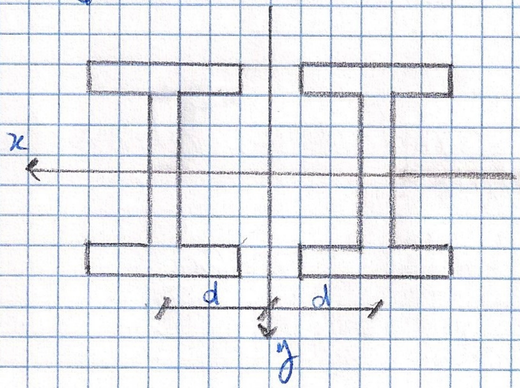
Elementi composti caricati di punta

Gli elementi composti sono costituiti da due correnti (due travi IPE, o C, ecc) opportunamente collegati. Si dicono composti anche gli elementi i cui correnti sono a loro volta elementi composti.

Si distinguono elementi composti a correnti distanziati o ravvicinati. Un'altra distinzione si basa sul modo in cui sono uniti i correnti: tralicciati, calastrellati, imbottiti.

Si possono combinare le due classificazioni: elementi distanziati tralicciati, ravvicinati imbottiti, ecc.

Vediamo come variano raggio d'inerzia e snellezza con il seguente elemento composto:



L'asse x taglia entrambi i correnti. Indipendentemente dal fatto che essi siano solidali, collegati o indipendenti si ha:

$$\rho_x=\sqrt{\frac{J_x}{A}}=\sqrt{\frac{2J_{xc}}{2A_c}}=\sqrt{\frac{J_{xc}}{A_c}}=\rho_{xc}$$

$$\Rightarrow \lambda_x=\frac{l_0}{\rho_x}=\frac{l_0}{\rho_{xc}}=\lambda_{xc}$$

In cui ρ_{xc}, J_{xc}, A_c e λ_{xc} sono relativi al singolo corrente.

Relativamente all'asse y abbiamo invece due casi limite:

- elementi indipendenti:

$$\rho_y=\sqrt{\frac{J_y}{A}}=\sqrt{\frac{2J_{yc}}{2A_c}}=\sqrt{\frac{J_{yc}}{A_c}}=\rho_{yc}\Rightarrow\lambda_y=\frac{l_0}{\rho_y}=\frac{l_0}{\rho_{yc}}=\lambda_{yc}$$

- elementi solidali (collegati su tutta la lunghezza):

$$\rho_y=\sqrt{\frac{J_y}{A}}=\sqrt{\frac{2(J_{yc}+d^2A_c)}{2A_c}}=\sqrt{\rho_{yc}^2+d^2}>\rho_{yc}\Rightarrow\lambda_y=\frac{l_0}{\rho_y}<\frac{l_0}{\rho_{yc}}=\lambda_{yc}$$

La situazione di due elementi collegati è intermedia rispetto ai due casi limite:

$$\lambda_y \le \lambda_{yeq} \le \lambda_{yc}$$

La snellezza equivalente deriva dalla trave deformabile a taglio caricata di punta:

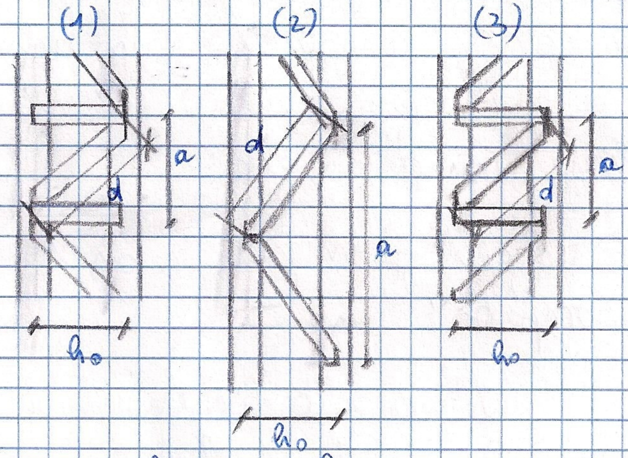
$$\lambda_{yeq}=\sqrt{\lambda_y^2+\frac{\pi^2 EA}{S_{Tx}}}$$

Nello studio degli elementi composti dovremo valutare: stabilità complessiva, stabilità e resistenza dei correnti e resistenza dei collegamenti.

