di rotazione alla corda sono riferiti esclusivamente a pilastri
- Le travi sono usualmente molto duttili e in prima approssimazione si può trascurare la loro possibilità di collasso

- Se la si vuole controllare occorre fare riferimento direttamente alla rotazione plastica limite $\varphi_{pl,u}$ dei conci di estremità

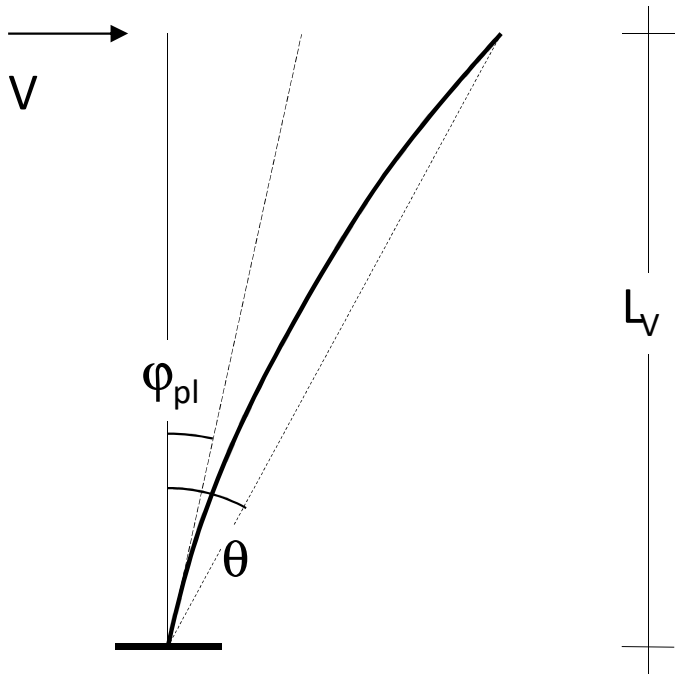
  Necessario a volte per un giudizio più preciso

Rotazione plastica di un concio

valore ultimo

- Può essere calcolata con apposite formule o con programmi (ad esempio RC_NL)

- Può essere messa in relazione al valore ultimo della rotazione alla corda



$$\varphi_{pl,u} = \theta_u - \frac{V_u \, L_v^2}{3 \, E \, I}$$

Il programma RC_NL

Applicazioni pratiche

Legame momento-curvatura

Applicazioni

Per applicazioni numeriche è messo a disposizione il programma RC_NL (versione 3.0f), che determina il legame momento curvatura per una qualsiasi sezione o il legame forza-spostamento per una qualsiasi asta

- È fornito il programma di installazione
  (cartella RC_NL-30f_setup):
  eseguire il file Setup per installare il programma
- È fornita una documentazione con istruzioni per l'uso e alcuni esempi
  (cartella RC_NL-30a_documentazione)

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

Il programma RC_NL

- Ciascun pilastro o trave soggetti ad azioni orizzontali possono essere visti (a meno della rotazione del nodo) come unione di due mensole
- Assegnata la geometria dell'asta e la resistenza dei materiali (conformemente a quanto detto) si può
  - Valutare il legame forza-spostamento dell'asta
  - Schematizzando il legame forza-spostamento dell'asta con una bilatera, determinare la rigidezza (anche per un qualunque livello di spostamento)
  - Determinare lo spostamento massimo e quindi la duttilità dell'asta (capacità deformativa e rotazione alla corda ultima)

