COSTRUZIONI in ACCIAIO

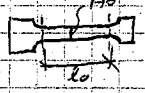
IL MATERIALE di BASE

Gli acciai sono leghe Fe-C, quelli comunemente impiegati nell'ingegneria civile hanno un tenore di carbonio compreso tra 0,10% e 0,30%
Gli acciai per gli impieghi più comuni hanno un tenore di carbonio $C < 0,9\%$
Con $C > 1,7\%$ si hanno le ghise, mentre se $C < 0,03\%$ si ha quello che viene comunemente chiamato "Ferro dolce"
All'aumentare del tenore di carbonio, aumentano durezza e resistenza a trazione, ma diminuiscono le caratteristiche di deformabilità del materiale e la sua duttilità, il materiale tende quindi ad avere un comportamento fragile a rottura.
Il tenore di carbonio influisce anche sulla saldabilità dell'acciaio, agendo come elemento Temprante e favorendo l'infragilimento nelle zone termicamente alterate e la formazione di cricche.
Negli acciai da carpenteria sono presenti in lega anche altri materiali per elevare le caratteristiche meccaniche senza alzare troppo il tenore di carbonio (Silicio, Molibdeno, Manganese, Vanadio), altri elementi sono aggiunti per migliorare la resistenza alla corrosione (Rame, Nichel) in questi casi si parla di acciai legati.
Altri elementi sono presenti in lega come impurità (Zolfo, Fosforo) ed il loro tenore deve essere tenuto al di sotto di quello stabilito dalle specifiche, per garantire soprattutto la saldabilità.

Il DM del 14/1/2008 stabilisce che gli acciai da carpenteria laminati a caldo devono appartenere ad uno dei gradi S235 al S460 secondo le UNI 10025-95

Classe	f_{yk} [MPa]	f_{tk} [MPa]	ε_t %
S 235 (Fe 360)	235	360	26
S 275 (Fe 430)	275	430	22
S 355 (Fe 510)	355	510	22
S 460	460	550	

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} 100 = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100$$



La saldabilità di un acciaio è indicata con le classi A, B, C, D in ordine crescente e dipende dalla composizione chimica e dai trattamenti termici subiti dall'acciaio.
Un utile riferimento è il carbonio equivalente $C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{N + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$
Per $C_e < 0,41$ non si hanno in genere problemi di saldabilità

Per $C_e > 0,45$ si devono adottare tecniche opportune, elettrodi a basso H e preriscaldamento.

Gli acciai possono essere sottoposti a Trattamenti termici per migliorare le caratteristiche meccaniche, come ad esempio il Trattamento di tempra e rinvenimento che può portare l'acciaio ad una $f_t = 800$ MPa e $f_y = 650$ MPa.
Per la realizzazione di parti da fusione si devono impiegare leghe per getti come: Fe G 400, Fe G 450, Fe G 520.

Metodi di calcolo

Le costruzioni metalliche, realizzate con i materiali previsti dalle normative devono essere analizzate, applicando su di loro le azioni opportunamente combinate, così come previsto dalle normative.
L'analisi deve essere fatta usando i metodi della meccanica delle strutture di comprovata validità.

Normative DM 14/1/2008

Sono previsti 3 metodi di analisi globale

- Elastica (E)
  - si ipotizza un legame σ-ε indefinitamente elastico-lineare
  - si applica ad elementi di qualsiasi classe

- Plastica (P)
  - si trascura completamente le deformazioni elastiche e
  - si concentrano le deformazioni plastiche nelle cerniere plastiche.

  Il metodo è applicabile alle sole aste compatte, Classe 1

- Elasto-Plastica (E-P)
  - si eseguono i calcoli introducendo i legami momento-curvatura definiti usando legami σ-ε almeno bilineari.
  - è applicabile a strutture di classe 1, 2, 3, 4.

Le verifiche di resistenza di sezioni compatte, classi 1 e 2, possono essere fatte con i metodi E, P, E-P; per le sezioni snelle, classe 3 e 4, possono essere fatte con i metodi E e E-P.