Elementi composti con correnti distanziati

I correnti si dicono distanziati se la distanza tra gli stessi è simile alle dimensioni della sezione trasversale del singolo corrente. Supponendo elementi composti pieni e trascurando gli elementi imbottiti, esaminiamo quelli tralicciati e calastrellati:

- elementi tralicciati:



Quelle disegnate sono le tre principali famiglie di elementi tralicciati

I fase: verifica della stabilità complessiva. Intorno all'asse x che taglia entrambi i correnti:

$$N_{cx} = N_{cEx} = \frac{\pi^2 E J_x}{L_0^2} = \frac{\pi^2 E A}{\lambda_x^2}, \quad \lambda_x = \frac{L_0}{\rho_x}, \quad \rho_x = \rho_{xc}$$

Intorno all'asse y che non taglia i correnti:

$$N_{cy} = \frac{1}{\frac{1}{N_{Ey}} + \frac{1}{S_{Tx}}} = \frac{\pi^2 E A}{\lambda_{yeq}^2}$$

In cui N_{Ey} è il carico euleriano che, come il precedente N_{cEx}, non tiene conto della deformazione a taglio:

$$N_{cEx} = \frac{\pi^2 E J_{eff}}{L_0^2} \qquad J_{eff} = 2\left(\frac{h_0}{2}\right)^2 \cdot A_c = \frac{1}{2} h_0^2 \cdot A_c$$

Con h_0 distanza dei baricentri degli elementi correnti e A_c area della sezione di ogni elemento corrente. La rigidezza al taglio in direzione x varia in base alla tralicciatura:

$$(1)\ S_{Tx} = \frac{n E A_D a h_0^2}{d^3} \qquad (2)\ S_{Tx} = \frac{n E A_D a h_0^2}{2 d^3} \qquad (3)\ S_{Tx} = \frac{n E A_D a h_0^2}{d^3\left(1 + \frac{A_D h_0^3}{A_V d^3}\right)}$$

A_D area della sezione dei diagonali, A_V dei montanti. n è il numero dei piani di tralicciatura

Abbiamo anche la snellezza equivalente e quella efficace:

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_{yeff}^2 + \frac{\pi^2 E A}{S_{Tx}}} \qquad \lambda_{eff} = \frac{L_0}{\rho_{eff}} \qquad \rho_{yeff} = \sqrt{\frac{J_{yeff}}{A}}$$

II fase: verifica di resistenza e stabilità dei singoli elementi. Si assimila l'elemento composto a una travatura reticolare, quindi caricato solo assialmente. Forza normale di calcolo:

$$N_{C,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{yEd}}{h_0} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{yEd}\, h_0 A_c}{2 J_{yeff}}$$

Con N_{Ed} e M_{yEd} rispettivamente forza normale e momento flettente di progetto. Introducendo il difetto di linearità $e_0 = L/500$, il momento M_{yEd} tiene conto delle imperfezioni di montaggio. Considera anche l'inflessione dovuta alle azioni esterne. Ecco come si calcola:

$$M_{y,Ed} = \frac{M^{I}_{yEd} + N_{Ed}\, e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cy}}} = \frac{M^{I}_{yEd} + N_{Ed}\, e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} - \frac{N_{Ed}}{S_{vx}}}$$

Con M^{I}_{yEd} momento flettente di progetto del primo ordine che agisce in mezzeria dell'asta composta, N_{cy} carico critico dell'asta composta, $N_{cr,y}$ quello euleriano della stessa, S_{vx} rigidezza a taglio in direzione x.
Per la valutazione del taglio si usa l'espressione approssimata $M = M_{max} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi z}{L_0}\right)$

$$T = \frac{dM}{dz} = \frac{\pi M_{max}}{L_0} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{L_0}\right) \Rightarrow T_{max} = \frac{\pi M_{max}}{L_0}$$

