Università degli studi di Bergamo

Scuola di Ingegneria (Dolmine)

CCS Ingegneria Edile

LM-24 Ingegneria delle Costruzioni Edili

Dinamica, Instabilità e Anelasticità delle Strutture

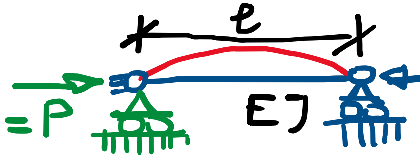
(ICAR/08 - SdC; 6 CFU)

A.A. 2022/2023

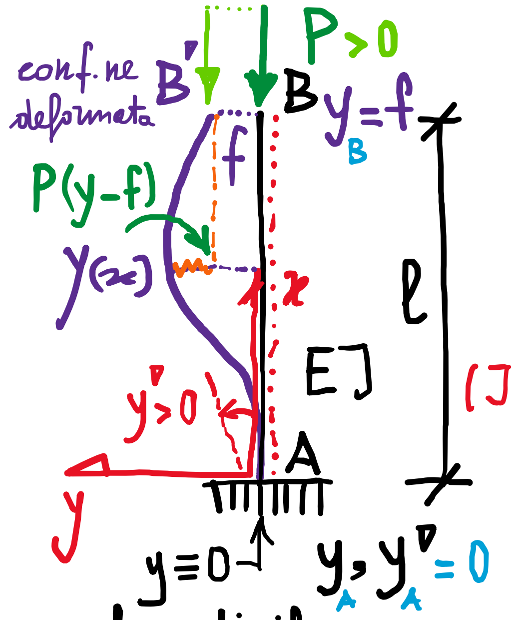
prof. Egidio RIZZI
egidio.rizzi@unibg.it

LEZIONE 21

Altre condizioni di vincolo (generalizzazione dell'asta di Eulero



)



conf.ne di rif. (equilibrata)

LE: $\underbrace{EJ}_{>0}\, y''(x) = +M(x)$ (nella configuraz. deform.)

$= -P(y(x)-f) = -Py + Pf$

$$P^E_{cr} = \pi^2 \frac{EJ}{l^2}, \quad \pi^2 \simeq 10$$

formula di Eulero

$$y''(x) + \underbrace{\frac{P}{EJ}}_{\alpha^2>0}\, y(x) = \underbrace{\frac{P}{EJ}}_{\alpha^2=\frac{P}{EJ}}\, f \;\leadsto\; y(x) = \underbrace{A\sin\alpha x + B\cos\alpha x}_{\text{integr. gen. omog. assoc.}} + \underbrace{f}_{\text{integr. part.}}$$

$\alpha l \frac{x}{l}$

$$P = \alpha^2 l^2 \frac{EJ}{l^2} = (\alpha l)^2 \frac{EJ}{l^2}$$

Scrittura e imposizione delle c.c.:

$$\begin{cases} y(0)=0 \Rightarrow B+f=0 \dashrightarrow B=-f \\ y'(0)=0 \Rightarrow \alpha l\, \boxed{A=0} \\ y(l)=f \Rightarrow \sin\alpha l\, A + \cos\alpha l\, B + \cancel{f} = \cancel{f} \;\checkmark \end{cases}$$

Sistema delle condizioni al contorno

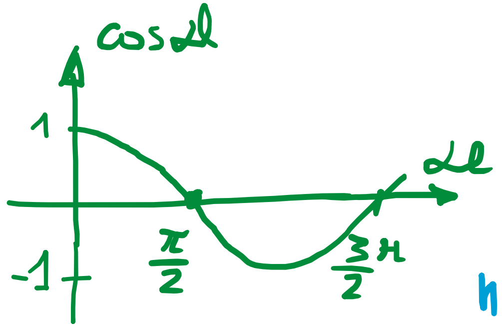
$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ \alpha l & 0 & 0 \\ \sin\alpha l & \cos\alpha l & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbb{D}} \underbrace{\begin{Bmatrix} A \\ B \\ f \end{Bmatrix}}_{\mathbb{X}} = \mathbb{0}$$