METODI DI VERIFICA AGLI S.L.U.

La capacità resistente della sezione deve essere valutata rispetto alle varie caratteristiche della sollecitazione, agenti anche simultaneamente sulla sezione in esame.
Si possono applicare: il metodo elastico E, il metodo plastico P e il metodo Elasto-Plastico E-P.

RESISTENZA DI CALCOLO

Con la generica grandezza R si può indicare o la tensione o la caratteristica della sollecitazione. La resistenza di calcolo R_d si ottiene dividendo la grandezza caratteristica R_k per un opportuno coefficiente di sicurezza γ_M

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad \text{dove } \gamma_M = \begin{cases} \gamma_{M0} = 1{,}05 & \text{(Resistenza di sezioni di tipo 1,2,3,4)} \\ \gamma_{M1} = 1{,}05 & \text{(instabilità membrature)} \\ \gamma_{M2} = 1{,}25 & \text{(Resistenza sezioni tese indebolite)} \end{cases}$$

RESISTENZA MEMBRATURE

Verifiche in campo elastico: $\sigma_{z_{Ed}}^2 + \sigma_{y_{Ed}}^2 - \sigma_{z_{Ed}} \cdot \sigma_{y_{Ed}} + 3\tau_{Ed}^2 \le \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}$

Verifica ammessa per tutte le classi di sezioni
per la sezione 4 deve essere accompagnata da verifica di stabilità locale

Verifiche in campo plastico:

TRAZIONE: $N_{Ed} \le N_{t,Rd}$ $\quad N_{t,Rd} = \min\left(\frac{N_{pl,Rd}}{N_{u,Rd}}\right)$ $\quad N_{pl,Rd} = A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}$ $\quad N_{u,Rd} = A_{net} \cdot 0{,}9 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M2}}$

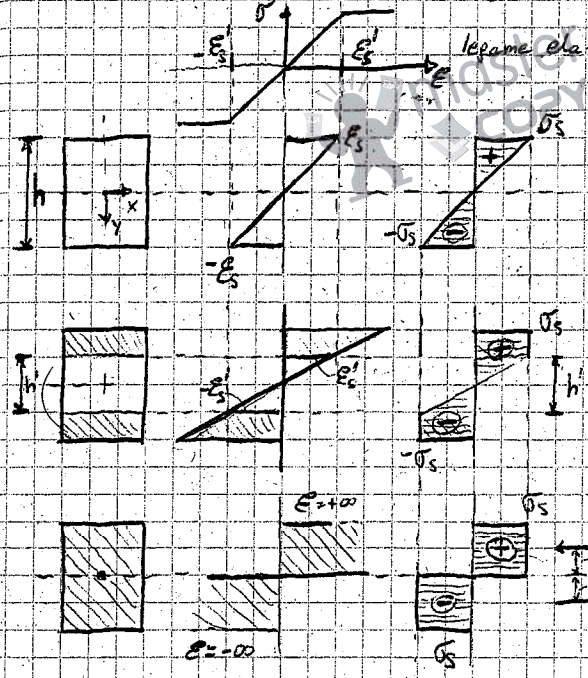
COMPRESSIONE: $N_{Ed} \le N_{c,Rd}$ $\quad N_{c,Rd} = \begin{cases} A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} & \text{classi 1,2,3} \\ A_{eff} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} & \text{classe 4} \end{cases}$

Flessione monoassiale retta. $M_{ed} \leq M_{c,Rd}$

$$M_{c,Rd} = \begin{cases} M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} & \text{classi 1,2} \\ M_{el,Rd} = W_{el,min} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} & \text{classe 3} \\ = W_{eff,min} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} & \text{classe 4} \end{cases}$$

RICHIAMI ANALISI ELASTO-PLASTICA sez. rettangolare Trave inflessa

Ipotesi: - legame costitutivo elastico-perfettamente plastico sia a trazione che a compressione
- Mantenimento delle sezioni piane nella flessione anche in campo plastico



