Università degli studi di Bergamo

Scuola di Ingegneria (Dolmine)

CCS Ingegneria Edile

L-23 Ingegneria delle Tecnologie per l'Edilizia

Scienza delle Costruzioni

(ICAR/08 - SdC; 9 CFU)

A.A. 2021/2022

prof. Egidio RIZZI

egidio.rizzi@unibg.it

LEZIONE 09

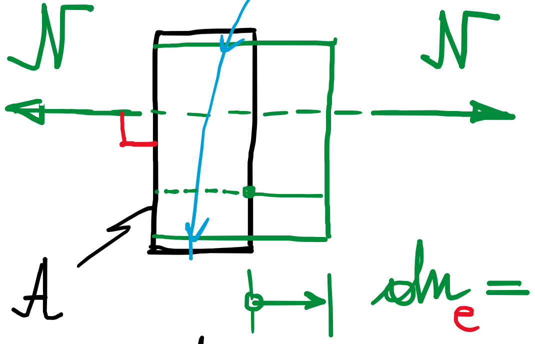
Analisi dei sistemi di travi deformabili: comp. di spostamento di strutt., risoluz. strutt. iperstatiche

Deformazioni elastiche elementari del concio di trave (vedi casi di de Saint Venant):

$\varepsilon_e = \dfrac{\sigma}{E}$ legge costitutiva (elastica lineare) costanti

$\sigma = \dfrac{N}{A}$

(contraz. trasv., ν)



$dl_e = \varepsilon_e \, dx$

$= \dfrac{N \, dx}{\boxed{E \cdot A}}$

dx

[F] rigidezza assiale

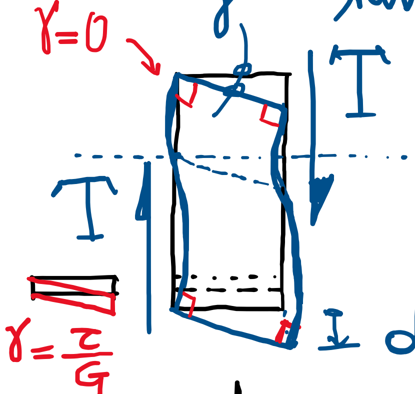
$EA \to \infty$ inesten.

E: modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young $\dfrac{[F]}{[L]^2}$

ingobbamento fuori piano (legato alla distribuzione non uniforme delle deform. tangenziali)

$\bar{\gamma}$

scorrimento angolare medio



$\gamma = \dfrac{\tau}{G}$

$\tau = \dfrac{T}{A}$

$dt_e = \bar{\gamma}_e \, dx$

$= \mu \dfrac{T \, dx}{\boxed{G \cdot A}}$

dx

[F] rigidezza tagliante

$GA \to \infty$ indeform. a taglio

$\dfrac{E}{2(1+\nu)} = G$: modulo di elasticità tangenziale o modulo di taglio

isotropo

$ds = \rho \, d\varphi$

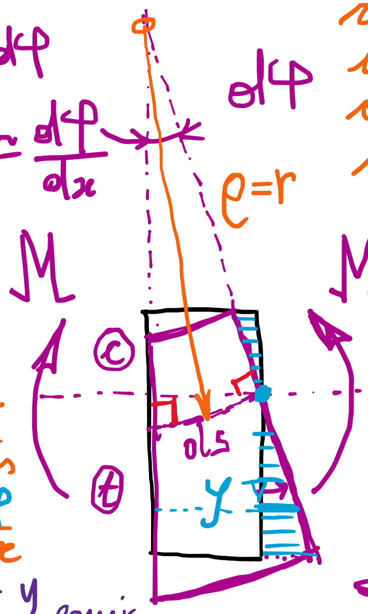
$\chi = \dfrac{1}{\rho} = \dfrac{d\varphi}{ds} \simeq \dfrac{d\varphi}{dx}$

curvatura

raggio di curvatura della linea d'asse inflessa

$d\varphi$

$\rho = r$



rotazione relativa con conservazione della sezione piana

$\sigma = E\varepsilon$

$\varepsilon \cancel{dx} = y \dfrac{d\varphi}{dx}$ (χ)

$M = \int_A \sigma \, dA \, y$ equiv. statica

$= E\chi \underbrace{\int_A y^2 dA}_{J>0}$

$d\varphi_e = \chi_e \, dx$

$= \dfrac{M \cdot dx}{\boxed{E \cdot J}}$

dx

$[F][L]^2$ rigidezza flessionale

$EJ \to \infty$ indeform. flession.