($\mathbb{X}=\mathbb{0}$ soluz. "banale")

Soluzioni non banali $y \neq 0$ sse:

condiz. di singolarità: $\det\mathbb{D} = \underbrace{\alpha l}_{\neq 0}\, \underline{\cos\alpha l = 0}$

$\alpha l = n\frac{\pi}{2}$ dispari $n = 1, 3, 5 \ldots$



$$(\alpha l)^2 = n^2 \frac{\pi^2}{4} \leadsto P_{cr,n} = n^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{EJ}{l^2}$$

$$n=1 \quad P^E_{cr} = \frac{1}{4}\pi^2 \frac{EJ}{l^2} = \frac{1}{4} P^E_{cr,aE} = \pi^2 \frac{EJ}{l_{0,n}^2}; \quad l_{0,n} = \frac{2}{n} l$$

lungh. di libera inflessione

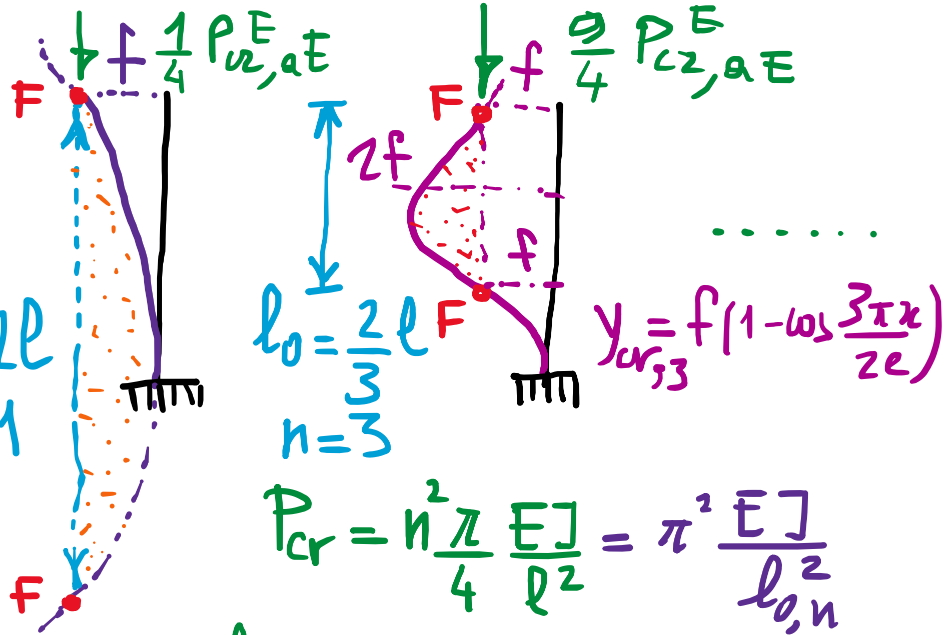
– Soluzione e deformate critiche (μ $\alpha l = n\frac{\pi}{2}$)

$$\begin{cases} B = -f \\ A = 0 \end{cases} \Rightarrow y_{cr,n}(x) = f\left(1-\cos\frac{n\pi}{2}\frac{x}{l}\right)$$

arbitr.

$$l_{0,n} = \frac{2}{n}\,l \qquad y_{cr,1} = f\left(1-\cos\frac{\pi x}{2l}\right)$$

⇒ nota la lunghezza di libera inflessione della deformata critica è noto il carico crit.