Il programma RC_NL

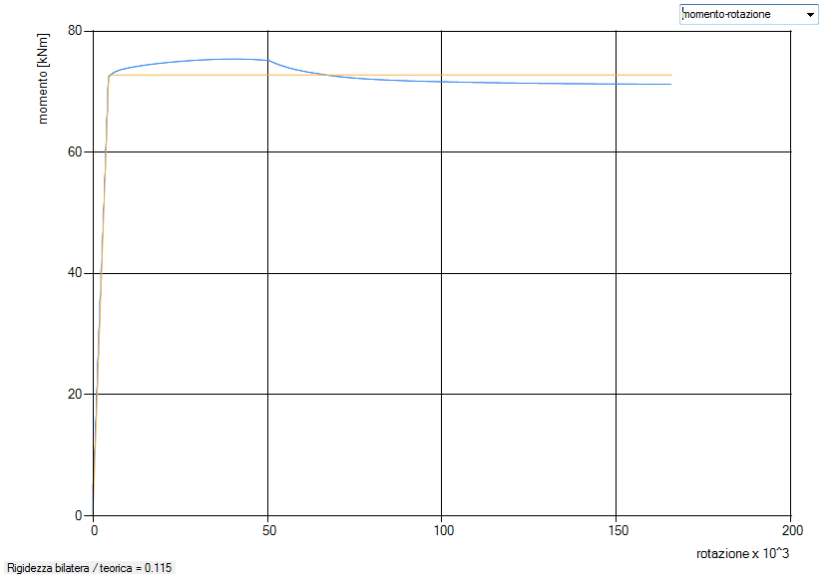
Rigidezza di un’asta

- Il programma fornisce il rapporto tra rigidezza della bilatera (tratto iniziale) e rigidezza teorica (asta con sezione geometrica)
  - I valori della resistenza devono essere quelli ottenuti dividendo per FC
  - Si consiglia di usare i modelli di default del materiale (EC2 per calcestruzzo, elastoplastico per acciaio)
  - La rigidezza di un’asta andrebbe commisurata allo spostamento massimo cui essa è soggetta
  - I valori forniti dal programma devono essere scalati tenendo conto del tratto rigido (e della eventuale differenza tra modulo elastico usato da RC_NL e modulo elastico usato dal programma di calcolo)

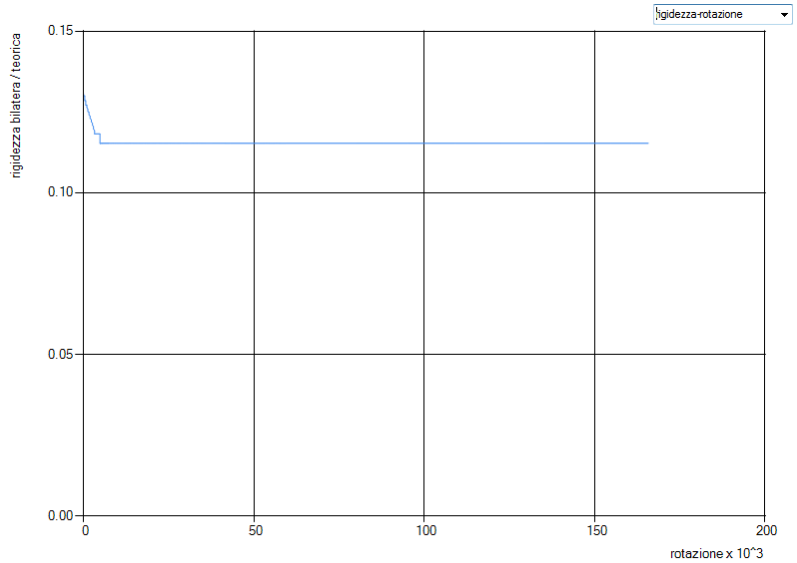
Il programma RC_NL

Rigidezza di un'asta

- Esempio – trave 30x50 (sezione a T)