Quindi taglio e normale sui diagonali saranno:

$$T_{x,Ed} = \frac{\pi \cdot M_{yEd}}{L_0} \qquad N_{D,Ed} = \frac{T_{xEd}}{n} \cdot \frac{1}{\cos\alpha} = \frac{T_{xEd}}{n} \cdot \frac{d}{h_0}$$

Nell'esercizio tralasciamo la verifica sui diagonali. Consideriamo un'asta composta tralicciata di tipo (2). I correnti sono due travi IPE 400 lunghe $L = 11$ m. L'elemento è doppiamente incernierato agli estremi:

$h_0 = 550$ mm $\quad a = 1100$ mm $\quad d = 778$ mm

Diagonali 70·10:

$A = 700\ mm^2 \quad J_x = 285800\ mm^4 \quad J_y = 5800\ mm^4$

Acciaio S275, $N_{Ed} = 2670$ kN, non ci sono momenti flettenti:

classe 3 (correnti) $\quad N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2 \cdot 231300000}{11000^2} = 7923{,}9$ kN

$$\lambda_{yc} = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = 86{,}8 \qquad \lambda = \frac{L}{\rho_x} = \frac{L}{\sqrt{J_x/A}} = 66{,}5 \Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{yc}} = 0{,}766$$

$$\alpha = 0{,}21 \Rightarrow \phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}21 \cdot (0{,}766 - 0{,}2) + 0{,}766^2\right] = 0{,}853$$

$$\Rightarrow \chi = \frac{1}{0{,}853 + \sqrt{0{,}853^2 - 0{,}766^2}} = 0{,}814 \Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0{,}814 \cdot 2 \cdot 8450 \cdot 275}{1{,}05} = 3605 \text{ kN}$$

Verifica:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{2670}{3605} = 0,74 < 1 \quad \text{soddisfatta}$$

Abbiamo eseguito la verifica intorno all'asse x, ma dobbiamo farla anche attorno all'asse y. Avendo infatti un elemento composto non sappiamo a priori quale sarà l'asse di inflessione:

$$J_{y,eff} = \frac{1}{2} \cdot 550^2 \cdot 8450 = 1278062500 \text{ mm}^4$$

$$\Rightarrow N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1278062500}{11000^2} = 21892 \text{ KN}$$

$A_0 = 700 \text{ mm}^2 \quad n = 2 \Rightarrow \quad = \frac{2 \cdot 210000 \cdot 700 \cdot 1100 \cdot 550^2}{2 \cdot 778^3} = 103872 \text{ KN}$

$$\Rightarrow N_{cy} = \frac{1}{\frac{1}{21892} + \frac{1}{103872}} = 18081 \text{ KN} \Rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8450 \cdot 275}{18081000}} = 0,507$$

Non avendo tabelle per la determinazione di α nel caso di elementi composti si usa $\alpha = 0,49$ (curva d'instabilità c):

$$\phi = 0,5\left[1 + 0,49(0,507 - 0,2) + 0,507^2\right] = 0,704 \Rightarrow \chi = \frac{1}{0,704 + \sqrt{0,704^2 - 0,507^2}} = 0,839$$

$$\Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0,839 \cdot 2 \cdot 8450 \cdot 275}{1,05} = 3714 \text{ KN} \Rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{2670}{3714} = 0,72 < 1 \quad \text{soddisfatta}$$

Passando al singolo corrente, esso è soggetto a uno sforzo assiale pari non solo a $\frac{N_{Ed}}{2}$. Si aggiunge l'azione del momento di trasporto:

$$e_0 = \frac{11000}{500} = 22 \text{ mm} \Rightarrow M_{y,Ed} = \frac{0 + 2670000 \cdot 22}{1 - \frac{2670000}{21892000} - \frac{2670000}{103872000}} = 68,9 \text{ KN.m}$$

$$\Rightarrow N_{c,Ed} = \frac{2670000}{2} + \frac{68900000 \cdot 550 \cdot 8450}{2 \cdot 1278062500} = 1460 \text{ KN}$$