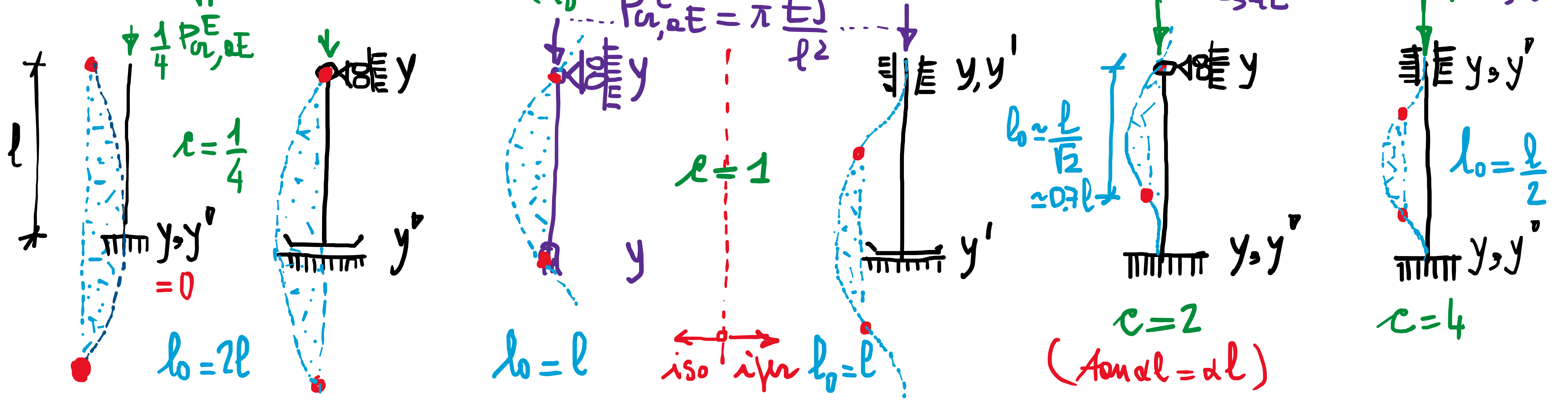


$$P_{cr} = n^2\frac{\pi^2}{4}\frac{EJ}{l^2} = \pi^2\frac{EJ}{l_{0,n}^2}$$

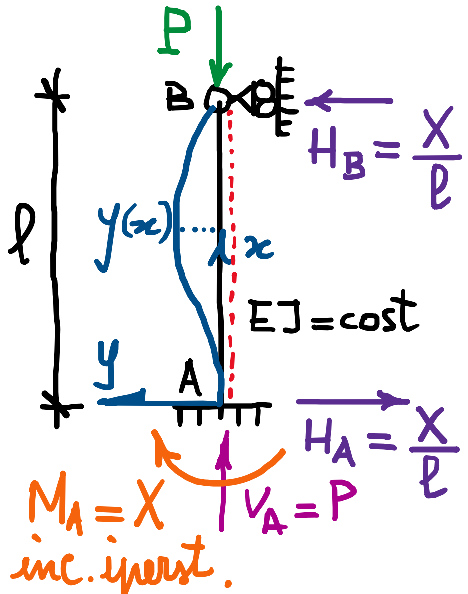
– Altre condizioni di vincolo: $P_{cr}^E = c\,\pi^2\frac{EJ}{l^2} = \pi^2\frac{EJ}{l_0^2} \Rightarrow l_0 = \frac{l}{\sqrt{c}}$

coeff. di vincolo $c = \left(\frac{l}{l_0}\right)^2$

$$P^E_{cr,aE} = \pi^2\frac{EJ}{l^2}$$



- Soluzione asta iperstatica incastro-carrello



• Eq.ne differenziale della LE (con equil. nella conf.ne deformata):

$$EJ\,y''(x) = M(x) = -P\,y(x) + \frac{X}{\ell}(\ell - x)$$

$$EJ\,y'' + P\,y = \frac{X}{\ell}(\ell - x)$$

$$y'' + \alpha^2 y = \frac{\alpha^2}{\alpha^2\ell^2}\frac{\ell^2}{EJ}X\left(1 - \frac{x}{\ell}\right) = \frac{\alpha^2}{\alpha^2\ell^2}\bar{X}\left(1 - \frac{x}{\ell}\right)$$

$$\alpha^2\ell^2 = \frac{P}{EJ}\ell^2 \Rightarrow P = (\alpha\ell)^2\frac{EJ}{\ell^2} \qquad \bar{X} = \frac{X\ell^2}{EJ}$$