E: idem

$\boxed{\chi_e = \dfrac{M}{EJ}}$

A: area della sezione trasversale $[L]^2$

A: idem

$\mu \geq 1$: fattore di taglio

propr. geom. sez. trasv.

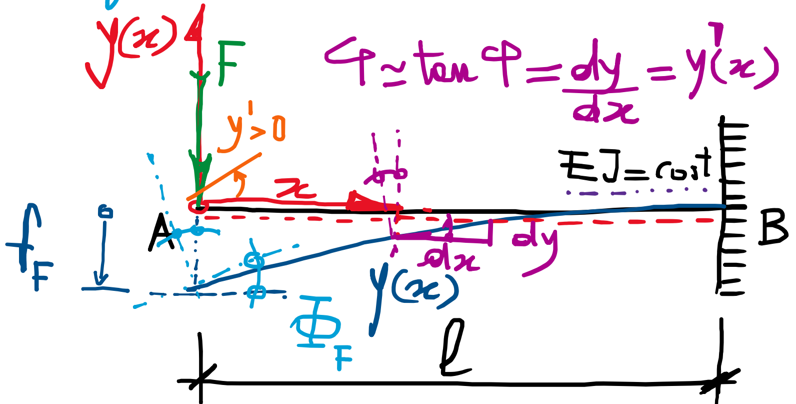
J: momento d'inerzia della sezione trasversale $[L]^4$

Metodo della Linea Elastica (deformazione di strutture inflesse con effetti flessionali predominanti)

$[\, d_n \to 0 \; ; \; d_t \to 0 \; ; \; EA \to \infty \; ; \; GA \to \infty \,]$

curvatura $\chi_e = \dfrac{M}{\boxed{EJ}}$ $\iff$ $M = \boxed{EJ}\,\chi_e$ legge "costitutiva" della trave (Eulero-Bernoulli-Navier)

$0 <$ rigidezza flessionale EJ



$\varphi \simeq \tan\varphi = \dfrac{dy}{dx} = y'(x)$

Curvatura di linea piana di eq.ne $y = y(x)$

$$\chi(x) = \frac{y''(x)}{[1 + y'(x)^2]^{\frac{3}{2}}} \simeq y''(x)$$

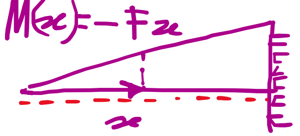
$|y'(x)| \ll 1$ piccole deformazioni (gradienti di spostamento)

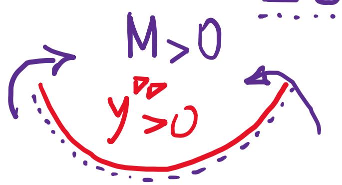
$\varphi(x) = y'(x) \Rightarrow \varphi'(x) = y''(x) = \chi(x)$

$y(x)$: spost. trasversale (Linea Elastica)

Equazione differenziale della LE (del 2° ordine)

- $EJ\, y''(x) = +M(x) \overset{\text{equil.}}{=} -F x$





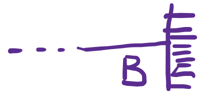
$\int dx$

- $EJ\, y'(x) = -F\dfrac{x^2}{2} + A_1$

$\int dx$

- $EJ\, y(x) = -F\dfrac{x^3}{6} + \underline{A_1 x + A_2}$

- Condizioni al contorno (c.c.)