Legame momento-rotazione



Rigidezza al variare della rotazione

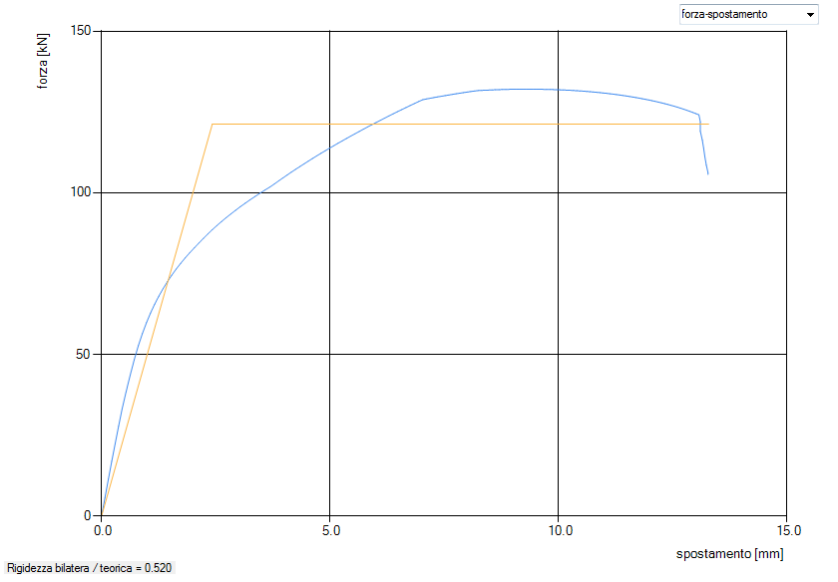
Tenendo conto della differenza tra lunghezza netta (5.00 m) e distanza asse-asse (5.50 m) si ottiene, per un modello di telaio senza tratti rigidi, un coefficiente riduttivo della rigidezza (rispetto al valore nominale) pari a circa 0.3

Indicazioni su come procedere sono riportate nel file "Uso di RC_NL"

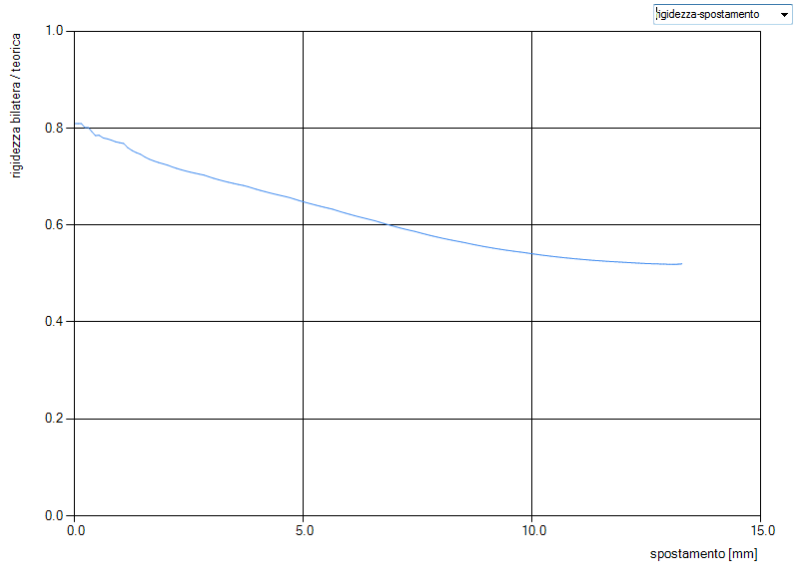
Il programma RC_NL

Rigidezza di un'asta

- Esempio – pilastro 30x50



Legame forza-spostamento



Rigidezza al variare dello spostamento

Tenendo conto della differenza tra lunghezza netta (2.70 m) e distanza asse-asse (3.20 m) si ottiene un coefficiente moltiplicativo della rigidezza (rispetto al valore nominale) pari a 1.1 per piccoli spostamenti, ridotto fino a 0.77 al collasso

Indicazioni su come procedere sono riportate nel file "Uso di RC_NL"