• Condizioni al contorno (c.c.)

$$\begin{cases} y(0) = 0 \\ y'(0) = 0 \quad \text{eq.ne di congruenza} \\ y(\ell) = 0 \end{cases}$$

• Integrale generale:

lin. in x, con $y'' = 0$

$$y(x) = \underbrace{A\sin\alpha x + B\cos\alpha x}_{\text{int. gen. omog. associata}} + \underbrace{\frac{1}{\alpha^2\ell^2}\bar{X}\left(1 - \frac{x}{\ell}\right)}_{\text{int. particolare}}$$

• Imposizione delle c.c.

$$\begin{cases} y(0) = 0 & B + \frac{1}{\alpha^2\ell^2}\bar{X} = 0 \\ y'(0) = 0 & \alpha A - \frac{1}{\alpha^2\ell^2}\frac{\bar{X}}{\ell} = 0 \quad \cdot\ell \\ y(\ell) = 0 & A\sin\alpha\ell + B\cos\alpha\ell = 0 \end{cases}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1/\alpha^2\ell^2 \\ \alpha\ell & 0 & -1/\alpha^2\ell^2 \\ \sin\alpha\ell & \cos\alpha\ell & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbb{D}} \underbrace{\begin{Bmatrix} A \\ B \\ \bar{X} \end{Bmatrix}}_{\underline{X}} = \underline{0}$$

Sistema delle c.c.

Soluz. non banali ($\underline{X} \neq \underline{0}$) sse $\det\mathbb{D} = 0$:

$$\det\mathbb{D} = -1\,\frac{\sin\alpha\ell}{\cancel{\alpha^2\ell^2}} + \frac{1}{\cancel{\alpha^2\ell^2}}\alpha\ell\cos\alpha\ell = 0 \Rightarrow \boxed{\tan\alpha\ell = \alpha\ell}$$

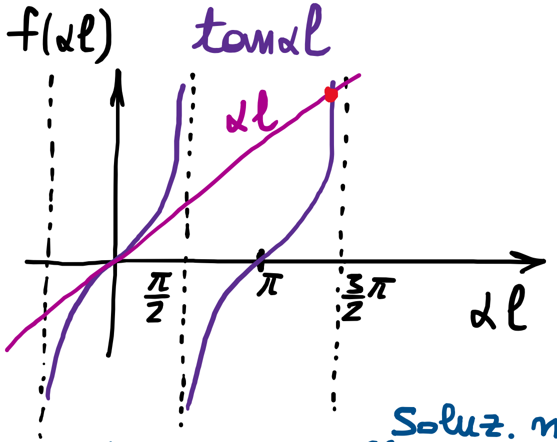
eq.ne trascendente

Soluz. (ove $\det\mathbb{D} = 0$)

$$\bar{X} = -\alpha^2\ell^2 B \qquad \left(\frac{\bar{X}}{\alpha^2\ell^2} = -B\right)$$

$$A = \frac{\bar{X}}{\alpha^3\ell^3} = -\frac{B}{\alpha\ell} \qquad \left(\frac{A}{B} = -\frac{1}{\alpha\ell}\right)$$

(B arbitr.)



Soluz. numerica (iterativa) ricorsiva

$\alpha\ell$	$\operatorname{atan}\alpha\ell + \pi$
4	4.467
	4.492
	4.493
	4.493

$$\Rightarrow \quad \alpha\ell = 4.493 = 1.431\pi$$

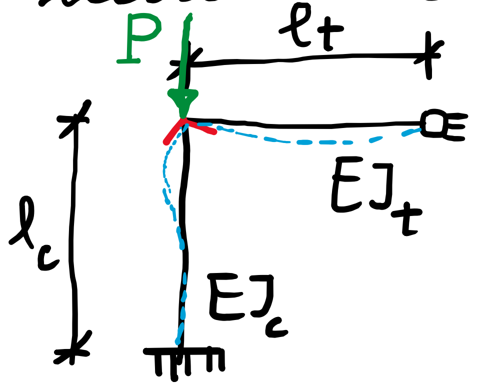
$$\alpha^2\ell^2 = 20.19 = 2.046\pi^2 \simeq 2\pi^2$$