In fase elastica la tensione varia linearmente lungo l'asse di flessione, legge di Navier

$$\sigma_z = \frac{M_x}{J_x} \cdot y \;;\; M_s' = \sigma_s \cdot W_e = \sigma_s \cdot \frac{bh^2}{6}$$

Aumentando la M cioè $M > M_s'$ la deformazione diventa $\varepsilon > \varepsilon_s$
la distribuzione delle tensioni sulla sezione presenta due zone rettangolari corrispondenti alle zone plasticizzate

Aumentando ancora M si arriva alla condizione (ideale, secondo le ipotesi fatte) in cui tutta la sezione è plasticizzata con $\varepsilon > \varepsilon_s$ sia sopra che sotto l'asse neutro.
Facendo l'equilibrio alla rotazione attorno al baricentro della sezione:

$$M_s' = \sigma_s \cdot \frac{h}{2} \cdot b \cdot \frac{h}{4} + \sigma_s \cdot \frac{h}{2} \cdot b \cdot \frac{h}{4} \Rightarrow M_s'' = \sigma_s \cdot \frac{bh^2}{4}$$

$$\Rightarrow M_s'' = \frac{3}{2} M_s'$$

M_s'' è il massimo momento con cui la sezione può reagire, quindi assume il significato di momento limite ultimo, se si applicasse un momento $M > M_s''$ allora la sezione non sarebbe in grado di reagire e ruoterebbe indefinitamente.

- legge che lega il momento alla curvatura, per sezione rettangolare:

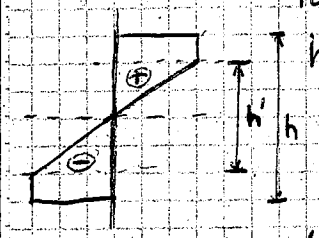
È noto che $\varepsilon = \frac{y}{R}$ nella deformazione flessionale $\Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{\varepsilon}{y}$

(Navier) $\sigma = \frac{M}{J} y$ $\quad \sigma = \varepsilon \cdot E \Rightarrow \varepsilon \cdot E = \frac{M}{J} y \Rightarrow \frac{M}{EJ} = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{1}{R}$

La curvatura per $M = M_s$ è: $\left(\frac{1}{r}\right)_s = \frac{M_s'}{EJ_x} = \frac{M_s'}{E} \frac{12}{bh^3} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_s \cdot \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{12}{bh^3} = \frac{\sigma_s}{E} \cdot \frac{2}{h}$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_s/E}{h/2} \overset{(\varepsilon)}{=} \left(\frac{1}{r}\right)_s \overset{(Y)}{=} \frac{\varepsilon_s'}{h/2}$$

quando $M > M_s'$, la distribuzione delle tensioni sulla sezione presenta due zone rettangolari corrispondenti alla zona plasticizzata.



h' è la distanza tra le fibre della sezione soggette a deformazione ε_s

h è l'altezza della sezione

equilibrio alla rotazione attorno al baricentro della sezione

$$\underbrace{\sigma_s \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{h'}{2}\right) \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} - \left(\frac{h}{2} - \frac{h'}{2}\right)\frac{1}{2}\right) \cdot 2}_{\text{rettangolare}} + \underbrace{\sigma_s \frac{h'}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot b \cdot \frac{h'}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 2}_{\text{triangolare}} = M$$

$$\sigma_s \cdot b \cdot \frac{1}{2}(h - h') \cdot \left[\frac{h}{2} - \frac{h}{4} - \frac{h'}{4}\right] \cdot 2 + \sigma_s \cdot b \cdot \frac{h'}{2} \cdot \frac{h' \cdot 2}{3} = M$$

$$\sigma_s b \cdot (h - h') \cdot \frac{(h + h')}{4} + \sigma_s b \cdot \frac{h'^2}{6} = M \Rightarrow \sigma_s b \cdot \left[\frac{h'^2}{6} + \frac{h^2}{4} - \frac{h'^2}{4}\right] = M$$

