



Costruzioni in Acciaio

Stabilità dell'equilibrio

Aste composte

Stabilità – Aste composte

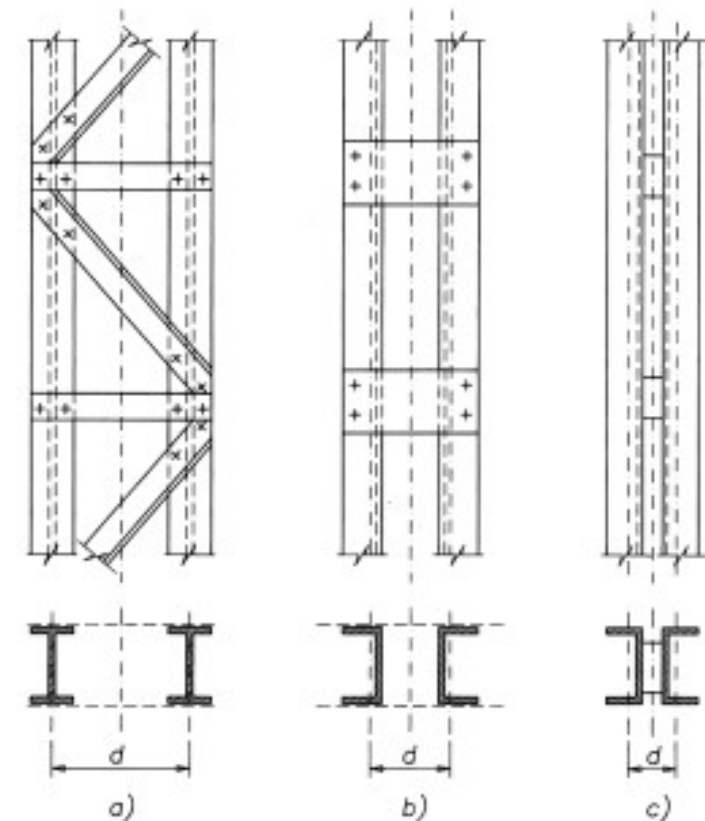
Le aste composte sono formate da **due o più correnti** distanziati ed opportunamente vincolati tra loro in modo discontinuo. Ogni corrente può essere realizzato con uno o più profili collegati tra di loro. In via preferenziale, vengono utilizzate nei casi in cui si ha lunghezza di libera inflessione elevata e i carichi non sono molto onerosi.

Si distinguono aste composte di tipo:

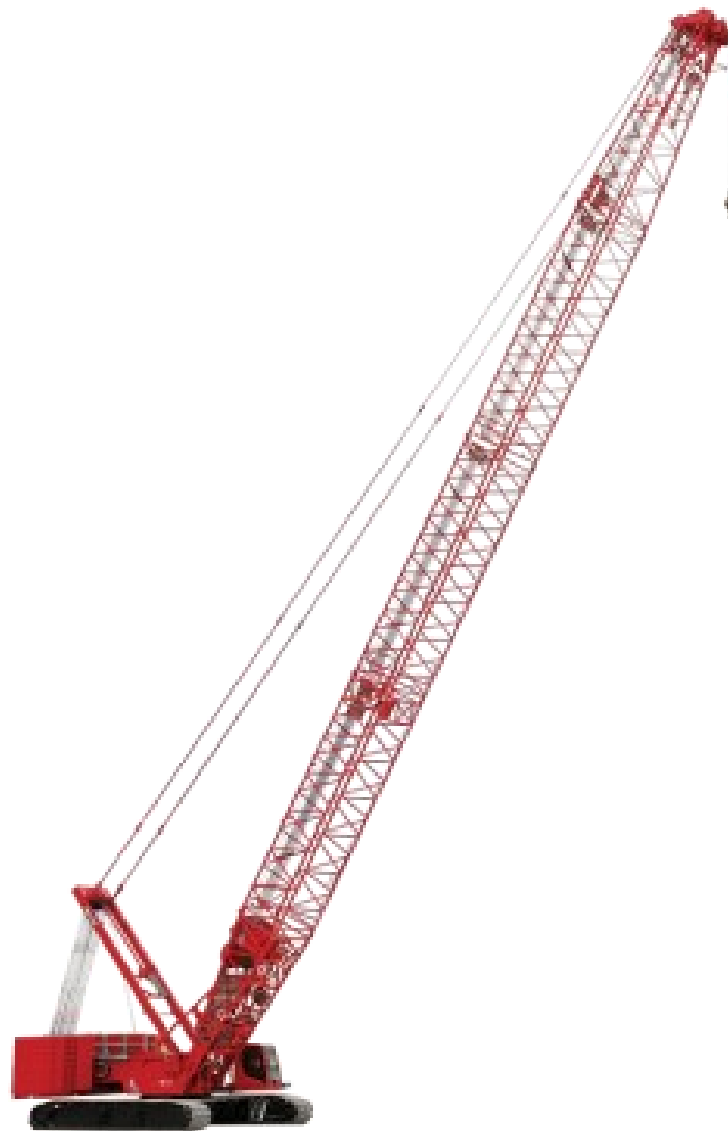
- a) **Tralicciate**
- b) **Calastrellate**
- c) **Abbottonate (o imbottite)**