$$P_{cr}^E = 2.046\,\pi^2\frac{EJ}{\ell^2} \simeq \pi^2\frac{EJ}{(\ell/\sqrt{2})^2}$$

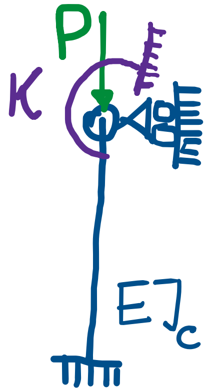
lungh. di libera infless. $\ell_0 \simeq \frac{1}{\sqrt{2}}\ell \simeq 0.7\,\ell$

Deformata critica: $y_{cr}(x) = B\left[-\frac{1}{\alpha\ell}\sin\alpha\ell\frac{x}{\ell} + \cos\alpha\ell\frac{x}{\ell} - \left(1 - \frac{x}{\ell}\right)\right]$ con $\alpha\ell = 1.431\pi$

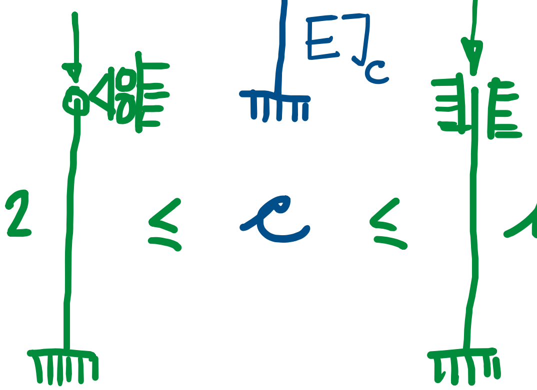
– Telai a nodi fissi (solo rotazioni)



$\Rightarrow$

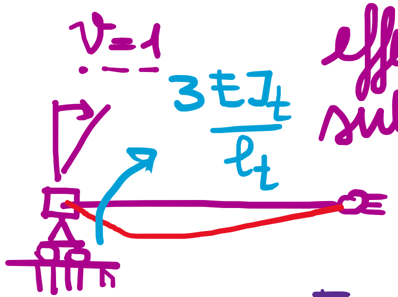


$$K = \frac{1}{\mu}\frac{EJ_c}{\ell_c}$$



$\ell = 2 \leq \ell \leq \ell = 4$

$K=0,\ \mu \to \infty$ $\qquad$ $K \to \infty,\ \mu = 0$



effetto flessionale della trave sulla colonna

$\frac{1}{\mu}$ … coeff. di cedevolezza

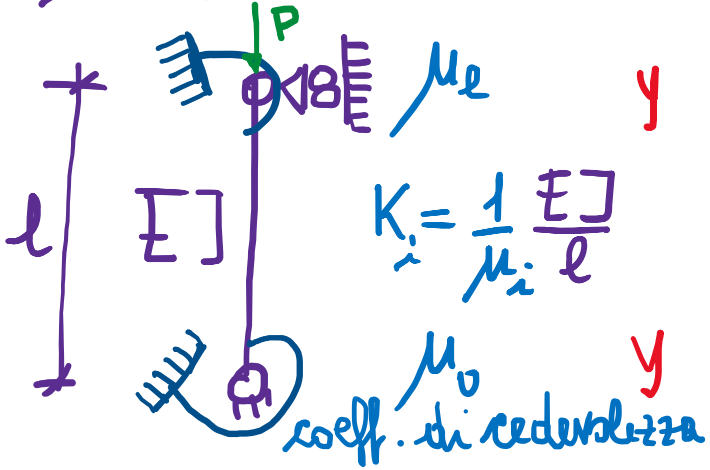
$$K = \frac{M}{v} = 3\frac{EJ_t}{\ell_t}\,\frac{EJ_c}{\ell_c}\,\frac{\ell_c}{EJ_c} = \underbrace{\frac{1}{\frac{1}{3}\frac{EJ_c}{EJ_t}\frac{\ell_t}{\ell_c}}}\frac{EJ_c}{\ell_c}$$