La verifica di stabilità rispetto all'asse x è identica a quella dell'elemento composto ed è quindi già eseguita. Passiamo a quella rispetto all'asse y. Consideriamo $l_0 = a = 1100$ mm poiché la tralicciatura "fa da vincolo" e "spezza" la lunghezza totale delle travi correnti:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 13180000}{1100^2} = 22576 \text{ KN} \Rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{8450 \cdot 275}{22576000}} = 0,321$$

$$\alpha = 0,34 \Rightarrow \phi = 0,5\left[1 + 0,34(0,321 - 0,2) + 0,321^2\right] = 0,572$$

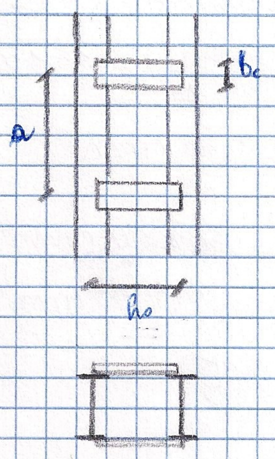
$$\Rightarrow \chi = \frac{1}{0,572 + \sqrt{0,572^2 - 0,321^2}} = 0,957 \Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0,957 \cdot 8450 \cdot 275}{1,05} = 2117 \text{ KN}$$

Verifica:

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{1460}{2117} = 0,69 < 1 \quad \text{soddisfatta}$$

Tralasciamo la verifica degli elementi diagonali.

– elementi calastrellati: anche in questo caso bisogna fare la verifica complessiva e sui singoli elementi. Complessivamente:



Intorno all'asse x:

$$N_{cx} = N_{cEx} = \frac{\pi^2 E J_x}{L_0^2} = \frac{\pi^2 E A}{\lambda_x^2}$$

$$\lambda_x = \frac{L_0}{\rho_x} = \lambda_{cx} \quad , \quad \rho_x = \rho_{xc}$$

Mentre l'asse x taglia entrambi i correnti, così non avviene per l'asse y:

$$N_{cy} = \frac{1}{\frac{1}{N_{cEy}} + \frac{1}{S_{Tx}}} = \frac{\pi^2 E A}{\lambda_{eq}}$$

In cui $N_{cEy} = \frac{\pi^2 E J_{yeff}}{L_0^2}$ è il carico critico euleriano. Il momento d'inerzia efficace intorno a y è dato da:

$$J_{yeff} = \frac{1}{2} h_0^2 A_c + 2 \mu J_c$$

J_c è il momento d'inerzia rispetto all'asse debole della sezione del corrente, μ è coefficiente di efficienza variabile a seconda della snellezza convenzionale dell'asta composta $\lambda = \frac{L_0}{\rho_{eff}} = \frac{L_0}{\sqrt{J_{yeff}/2A_c}} = L_0 \frac{2A_c}{\sqrt{\frac{1}{2} h_0^2 A_c + 2 J_c}}$:

$\mu = 1$	$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$	$\mu = 0$
per $\lambda \le 75$	per $75 \le \lambda \le 150$	per $\lambda \ge 150$

Infine S_{Tx} è la rigidezza al taglio in direzione x:

$$S_{Tx} = \frac{24 E J_c}{a^2 \left(1 + \frac{2 J_c h_0}{n J_b a}\right)} \le \frac{2 \pi^2 E J_c}{a^2}$$

J_b è il momento d'inerzia della sezione dei calastrelli. Usando la snellezza equivalente dell'asta composta:

$$\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_{yeff}^2 + \frac{\pi^2 E A}{S_{Tx}}} \qquad \lambda_{yeff} = \frac{L_0}{\rho_{yeff}} \qquad \rho_{yeff} = \sqrt{\frac{J_{yeff}}{A}}$$

