Verifiche di resistenza

Applichiamo il metodo dei coefficienti parziali alle varie verifiche di resistenza:

- verifica a trazione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} \leq 1$$

Con N_{Ed} sforzo di trazione di progetto, $N_{u,Rd}$ resistenza di progetto. Quest'ultima è data da:

$$N_{u,Rd} = \min\{N_{p,Rd}; N_{t,Rd}\}$$

In cui $N_{p,Rd}$ e $N_{t,Rd}$ sono rispettivamente resistenza limite plastica della sezione lorda A (non depurata da forature non eccessive) e resistenza a rottura della sezione netta A_n (depurata dai fori). Sono date da:

$$N_{p,Rd} = \frac{A\, f_{yk}}{\gamma_{M0}} \qquad N_{t,Rd} = \frac{0{,}9\, A_n\, f_{tk}}{\gamma_{M2}}$$

Con f_{yk} e f_{tk} caratteristiche di snervamento e rottura, $\gamma_{M0} = 1{,}05$ e $\gamma_{M2} = 1{,}25$.

Ad esempio con HEA 200A, sforzo di calcolo $N_{Ed} = 1000$ KN, S275, senza forature ($f_{yk} = 275\ N/mm^2$, $f_{tk} = 430\ N/mm^2$):

$$N_{p,Rd} = \frac{5380 \cdot 275}{1{,}05} = 1409\ KN \qquad N_{t,Rd} = \frac{0{,}9 \cdot 5380 \cdot 430}{1{,}25} = 1666\ KN$$

$$\Rightarrow N_{u,Rd} = \min\{1409, 1666\} = 1409\ KN$$

Verifica:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{1000}{1409} = 0{,}71 < 1 \text{ soddisfatta}$$

- verifica a compressione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

Con N_{Ed} sforzo di compressione di progetto, $N_{c,Rd}$ resistenza di progetto a compressione dipendente dalla classe della sezione:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \text{ classi 1,2,3} \qquad N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \text{ classe 4}$$

A area lorda, A_{eff} area efficace, cioè depurata dalle zone soggette a instabilità.

Con HEA 200A, $N_{Ed} = 1000$ KN, S275:

classe 1 $\quad N_{c,Rd} = \frac{A\, f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{5380 \cdot 275}{1{,}05} = 1409\ KN$

Verifica:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{1000}{1409} = 0{,}71 < 1 \text{ soddisfatta}$$

- verifica a flessione retta:

$$\frac{M_{x,Ed}}{M_{xc,Rd}} \leq 1$$

$M_{x,Ed}$ momento flettente dovuto alle azioni di progetto e $M_{xc,Rd}$ resistenza di progetto a flessione retta della sezione dipendente dalla classe di quest'ultima:

$$M_{xc,Rd}=M_{xp,Rd}=\frac{Z_x \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \qquad M_{xc,Rd}=M_{xy,Rd}=\frac{W_x \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \qquad M_{xc,Rd}=\frac{W_{x,eff}\, f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

classe 1 e 2 — classe 3 — classe 4

Z_x modulo di resistenza plastica della sezione, W_x modulo di resistenza elastica e $W_{x,eff}$ modulo di resistenza elastica della sezione depurata dalle parti soggette a instabilità locale.

Con IPE 300, $M_{x,Ed}=150$ kN/m, S355 ($Z_x=2S_x=628\ cm^3$):

classe 1 $\qquad M_{xc,Rd}=M_{xp,Rd}=\frac{628000 \cdot 355}{1{,}05}=212{,}3$ kN/m

Verifica:

$$\frac{M_{x,Ed}}{M_{xc,Rd}}=\frac{150}{212{,}3}=0{,}71<1 \text{ soddisfatta}$$

- verifica a taglio:

$$\frac{T_{y,Ed}}{T_{yc,Rd}} \leq 1$$

$T_{y,Ed}$ dovuto alle azioni di progetto, $T_{yc,Rd}$ resistenza di progetto. Per qualsiasi classe:

$$T_{yc,Rd}=\frac{A_{vy} \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

A_{vy} è l'area resistente a taglio.