Es. $\mu_0 \to 0,\ \mu_e = \mu$

$$c_N = 2\,\frac{0.4+\mu}{0.2+\mu}\ ;\quad \frac{EJ_t}{\ell_t} = \frac{EJ_c}{\ell_c}\ \Big\}\ \mu = 1/3$$

$$= \frac{11}{4} = 2.75$$

– Formule di Newmark:



$$K_i = \frac{1}{\mu_i}\frac{EJ}{\ell}$$

$$P_{cr} \simeq c_N \pi^2 \frac{EJ}{\ell^2}$$ (valori approx., err. < 4%)

$$c_N = \frac{(0.4+\mu_0)(0.4+\mu_e)}{(0.2+\mu_0)(0.2+\mu_e)}$$

- $\mu_i \to 0$ $\quad c_N = 4$
- $\mu_i \to \infty$ $\quad c_N = 1$

(valori esatti in casi particolari)

Verifica di stabilità

(vs. verifica di resistenza: $N = P$; $\sigma = \frac{N}{A} = \frac{P}{A} < \sigma_0$)

$$\sigma = \frac{P}{A} < \frac{P_{cr}^E}{A} = \sigma_{cr}^E \Rightarrow \sigma_{cr}^E = \pi^2 \frac{EJ}{l_0^2}\frac{1}{A}$$

$\frac{J}{A} = r^2$

$r_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{A}}$ oppure ρ raggio giratore d'inerzia

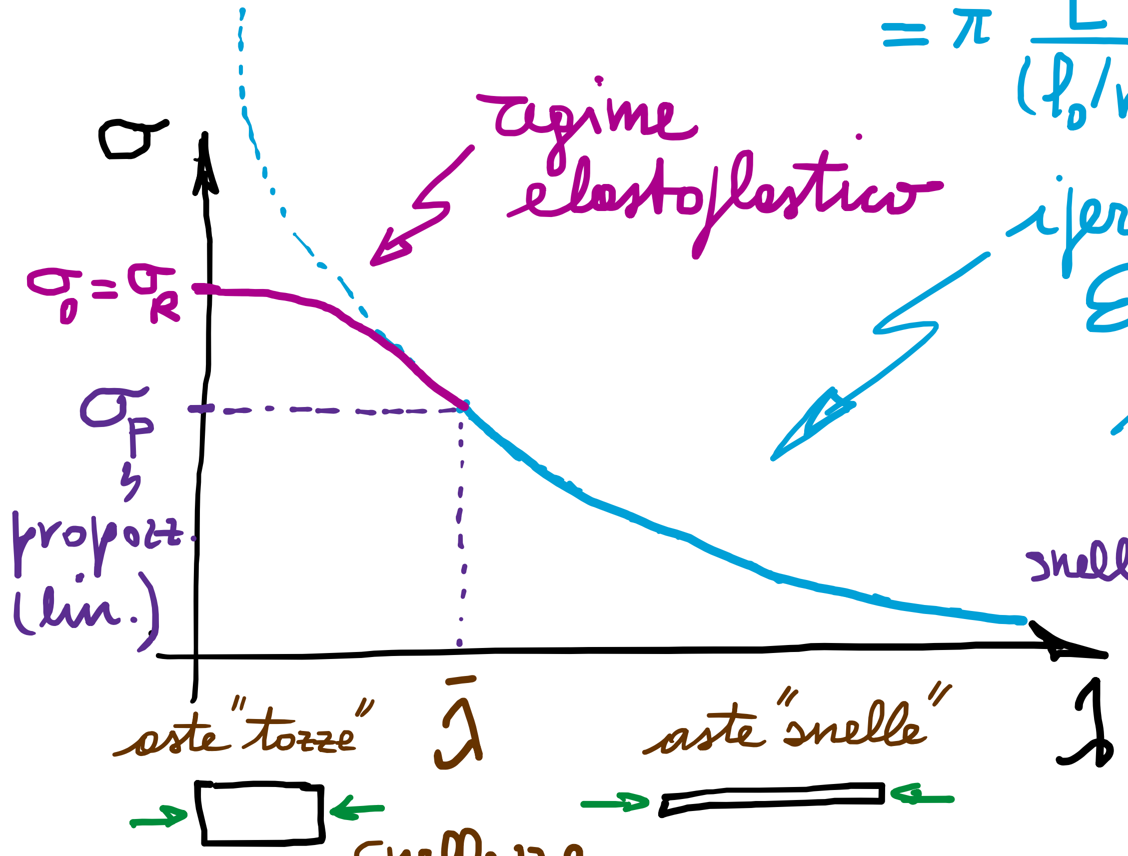
$$= \pi^2 \frac{E}{(l_0/r)^2} = \boxed{\pi^2 \frac{E}{\lambda^2} = \sigma_{cr}^E}$$