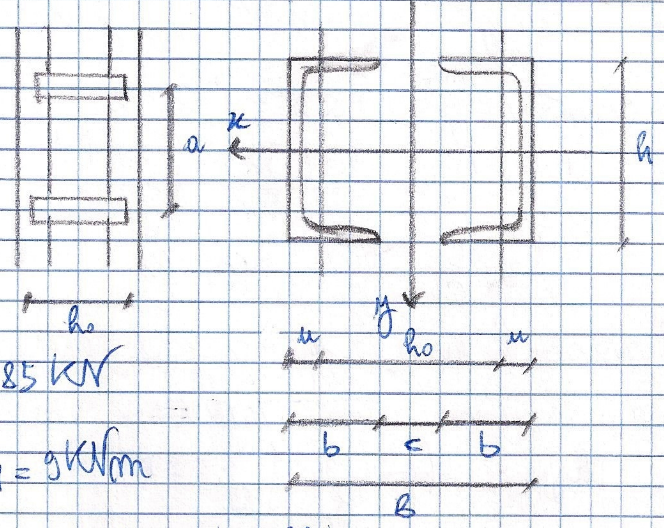
A differenza della tralicciatura, che è assimilata a una travatura reticolare, la calastrellatura viene considerata come un telaio a nodi rigidi. Vanno quindi fatte tutte le verifiche su N, T e M che però tralasciamo.

Consideriamo ad esempio due travi U 120 calastrellate (figura nella pagina successiva):

$h_0 = 117{,}8$ mm $\qquad a = 500$ mm $\qquad A_{cal} = 800$ mm^2

$J_{x} = 666700$ mm^4 $\qquad J_{y} = 4300$ mm^4 $\qquad l_{cal} = 120$ mm

Schema grafico:



$h = 120\ mm$ $b = 55\ mm$

$B = 150\ mm$ $c = 40\ mm$

$u = \frac{B - h_0}{2} = 16{,}1\ mm$

$A = 1700\ mm^2$ $L_0 = 6\ m$

$J_x = 3640000\ mm^4$

$J_y = 431000\ mm^4$

S 275

$N_{Ed} = 85\ kN$

$M^{I}_{yEd} = 9\ kNm$

Verifica intorno all'asse x:

$N_{cx} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2 \cdot 3640000}{6000^2} = 419{,}1\ kN \Rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1700 \cdot 275}{419100}} = 1{,}494$

$\alpha = 0{,}49 \Rightarrow \phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}49(1{,}494 - 0{,}2) + 1{,}494^2\right] = 1{,}932$

$\Rightarrow \chi = \frac{1}{1{,}932 + \sqrt{1{,}932^2 - 1{,}494^2}} = 0{,}317 \Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0{,}317 \cdot 2 \cdot 1700 \cdot 275}{1{,}05} = 282{,}0\ kN$

$\Rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{85}{282{,}0} = 0{,}30 < 1$ soddisfatta

Verifica intorno all'asse y:

$\lambda = 6000 \sqrt{\frac{2 \cdot 1700}{\frac{1}{2} \cdot 117{,}8^2 \cdot 1700 + 2 \cdot 431000}} = 98{,}3 \Rightarrow 75 < \lambda < 150 \Rightarrow \mu = 2 - \frac{\lambda}{75} = 0{,}689$

$\Rightarrow J_{yeff} = \frac{1}{2} 117{,}8^2 \cdot 1700 + 2 \cdot 0{,}689 \cdot 431000 = 12389086\ mm^4$

$\Rightarrow N_{cr,y} = \frac{\pi^2\ 210000 \cdot 12389086}{6000^2} = 713{,}3\ kN$

$S_{Tx} = \frac{24 \cdot 210000 \cdot 431000}{500^2 \left(1 + \frac{2 \cdot 431000 \cdot 117{,}8}{2 \cdot 666667 \cdot 500}\right)} = 7540{,}4\ kN > 7146{,}4\ kN = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2 \cdot 431000}{500^2}$

$\Rightarrow S_{Tx} = 7146{,}4\ kN$

$\Rightarrow N_{cy} = \frac{1}{\frac{1}{713300} + \frac{1}{7146400}} = 648{,}56\ kN \Rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1700 \cdot 275}{648560}} = 1{,}201$