Con IPE300, $T_{y,Ed}=100$ kN, S355:

$$A_{vy}=A-2b \cdot e+(a+2r)\,e=2567\ mm^2$$

$$\Rightarrow T_{yc,Rd}=\frac{2567 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05}=501{,}1 \text{ kN}$$

Verifica:

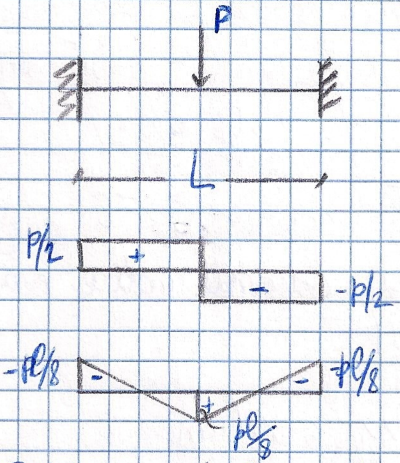
$$\frac{T_{y,Ed}}{T_{yc,Rd}}=\frac{100}{501{,}1}=0{,}20<1 \text{ soddisfatta}$$

- verifica a flessione e taglio: se vale la disuguaglianza $T_{y,Ed} \leq 0{,}5 \cdot T_{yc,Rd}$ non bisogna fare la verifica combinata a flessione-taglio. Basta la verifica sul momento. Altrimenti bisogna ridurre $M_{xc,Rd}$. Per sezioni a doppio T doppiamente simmetriche, di classi 1 e 2, soggette a flessione nel piano dell'anima si riduce la resistenza nel modo seguente:

$$M_{x,T,Rd}=\frac{\left(Z_x-\frac{\rho A_{vt}^2}{4a}\right) f_{yk}}{\gamma_{M0}} \leq M_{xc,Rd} \quad \text{con } \rho=\left(\frac{2T_{y,Ed}}{T_{yc,Rd}}-1\right)^2$$

Con a spessore dell'anima.

Ad esempio prendiamo una IPE 300 di lunghezza $L = 3$ m, incastrata alle estremità, in acciaio S355, soggetta al carico $P_d = 550$ KN applicato in mezzeria:



Le sezioni più sollecitate sono quelle di incastro e di mezzeria, soggette sia allo stesso taglio che alla stessa flessione:

$$M_{x,Ed} = \frac{P_d \cdot L}{8} = 206{,}25 \text{ KN m}$$

$$T_{y,Ed} = \frac{P_d}{2} = 275 \text{ KN}$$

La sezione è inoltre di classe 1.

Dobbiamo fare tre verifiche:

·) a flessione:

$$M_{xc,Rd} = \frac{628000 \cdot 355}{1{,}05} = 212{,}3 \text{ KN m} \Rightarrow \frac{M_{x,Ed}}{M_{xc,Rd}} = \frac{206{,}25}{212{,}3} = 0{,}97 < 1 \text{ soddisfatta}$$

··) a taglio:

$$A_{ty} = 2567 \text{ mm}^2 \Rightarrow T_{yc,Rd} = \frac{2567 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1{,}05} = 501{,}1 \text{ KN}$$

$$\Rightarrow \frac{T_{y,Ed}}{T_{yc,Rd}} = \frac{275}{501{,}1} = 0{,}55 < 1 \text{ soddisfatta}$$

∴) a flessione e taglio (necessaria poiché $T_{y,Ed} = 275 \text{ KN} > 0{,}5 \cdot 501{,}1 \text{ KN} = 250{,}55 \text{ KN} = 0{,}5 \cdot T_{yc,Rd}$):

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot 275}{501{,}1} - 1\right)^2 = 0{,}0095$$

$$\Rightarrow M_{x,T,Rd} = \frac{\left(628000 - \frac{0{,}0095 \cdot 2567^2}{4 \cdot 7{,}1}\right) \cdot 355}{1{,}05} = 211{,}6 \text{ KN m}$$

$$\Rightarrow M_{x,Ed} = 206{,}25 \text{ KN m} < 211{,}6 \text{ KN m} = M_{x,T,Rd} \text{ non soddisfatta}$$