$v_B = 0$, $\varphi_B = 0$ $\Rightarrow$ $\begin{cases} y(\ell) = 0 \\ y'(\ell) = 0 \end{cases}$

sist. globale — sist. locale

A_1, A_2: costanti di integrazione

componente di moto rigido rototraslatorio legato alla scelta del sistema di riferimento

Imposizione delle c.c.

$$EJ\,y'(\ell) = 0 \Rightarrow -\frac{F\ell^2}{2} + A_1 = 0 \Rightarrow \boxed{A_1 = \frac{F\ell^2}{2}}$$

$$EJ\,y(\ell) = 0 \Rightarrow -\frac{F\ell^3}{6} + A_1\ell + A_2 = 0 \Rightarrow A_2 = \frac{F\ell^3}{6} - A_1\ell = \frac{F\ell^3}{6} - \frac{3}{3}\frac{F\ell^2}{2}\ell = \boxed{-\frac{1}{3}F\ell^3 = A_2}$$

Equazione finale della LE:

$$y(x) = \frac{1}{EJ}\left[-\frac{Fx^3}{6} + \frac{F\ell^2}{2}x - \frac{F\ell^3}{3}\right]$$

$$y'(x) = \frac{1}{EJ}\left[-\frac{Fx^2}{2} + \frac{F\ell^2}{2}\right]$$

$$y''(x) = \frac{1}{EJ}\left[-Fx\right] = \frac{-M(x)}{EJ}$$

$$y(0) = \frac{A_2}{EJ} = -f_F \;\rightarrow\; f_F = \frac{1}{3}\frac{F\ell^3}{EJ} \quad [L]$$

$$y'(0) = \frac{A_1}{EJ} = \Phi_F \;\rightarrow\; \Phi_F = \frac{1}{2}\frac{F\ell^2}{EJ} \quad [1]$$

Significato fisico delle costanti di integrazione

coefficienti di influenza

$$(F = 1)\quad f_1 = \frac{1}{3}\frac{\ell^3}{EJ} = \frac{f_F}{F}$$

N.B.:

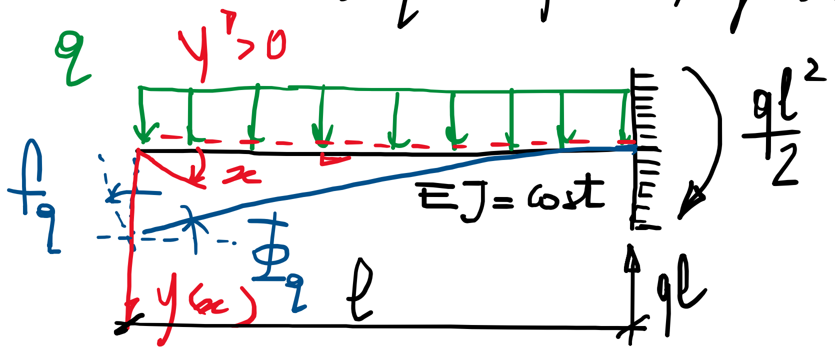
- Il gruppo dimensionale $\frac{F\ell^3}{EJ}$ rappresenta spostamenti elastici flessionali
- Il gruppo dimensionale $\frac{F\ell^2}{EJ}$ rappresenta rotazioni elastiche flessionali

Infatti:

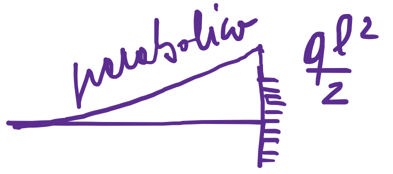
$$\left[\frac{F\ell^3}{EJ}\right] = \frac{\cancel{[F]}\,[L]^{\cancel{3}}}{\frac{\cancel{[F]}}{\cancel{[L]^2}}\,\cancel{[L]^4}^{\,2}} = [L] \quad \text{lunghezze}$$

$$\left[\frac{F\ell^2}{EJ}\right] = \ldots\ldots\ldots = \frac{[L]}{[L]} = [1] \quad \text{numero puro}$$