$$\frac{M}{\sigma_s \cdot b} = \frac{h^2}{4} - \frac{h'^2}{12} \qquad h'^2 = 3h^2 - 12\frac{M}{\sigma_s \cdot b} \Rightarrow h'^2 = h^2\left(3 - \frac{12}{bh^2} \cdot \frac{M}{\sigma_s}\right) \qquad \left(\frac{bh^2}{6} = W_e\right)$$

$$h' = h\sqrt{3 - \frac{2M}{\sigma_s \cdot W_e}}$$

Siccome $\sigma_s \cdot W_e = M_s' \Rightarrow h' = h\sqrt{3 - 2\frac{M}{M_s'}}$

Per semplicità posso indicare $h' = h \cdot \beta(M)$

Si è visto che $\left(\frac{1}{r}\right)_s = \frac{\varepsilon_s'}{y} = \frac{\sigma_s/E}{h/2}$ se $M > M_s' \Rightarrow \left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \frac{\sigma_s/E}{h'/2}$ (Fase elasto plastica)

$$\sigma_s/E = \left(\frac{1}{r}\right)_s \cdot \frac{h}{2} \Rightarrow \left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \left(\frac{1}{r}\right)_s \cdot \frac{h/2}{h'/2} \Rightarrow \left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \left(\frac{1}{r}\right)_s \cdot \frac{h}{h'} = \left(\frac{1}{r}\right)_s \frac{h}{h\,\beta(M)}$$

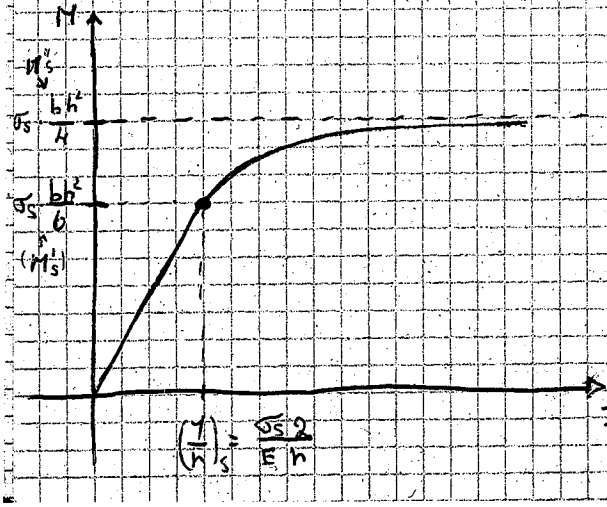
$$\left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \left(\frac{1}{r}\right)_s \cdot \frac{1}{\sqrt{3 - 2\frac{M}{(\sigma_s W_e)}}} \qquad \sigma_s \cdot W_e = M_s' \Rightarrow \left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \left(\frac{1}{r}\right)_s \frac{1}{\sqrt{3 - 2\frac{M}{M_s'}}}$$

Si è visto che $M_s'' = \frac{3}{2} M_s' \Rightarrow \left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \left(\frac{1}{r}\right)_s \cdot \frac{1}{\sqrt{3 - 3\frac{M}{M_s''}}}$

se si passa al limite $\lim_{M \to M_s''} \left(\frac{1}{r}\right)_{Ep} = \infty$ Perché $3 - 3\frac{M}{M_s''} \to 0$

Cioè al tendere di M verso M_s'' la sezione tende a ruotare indefinitamente

Si può tracciare il grafico $M - \frac{1}{r}$ per la sezione rettangolare.