- verifica a presso- o tenso-flessione retta: per sezioni a doppio T, doppiamente simmetriche, di classi 1 o 2, soggette a presso o tenso-flessione retta nel piano dell'anima:

$$\frac{M_{x,Ed}}{M_{N,x,Rd}} \leq 1$$

$M_{x,Ed}$ dovuto alle azioni di progetto, $M_{N,x,Rd}$ resistenza di progetto ridotta nel modo seguente:

$$M_{N,x,Rd} = M_{xp,Rd} \cdot \frac{1 - n}{1 - 0{,}5a} \leq M_{xp,Rd}$$

Sempre nelle stesse condizioni precedenti, ma nel piano delle ali:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \leq 1$$

$M_{y,Ed}$ dovuto alle azioni di progetto, $M_{N,y,Rd}$ resistenza di progetto ridotta nel modo seguente:

$$M_{N,y,Rd} = M_{yp,Rd} \text{ per } m \le a \qquad M_{N,y,Rd} = M_{yp,Rd}\left[1-\left(\frac{m-a}{1-a}\right)^2\right] \text{ per } m > a$$

Nelle relazioni viste $M_{xp,Rd}$ e $M_{yp,Rd}$ sono i momenti resistenti plastici a flessione nel piano dell'anima e delle ali rispettivamente. m e a sono parametri adimensionali così definiti:

$$m = \frac{N_{Ed}}{N_{p,Rd}} \qquad a = \frac{A-2b\cdot e}{A} \le 0{,}5$$

Consideriamo un profilo HEA200A di acciaio S 275, soggetto a $N_{Ed} = 500$ kN e a un momento $M_{x,Ed} = 100$ kN·m:

classe 1 $\quad N_{p,Rd} = \frac{5380 \cdot 275}{1{,}05} = 1409$ kN

$$M_{xp,Rd} = \frac{2 \cdot 215000 \cdot 275}{1{,}05} = 112{,}6 \text{ kN·m}$$

$$m = \frac{500}{1409} = 0{,}355 \qquad a = \frac{5380-2\cdot200\cdot10}{5380} = 0{,}257$$

$$\Rightarrow M_{N,x,Rd} = 112{,}6 \cdot \frac{1-0{,}355}{1-0{,}5\cdot0{,}256} = 83{,}3 \text{ kN·m}$$

$$\Rightarrow \frac{M_{x,Ed}}{M_{N,x,Rd}} = \frac{100}{83{,}3} = 1{,}2 > 1 \quad \text{non soddisfatta}$$

Sempre con lo stesso profilo sostituiamo a $M_{x,Ed}$ il momento $M_{y,Ed} = 50$ kNm, mantenendo $N_{Ed} = 500$ kN:

$$Z_y = 2S_y \simeq 2\cdot2\cdot\frac{b}{2}\cdot e\cdot\frac{b}{4} = \frac{eb^2}{2} = 200000 \text{ mm}^3$$

$$\Rightarrow M_{yp,Rd} = \frac{200000\cdot275}{1{,}05} = 52{,}4 \text{ kN m}$$

$$m = 0{,}355 \qquad a = 0{,}257 \quad \Rightarrow m > a$$

$$\Rightarrow M_{N,y,Rd} = 52{,}4 \cdot \left[1-\left(\frac{0{,}355-0{,}257}{1-0{,}257}\right)^2\right] = 51{,}5 \text{ kN·m}$$

$$\Rightarrow \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{50}{51{,}5} = 0{,}97 \quad \text{soddisfatta}$$

- verifica a presso- o tenso-flessione biassiale: dato $m = \frac{N_{Ed}}{N_{p,Rd}}$, per sezioni a doppio T, di classe 1 o 2, soggette a presso- o tenso-flessione biassiale:

$$\left(\frac{M_{x,Ed}}{M_{N,x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right)^{5m} \le 1 \text{ se } m \ge 0{,}2 \qquad \left(\frac{M_{x,Ed}}{M_{N,x,Rd}}\right) + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}}\right) \le 1 \text{ se } m < 0{,}2$$