La capacità portante degli elementi composti è principalmente influenzata da:

- Comportamento **globale** dell'elemento
- Comportamento **locale** delle singole componenti
- Tipo di **collegamento** tra le componenti ed **azioni** che le impegnano

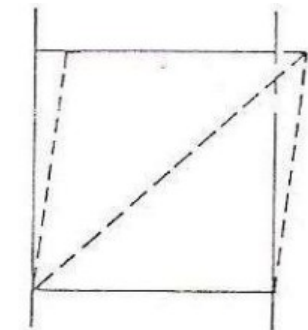


Aste composte: a) tralicciate, b) calastrellate e c) abbottonate.

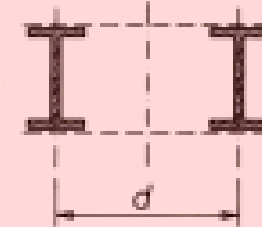
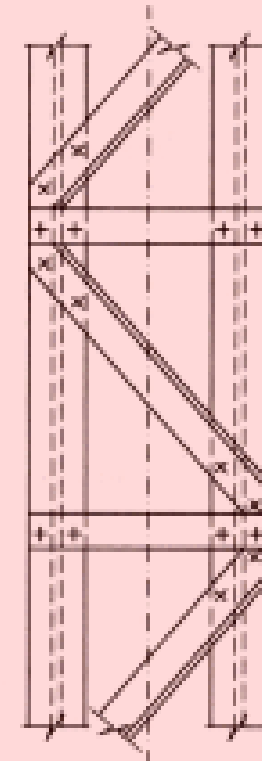
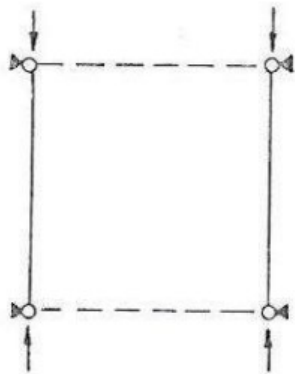