$$\boxed{\lambda = \frac{l_0}{r}}$$

l_0: lunghezza e c.e.

r: set. trasv.

snellezza (rapporto di)



iperbole di Eulero $\pi^2 \frac{E}{\lambda^2}$ (elastico lineare)

come verifica di resist.

$$\sigma < \sigma_{cr}^E \frac{\sigma_0}{\sigma_0} \Rightarrow \underbrace{\frac{\sigma_0}{\sigma_{cr}^E}}_{\omega}\sigma < \sigma_0$$

snellezza, materiale

$$\omega = \frac{\lambda^2}{\pi^2}\frac{\sigma_0}{E}$$

Metodo "omega"

fattore di amplificazione del carico P ai fini dell'inst.

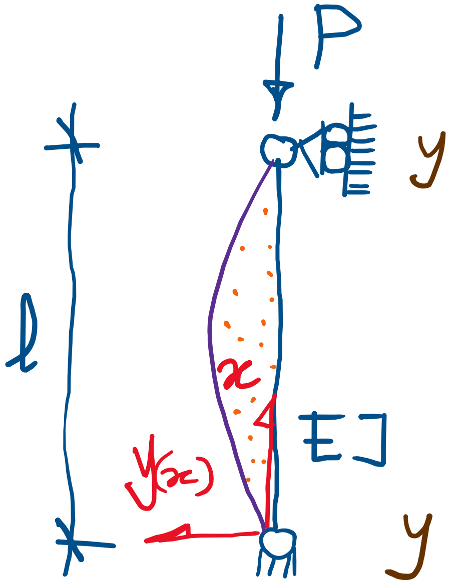
$$\omega\,\sigma < \sigma_0, \quad \sigma = \frac{P}{A}$$

(tabellato per tipologie)