La seconda formula vale anche per sezioni generiche. Con HEA 200A, $N_{Ed} = 400$ kN e $M_{x,Ed} = M_{y,Ed} = 50$ kNm S 275:

$$N_{p,Rd} = \frac{5380\cdot275}{1{,}05} = 1409 \text{ kN} \qquad m = \frac{400}{1409} = 0{,}284 \qquad a = \frac{5380-2\cdot200\cdot10}{5380} = 0{,}257$$

$$\Rightarrow m > a$$

$$\Rightarrow M_{N,x,Rd} = 112{,}6\cdot\frac{1-0{,}284}{1-0{,}5\cdot0{,}257} = 92{,}5 \text{ kN m} \qquad M_{N,y,Rd} = 52{,}4\cdot\left[1-\left(\frac{0{,}284-0{,}256}{1-0{,}256}\right)^2\right] = 52{,}3 \text{ kN·m}$$

Verifica ($m > 0{,}2$):

$$\left(\frac{50}{92{,}5}\right)^2 + \left(\frac{50}{52{,}3}\right)^{5\cdot0{,}284} = 1{,}23 > 1 \quad \text{non soddisfatta}$$

Analisi elastica

Possiamo usare il metodo dei coefficienti parziali anche in campo elastico. Si ha:

$$\sigma_{id,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3\tau_{yz,Ed}^2} \leq f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}, \quad \gamma_{M0} = 1{,}05$$

Nel caso delle sezioni di classe 4 (il metodo può essere applicato alle sezioni di tutte le classi) bisogna usare l'area efficace.

Con HEA 200 A, $N_d = 500$ kN e $M_{xd} = 50$ kNm, S275:

classe 1 $\quad \sigma_{x,Ed} = \frac{N_d}{A} + \frac{M_{xd}}{W_x} = \frac{500000}{5380} + \frac{50000000}{389000} = 221{,}5\ N/mm^2$

$$\Rightarrow \sigma_{id} = \sigma_{x,Ed} = 221{,}5\ N/mm^2 \leq 261{,}9\ N/mm^2 = \frac{275}{1{,}05} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = f_{yd}$$

Stabilità delle membrature

Sono possibili tre verifiche di stabilità delle membrature, a seconda della sollecitazione:

- verifica a carico di punta:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

N_{Ed} sforzo di progetto, $N_{b,Rd}$ resistenza di progetto data da:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_{yk}}{\gamma_{M1}} \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

classi 1,2,3 $\qquad$ classe 4

χ è il fattore riduttivo dipendente dalla classe della sezione, dal tipo di acciaio e dalla snellezza (già visto in precedenza):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \phi = 0{,}5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0{,}2) + \bar{\lambda}^2\right]$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{yc}} = \sqrt{\frac{A f_{yk}}{P_c}} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yk}}{P_c}}$$

classi 1,2,3 $\qquad$ classe 4

Inoltre $P_c = \frac{\pi^2 E J_{min}}{l_0^2} = \frac{\pi^2 E A}{\lambda^2}$, $\lambda = \frac{l_0}{\rho_{min}} = \frac{\beta l}{\rho_{min}}$ e $\rho_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{A}}$

λ non deve essere superiore a 200 per le membrature principali, a 250 per le secondarie.

Con HEA200A lunga $l = 4$ m, incastrata alla base e incernierata in sommità, sottoposta a $N_{Ed} = 1000$ kN e di acciaio S275:

classe 1 $\quad P_c = \frac{\pi^2\, 210000 \cdot 13360000}{(0{,}699 \cdot 4000)^2} = 3542$ kN $\quad \rho_{min} = \sqrt{\frac{13360000}{5380}} = 49{,}8$ mm

$\lambda = \frac{2796}{49{,}8} = 56{,}1 \quad \lambda_{yc} = \pi\sqrt{\frac{210000}{275}} = 86{,}8 \quad \Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{yc}} = 0{,}65$

Curva di instabilità c $\Rightarrow \alpha = 0{,}49$;

$$\phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}49 \cdot (0{,}65 - 0{,}2) + 0{,}65^2\right] = 0{,}82$$

$$\Rightarrow \chi = \frac{1}{0{,}82 + \sqrt{0{,}82^2 - 0{,}65^2}} = 0{,}76$$

$$\Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0{,}76 \cdot 5380 \cdot 275}{1{,}05} = 1064 \text{ KN}$$

Verifica:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{1000}{1064} = 0{,}94 < 1 \text{ soddisfatta}$$