$\alpha = 0{,}49 \Rightarrow \phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}49(1{,}201 - 0{,}2) + 1{,}201^2\right] = 1{,}466 \Rightarrow \chi = \frac{1}{1{,}466 + \sqrt{1{,}466^2 - 1{,}201^2}} = 0{,}434$

$\Rightarrow \frac{N_{c,Ed}\ \gamma_{M1}}{\chi f_{yk} A} + \frac{M_{yeq,Ed}\ \gamma_{M1}}{f_{yk} W_{yeff}\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}\right)} = \frac{85000 \cdot 1{,}05}{0{,}434 \cdot 275 \cdot 2 \cdot 1700} + \frac{9000000 \cdot 1{,}05}{275 \cdot \frac{12389086}{150/2}\left(1 - \frac{85000}{713300}\right)} = 0{,}456 < 1$ soddisfatta

Abbiamo usato $W_{elastico} = \frac{J_{eff}}{h/2}$ al posto di $Z_{plastico}$ a favore di sicurezza. Poi sul singolo corrente ($e_0 = \frac{6000}{500} = 12\ mm$):

$M_{yEd} = \frac{9000000 + 85000 \cdot 12}{1 - \frac{85000}{713300} - \frac{85000}{7146400}} = 11{,}53\ kN \cdot m$ $N_{c,Ed} = \frac{85000}{2} + \frac{11530000 \cdot 117{,}8 \cdot 1700}{2 \cdot 12389086} = 135{,}7\ kN$

$T_{x,Ed} = \frac{\pi \cdot 11530000}{6000} = 6{,}037\ kN$

Ora si procederebbe con la verifica su correnti e calastrelli tenendo conto di N, T e M. Verifica che, come già detto, tralasciamo.

Elementi composti con correnti ravvicinati

I correnti sono ravvicinati se sono posti a distanza uguale o poco maggiore dello spessore delle piastre d'attacco. In ogni caso la distanza deve essere inferiore a tre volte lo spessore dei profilati. L'elemento composto può essere trattato come un'asta semplice se l'interasse tra i collegamenti è inferiore a determinati valori. Detto ρ_{min} il raggio d'inerzia minimo del singolo profilo la spaziatura massima è:

- $15 \cdot \rho_{min}$ per imbottiture bullonate o saldate;
- $70 \cdot \rho_{min}$ per collegamenti con coppie di calastrelli.

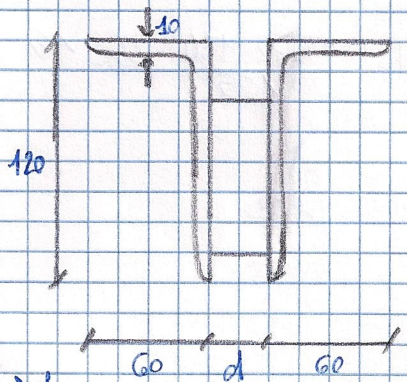
Con spaziature inferiore a tali valori si trascura l'effetto della deformazione per taglio e le verifiche sono quelle classiche dell'asta semplice. Altrimenti si esegue la verifica a instabilità come segue:

- per l'asse x che taglia i correnti si usa la snellezza delle aste semplici, $\lambda_x = \frac{L_0}{\rho_x}$;
- per l'asse y che non taglia i correnti si usa la snellezza equivalente $\lambda_{eq} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$, con:

$$\lambda_y = \frac{L_0}{\rho_y} \qquad \lambda_1 = \frac{L_1}{\rho_{1min}}$$

λ_y relativa all'asta semplice e λ_1 data dal rapporto tra L_1 distanza tra due collegamenti successivi e ρ_{min} raggio d'inerzia minimo del singolo corrente.