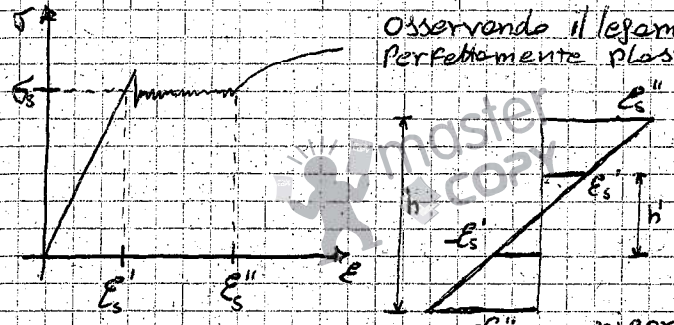
CAPACITÀ ROTAZIONALE

Si definisce capacità rotazionale $C_\sigma = \frac{\theta_r}{\theta_y} - 1$ (quantità adimensionale)

con $\theta_r = \left(\frac{1}{r}\right)''$ curvatura di collasso plastico

$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)'$ curvatura di incipiente plasticità

Si è visto che $\lim_{M \to M_s''} \left(\frac{1}{r}\right) = \infty$ con una ε che tende all'infinito



Osservando il legame costitutivo si vede che la fase perfettamente plastica termina con $\varepsilon = \varepsilon_s''$

Se si assume che al lembo di estremità si raggiunga ε_s'': $\frac{\varepsilon_s'}{h'/2} = \frac{\varepsilon_s''}{h/2}$

$\frac{\varepsilon_s'}{\varepsilon_s''} = \frac{h'}{h}$

ricordando che $h' = h \cdot \sqrt{3 - 2\frac{M}{M_s'}} = h \cdot \beta(M)$

$\frac{h'}{h} = \beta(M)$ Per un normale acciaio da costruzione si può dire che:

$\frac{1}{20} < \beta(M) < \frac{1}{10}$ se si assume $\beta(M) \approx \frac{1}{10} = \frac{h'}{h} = \frac{\varepsilon_s'}{\varepsilon_s''} \Rightarrow \varepsilon_s'' \approx 10\,\varepsilon_s'$

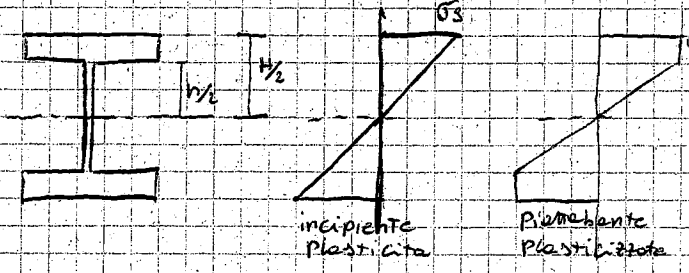
$\beta(M) = \frac{1}{10} = \sqrt{3 - 2\frac{\bar{M}_s}{M_s'}} \Rightarrow \frac{1}{100} = 3 - 2\frac{\bar{M}_s}{M_s'} \Rightarrow \bar{M}_s = \frac{\left(3 - \frac{1}{100}\right)}{2} M_s'$

Siccome $M_s'' = \frac{3}{2} M_s'$ si può dire che $\bar{M}_s \approx M_s''$ con $\bar{M}_s$ calcolato per $\varepsilon = 10\varepsilon_s'$

e che per questo valore la sezione quadrata raggiunge il momento limite ultimo anche se la ε_s' non ha raggiunto l'asse neutro

quindi $\theta_r = \frac{\sigma_s/E}{h/2}$ $\theta_y = \frac{\sigma_s/E}{h'/2}$ $\Rightarrow \frac{\theta_r}{\theta_y} = \frac{h}{h'} = 10 \Rightarrow C_\theta = \frac{\theta_r}{\theta_y} - 1 = 10 - 1 = 9$

caso del profilo a doppio T



$\theta_r = \frac{\sigma_s/E}{h/2} = \frac{\varepsilon_s'}{h/2}$ $\Rightarrow C_\sigma = \frac{\theta_r}{\theta_y} - 1 = \frac{H}{h} - 1$

$\theta_y = \frac{\sigma_s/E}{H/2} = \frac{\varepsilon_s'}{H/2}$