- verifica a inflessione:

$$\frac{M_{x,Ed}}{M_{xb,Rd}} \leq 1$$

Vale per sezione a doppio T inflessa nel piano dell'anima (intorno a x) con piattabanda compressa non vincolata alla stanza lateralmente. $M_{x,Ed}$ è il momento di progetto, $M_{xb,Rd}$ e quello resistente dato da:

$$M_{xb,Rd} = \frac{\chi_{LT}\, Z_x \cdot f_{yk}}{\gamma_{M1}} \qquad M_{xb,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_x\, f_{yk}}{\gamma_{M1}} \qquad M_{xb,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{x,eff} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

classi 1 e 2 — classe 3 — classe 4

Con $\gamma_{M1} = 1{,}05$ e χ_{LT} concettualmente identico a χ, ma dato da:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \begin{cases} 1{,}0 \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \cdot \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

$$\phi_{LT} = 0{,}5\left[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$$

In cui $\bar{\lambda}_{LT}$ dipende dalla classe:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{Z_x\, f_{yk}}{M_c}} \qquad \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_x\, f_{yk}}{M_c}} \qquad \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{x,eff} \cdot f_{yk}}{M_c}}$$

classi 1 e 2 — classe 3 — classe 4

Solitamente si usano $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0{,}2$ (e comunque $\bar{\lambda}_{LT,0} \leq 0{,}4$) e $\beta = 1$ (e comunque $\beta > 0{,}75$). α_{LT}, fattore di imperfezione analogo a α si ricava da una tabella (differente da quella usata per α. f è un fattore che considera la distribuzione del momento flettente tra i vincoli torsionali dell'elemento inflesso:

$$f = 1 - 0{,}5\,(1 - k_c)\left[1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}8)^2\right]$$

Con k_c fattore correttivo ricavato da un'apposita tabella.

Infine M_c è il momento critico elastico d'instabilità flesso-torsionale, che considera sezione lorda del profilo e appoggi torsionali:

L_0 lungh. libera di inflessione pari a L con appoggi torsionali, $L/2$ se i vincoli impediscono l'ingobbamento

EJ_y rigidezza flessionale rispetto a y

GJ_t rigidezza torsionale primaria

EJ_ω rigidezza torsionale secondaria

ψ coefficiente basato sulla distribuzione del momento flettente lungo la trave. Se questo è lineare:

$$M_c = \psi \cdot \frac{\pi}{L_0}\sqrt{EJ_y \cdot GJ_t}\sqrt{1+\frac{\pi^2}{L_0^2}\frac{EJ_\omega}{GJ_t}}$$

$$\psi = 1{,}75 - 1{,}05\frac{M_B}{M_A} + 0{,}3\left(\frac{M_B}{M_A}\right)^2$$

Con M_A e M_B agli estremi, $|M_B| < |M_A|$

Ad esempio con HEA 200 A di lunghezza $l = 4m$, vincolata con appoggi torsionali, sottoposta a $M_{x,Ed} = 50$ kN·m costante sull'asse, S275:

classe 1 $\quad \bar\lambda_{LT,0} = 0{,}2$, $\beta = 1$, $\alpha_{LT} = 0{,}34$ $\quad k_c = 1 \Rightarrow f = 1$

Per ottenere M_c ci servono:

$$J_y = 13360000 \text{ mm}^4 \qquad J_t = \frac{1}{3}\left[2 \cdot 200 \cdot 10^3 + (190-20) \cdot 6{,}5^3\right] = 148895 \text{ mm}^4$$

$$J_\omega = \frac{1}{4} \cdot 190^2 \cdot 13360000 = 1{,}21 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$

Essendo $\psi = 1$ poiché $M_A = M_B$:

$$M_c = \frac{\pi}{4000}\sqrt{210000 \cdot 13360000 \cdot 80769 \cdot 148895} \cdot \sqrt{1+\frac{\pi^2}{4000^2} \cdot \frac{210000 \cdot 1{,}21 \cdot 10^{11}}{80769 \cdot 148895}} = 177{,}7 \text{ kN·m}$$