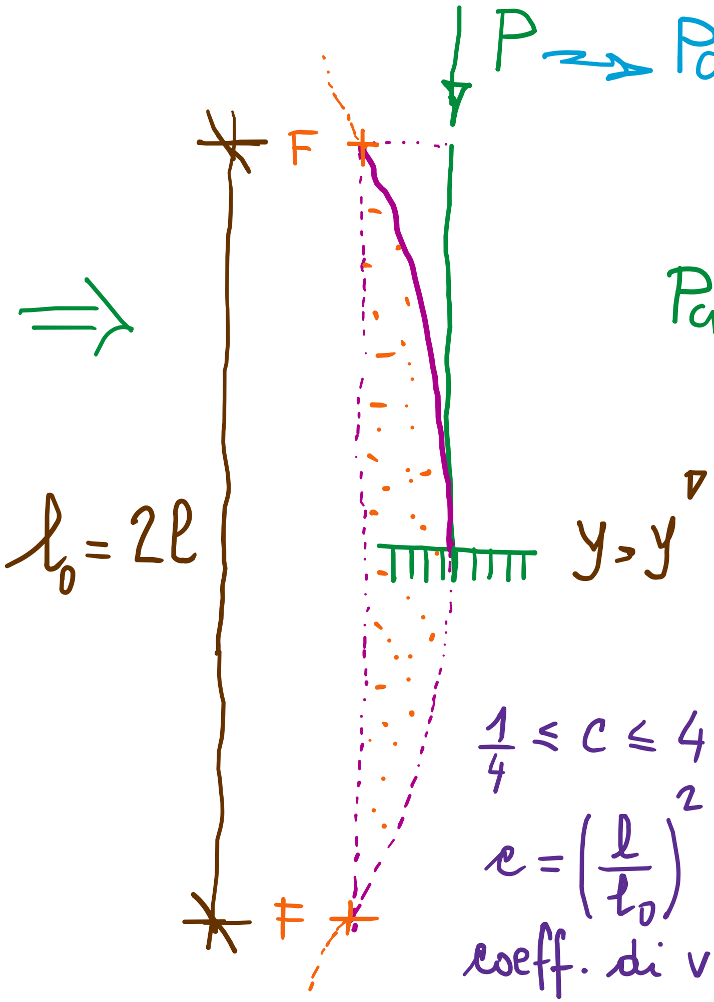
snellezza limite $\sigma_p = \pi^2 \frac{E}{\bar{\lambda}^2} \Rightarrow \bar{\lambda} = \pi\sqrt{\frac{E}{\sigma_p}} \simeq \sqrt{10^4} = 100$ (acciaio)

Concetti fondamentali:

- Generalizzazione dell'analisi dell'asta di Eulero per altre condizioni al contorno (c.c.), cioè di vincolo:



$$P_{cr,E} = \overset{10}{\pi^2} \frac{EJ}{l^2} \implies$$



$$P_{cr,E} = \frac{1}{4} P_{cr,E\,a\,E}$$

$$P_{cr,E} = \pi^2 \frac{EJ}{l_0^2}$$

l_0: lunghezza di libera inflessione

$$\frac{1}{4} \le c \le 4$$

$$c = \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 \qquad = c\,\pi^2 \frac{EJ}{l^2}$$

coeff. di vincolo

- Estensione per telai (a nodi fissi)
- Formula di Newmark (vincoli cedevoli elasticamente $\rightarrow$ molle rotazionali)

} Asta di Eulero generalizzata

- Verifica di stabilità (vs. verifica di resistenza)

$$\sigma = \frac{P}{A} \leq \sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} \qquad\qquad \sigma = \frac{P}{A} \leq \sigma_0$$

$$\sigma \leq \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\,\sigma_0$$

$$\underbrace{\frac{\sigma_0}{\sigma_{cr}}}_{\omega}\,\sigma \leq \sigma_0$$

(Metodo "omega") $\rightarrow$ $\omega \frac{P}{A} \leq \sigma_0$

ω coeff. amplificativo di P (ai fini dell'instabilità)

SOMMARIO (Lez. 21)

- Asta incastrata e generalizzazione ad altre condizioni di vincolo.
- Coefficiente di vincolo, lunghezza di libera inflessione.
- Telai a nodi fissi: effetto flessionale delle travi condensato in molle rotazionali (elementi a deform. elastica concentrata).
- Formula di Newmark per travi appoggiate (errori contenuti).
- Verifica di stabilità (può essere interpretata come verifica di resistenza con carico amplificato di fattore ω → "Metodo omega").
- Fine Instabilità delle Strutture – (2ª parte).

Next step: Anelasticità (plasticità) delle Strutture (3ª parte).
Comportamento elastoplastico del materiale.