Stabilità – Aste composte

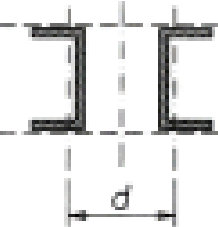
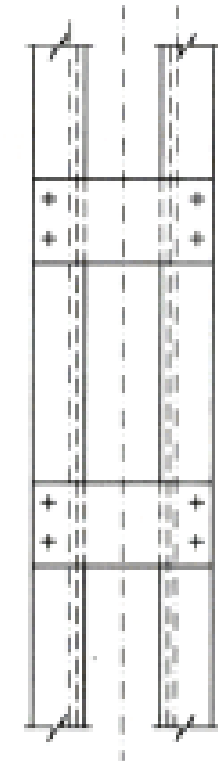
- *aste tralicciate* (fig. 5.1a), costituite da correnti collegate tra loro mediante un traliccio, in cui ogni tratto di corrente può, in genere, essere considerato come un'asta isolata, semplicemente compressa ed avente lunghezza di libera inflessione pari all'interasse dei collegamenti (fig. 5.2a). La deformabilità per taglio dell'elemento composto dipende principalmente dalla rigidezza assiale dell'elemento diagonale e del trasverso;



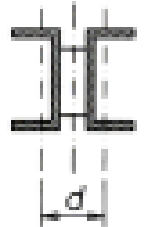
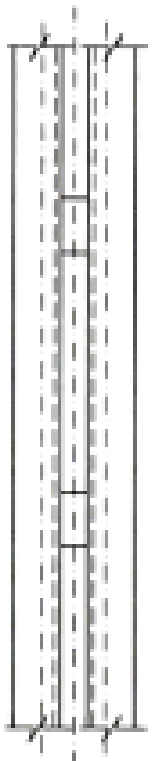
a)



a)



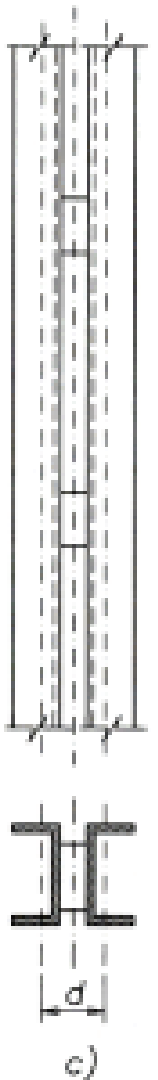
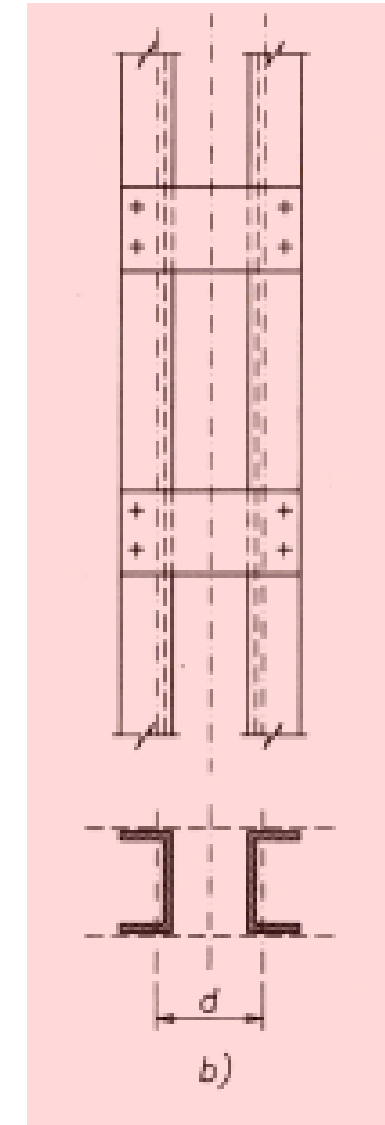
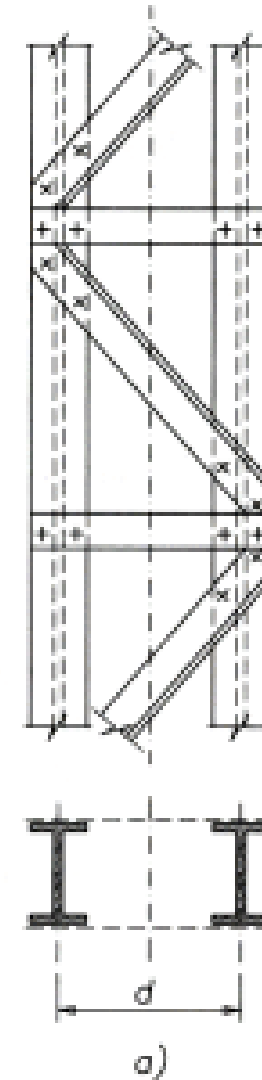
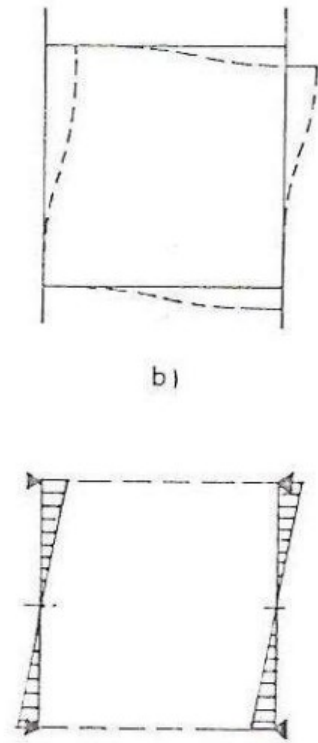
b)