Quindi:

$$\bar\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{430000 \cdot 275}{177700000}} = 0{,}816 \Rightarrow \phi_{LT} = 0{,}5\left[1 + 0{,}34(0{,}816 - 0{,}2) + 0{,}816^2\right] = 0{,}937$$

$$\Rightarrow \chi_{LT} = \frac{1}{0{,}937 + \sqrt{0{,}937^2 - 0{,}816^2}} = 0{,}715 \leq \begin{cases} 1{,}0 \\ \frac{1}{\bar\lambda_{LT}^2} \cdot \frac{1}{f} = 1{,}89 \end{cases} \quad \text{soddisfatte}$$

$$\Rightarrow M_{x,b,Rd} = \frac{0{,}715 \cdot 430000 \cdot 275}{1{,}05} = 80{,}5 \text{ kN·m}$$

Verifica:

$$\frac{M_{x,Ed}}{M_{x,b,Rd}} = \frac{50}{80{,}5} = 0{,}62 < 1 \quad \text{soddisfatta}$$

- verifica a presso-inflessione:

$$\frac{N_{Ed}\gamma_{M1}}{\chi_{min} f_{yk} A} + \frac{M_{x,eq,Ed}\gamma_{M1}}{\chi_{LT} f_{yk} Z_x\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq,Ed}\gamma_{M1}}{f_{yk} Z_y\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} \leq 1 \quad \text{classi 1 e 2}$$

$$\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot f_{yk} \cdot A} + \frac{M_{x,eq,Ed}\gamma_{M1}}{\chi_{LT} f_{yk} W_x\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,x}}\right)} + \frac{M_{y,eq,Ed}\gamma_{M1}}{f_{yk} W_y\left(1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} \leq 1 \quad \text{classe 3}$$

In cui χ_{min} è il valore minimo del fattore di riduzione per l'instabilità a carico di punta intorno agli assi x e y, N_{cx} e N_{cy} sono i carichi critici euleriani riferiti ai due assi, $M_{x eq,Ed}$ e $M_{y eq,Ed}$ sono i valori equivalenti dei momenti flettenti da assumere nelle verifiche.

Con momento flettente costante:

$$M_{\alpha eq,Ed} = M_{\alpha,Ed} \quad (\alpha = x, y)$$

Con momento flettente variabile:

$$M_{\alpha eq,Ed} = 1,3 M_{\alpha m,Ed} \quad (\alpha = x, y)$$

In cui $M_{\alpha m,Ed}$ è il valore medio. Si pone la limitazione:

$$0,75 M_{\alpha max,Ed} \leq M_{\alpha eq,Ed} \leq M_{\alpha max,Ed} \quad (\alpha = x, y)$$

Se varia linearmente tra i valori di estremità $M_{\alpha A}$ e $M_{\alpha B}$, $|M_{\alpha A}| \leq |M_{\alpha B}|$:

$$M_{\alpha eq,Ed} = 0,6 M_{\alpha A} - 0,4 M_{\alpha B} \geq 0,4 M_{\alpha A}$$

Ad esempio con HEA 200 A lunga $l = 4$ m, doppiamente incernierata, soggetta a $N_{Ed} = 500$ kN e $M_{x,Ed} = 20$ kNm ($M_{y,Ed} = 0$), S 275 (escludendo instabilità flesso-torsionale):

classe 1 $\quad \rho_{min} = \sqrt{\dfrac{13360000}{5380}} = 49,8$ mm $\quad \lambda = \dfrac{4000}{49,8} = 80,3$

$$\lambda_{yc} = \pi \sqrt{\frac{210000}{275}} = 86,8 \Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{80,3}{86,8} = 0,925 \qquad \alpha = 0,49$$

$$\Rightarrow \phi = 0,5 \left[1 + 0,49\,(0,925 - 0,2) + 0,925^2\right] = 1,08$$

$$\Rightarrow \chi = \frac{1}{1,08 + \sqrt{1,08^2 - 0,925^2}} = 0,61$$

Essendo $N_{cx} = P_c = \dfrac{\pi^2 E J_{min}}{l_0^2} = 1731$ kN la verifica è:

$$\frac{500000 \cdot 1,05}{0,61 \cdot 275 \cdot 5380} + \frac{20000000 \cdot 1,05}{1 \cdot 275 \cdot 430000 \left(1 - \frac{500000}{1731000}\right)} = 0,85 < 1 \text{ soddisfatta}$$