Caso con q uniform. ripartito



$$\begin{cases} EJ\, y''(x) = -M(x) = \frac{qx^2}{2} \\ EJ\, y'(x) = \frac{qx^3}{6} + A_1 \\ EJ\, y(x) = \frac{qx^4}{24} + A_1 x + A_2 = \frac{qx^4}{24} - \frac{ql^3}{6}x + \frac{ql^4}{8} \end{cases}$$

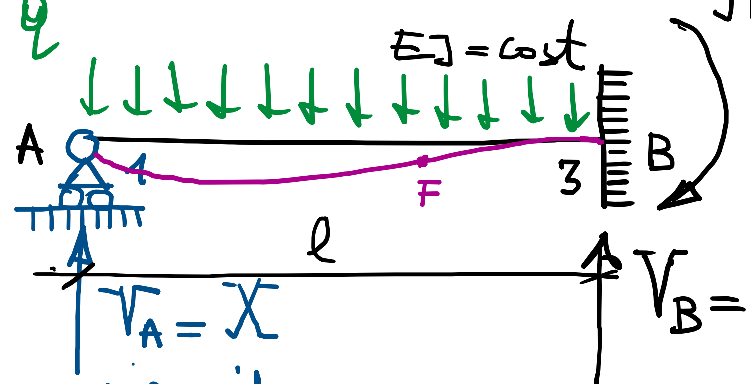


c.c. $EJ\, y'(l) = 0 \Rightarrow A_1 = -\frac{ql^3}{6} \Rightarrow \Phi_q = \frac{1}{6}\frac{ql^3}{EJ}$ [1]

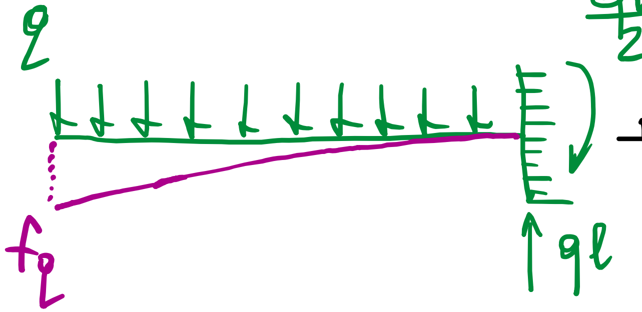
$EJ\, y(l) = 0 \Rightarrow A_2 = -\frac{ql^4}{24} - A_1 x = -\frac{ql^4}{24} + \frac{4ql^3}{4 \cdot 6} l = \frac{ql^4}{8} \Rightarrow f_q = \frac{1}{8}\frac{ql^4}{EJ}$ [L]

Struttura iperstatica (staticamente indeterminata) – Metodo delle forze

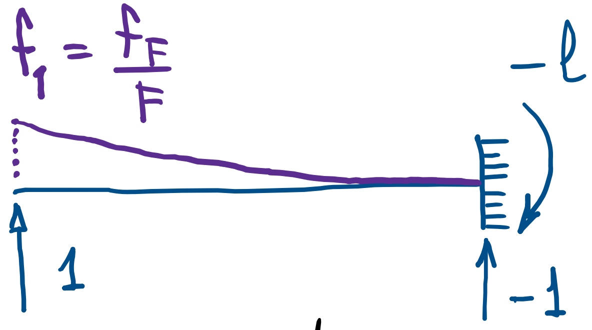
$M_B = \frac{ql^2}{2} - Xl$



=



$+ X$



$V_B = ql - X$

$V_A = X$

incognita iperstatica (in corrisp. di gdv ritenuto iperstatico)

$RV = RV(q, X)$

$v_A = -f_q + X f_1 = 0 \Rightarrow X = \frac{f_q}{f_1} = \frac{\frac{1}{8}\frac{ql^4}{\cancel{EJ}}}{\frac{1}{3}\frac{1\,l^3}{\cancel{EJ}}} = \frac{3}{8}ql$

condizione di congruenza

rispetto del carrello in A