È ecco un esempio in cui i correnti sono legati con imbottiture-calastrello (che realizza effettivamente un elemento composto trasferendo taglio e assorbendo scorrimento):



L $60 \times 120 \times 10$ $\quad l_0 = 3\,m$ $\quad d = 30\,mm$

S355 $\quad l_1 = 600\,mm$ $\quad N_{Ed} = 400\,kN$

Singolo elemento:

$A_1 = 1710\,mm^2$ $\quad J_{x1} = 2500000$ $\quad J_{y1} = 421000$

$x'_{G1} = 13,7\,mm$ $\quad J_{m1} = 2640000$ $\quad J_{n1} = 274000$

$$\Rightarrow \rho_{min} = \rho_{n1} = \sqrt{\frac{274000}{1710}} = 12,7\,mm$$

Interasse tra le imbottiture: $l_1 = 600\,mm > 189,6\,mm = 15\,\rho_{min}$

L'elemento va dunque trattato come composto:

$$\rho_x = \sqrt{\frac{2500000}{1710}} = 38,2\,mm \Rightarrow \lambda_x = \frac{l_0}{\rho_x} = 78,46$$

Passiamo alla snellezza intorno all'asse y, che è di tipo equivalente:

$$x_{G1} = x'_{G1} + \frac{d}{2} = 28{,}7\,mm \Rightarrow J_y = 2\left(J_y + A_1 x_{G1}^2\right) = 3659020\,mm^4$$

$$\Rightarrow \rho_y = \sqrt{\frac{3659020}{1710 \cdot 2}} = 32{,}7\,mm < 38{,}2\,mm = \rho_x$$

$$\Rightarrow \lambda_y = \frac{3000}{32{,}7} = 91{,}7 \qquad \lambda_1 = \frac{600}{12{,}7} = 47{,}2$$

$$\Rightarrow \lambda_{eq} = \sqrt{91{,}7^2 + 47{,}2^2} = 103{,}2 > 78{,}5 = \lambda_x$$

La massima snellezza è quella relativa all'asse y:

$$N_c = \frac{\pi^2\, 210000 \cdot 2 \cdot 1710}{103{,}2^2} = 665{,}6\,kN \Rightarrow \bar\lambda = \sqrt{\frac{1710 \cdot 2 \cdot 355}{665600}} = 1{,}351$$

$$\alpha = 0{,}49 \Rightarrow \phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}49(1{,}351 - 0{,}2) + 1{,}351^2\right] = 1{,}694$$

$$\Rightarrow \chi = \frac{1}{1{,}694 + \sqrt{1{,}694^2 - 1{,}351^2}} = 0{,}368 \Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0{,}368 \cdot 2 \cdot 1710 \cdot 355}{1{,}05} = 425{,}7\,kN$$

Verifica:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{400{,}0}{425{,}7} = 0{,}94 < 1 \text{ soddisfatta}$$

Se avessimo avuto l'imbottitura-rompitratta al posto di quella calastrello avremmo dovuto trattare gli elementi come affiancati. L'imbottitura rompitratta non trasferisce taglio e non assorbe scorrimento, non realizzando quindi un elemento composto. Dobbiamo trattare il problema come se avessimo due elementi indipendenti:

$$\rho_y = \sqrt{\frac{2 J_{y1}}{2 A_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 421000}{2 \cdot 1710}} = 15{,}7\,mm \Rightarrow \lambda_y = \frac{3000}{15{,}7} = 191{,}2$$

La snellezza è massima intorno all'asse y:

$$N_c = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2 \cdot 1710}{191{,}2^2} = 193{,}9\,kN \Rightarrow \bar\lambda = \sqrt{\frac{2 \cdot 1710 \cdot 355}{193900}} = 2{,}502$$

$$\alpha = 0{,}34 \Rightarrow \phi = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}34(2{,}502 - 0{,}2) + 2{,}502^2\right] = 4{,}022$$

$$\Rightarrow \chi = \frac{1}{4{,}022 + \sqrt{4{,}022^2 + 2{,}502^2}} = 0{,}139 \Rightarrow N_{b,Rd} = \frac{0{,}139 \cdot 2 \cdot 1710 \cdot 355}{1{,}05} = 161{,}2\,kN$$

Verifica:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{400{,}0}{161{,}2} = 2{,}48 > 1 \text{ non soddisfatta}$$