Il programma RC_NL

Duttilità di un'asta

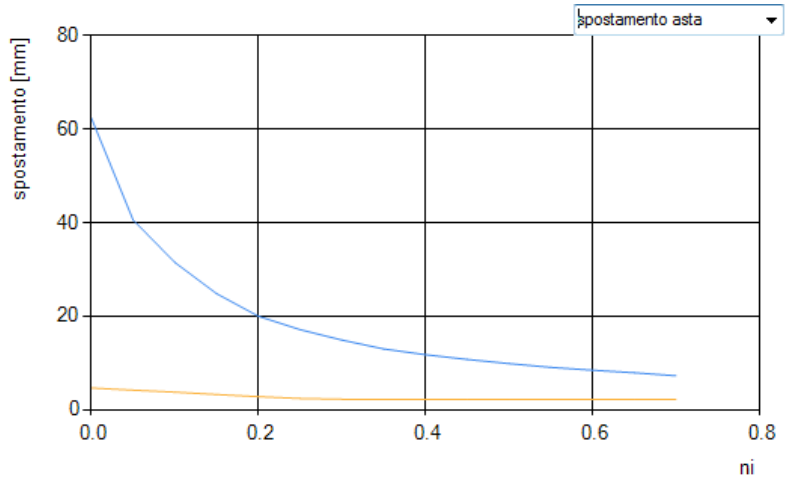
- Si può valutare, per un valore di N o al variare di N, il valore dello spostamento ultimo dell'asta. Questo valore, diviso per la lunghezza dell'asta, dà la rotazione alla corda ultima
  - I valori della resistenza devono essere quelli ottenuti dividendo per FC e per γ_M
  - Si consiglia di usare i modelli di default del materiale (EC2 per calcestruzzo, elastoplastico per acciaio)
  - Si consiglia di usare il minore tra valore fornito dal programma e valore ottenuto mediante l'espressione C8A.6.1 delle NTC. Quest'ultimo è in genere più grande, tranne che per N molto piccolo.

- Indicazioni su come procedere sono riportate nel file "Uso di RC_NL"

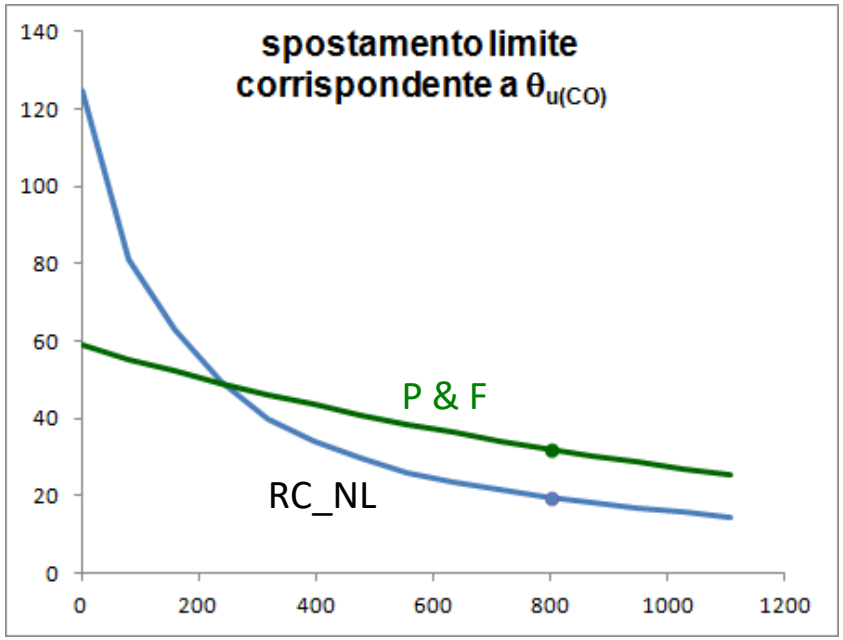
Il programma RC_NL

Duttilità di un'asta

- Esempio – pilastro 30x50



Capacità deformativa al variare di $\nu = N / f_c$



Per N=800 kN si ottiene uno spostamento ultimo pari a 19.5 mm per SLC - 14.6 mm per SLV con RC_NL

(32.1 mm per SLC – 24.0 mm per SLV con formule Panagiotakos Fardis)

Indicazioni su come procedere sono riportate nel file "Uso di RC_NL"

Elaborazioni svolte col file Excel "Capacità def"