c)

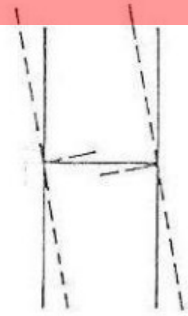
Stabilità – Aste composte

- *aste calastrellate* (fig. 5.1b), costituite da correnti collegati tra loro mediante piastre rettangolari (*calastrelli*), in cui i correnti sono compressi ed inflessi ed il diagramma delle azioni flettenti è in via approssimata schematizzabile con andamento tipicamente lineare (fig. 5.2b). La deformabilità per taglio dell'elemento composto dipende prevalentemente dalla deformabilità flessionale di correnti e calastrelli;

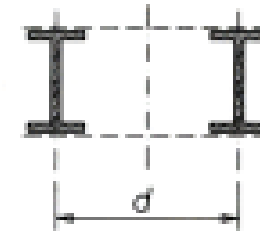
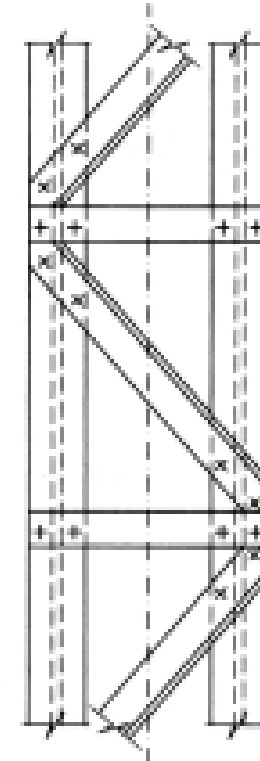
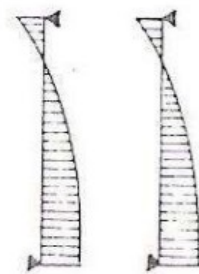


Stabilità – Aste composte

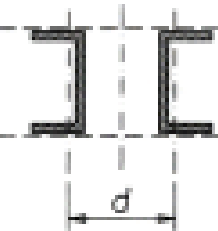
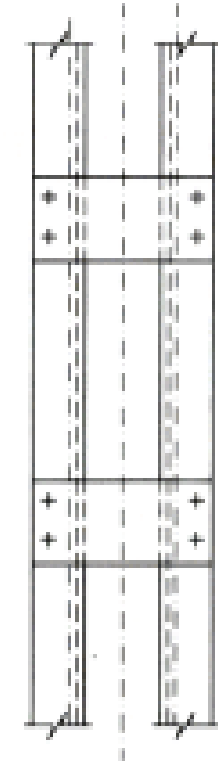
- *aste abbottonate* (fig. 5.1c), costituite da correnti ravvicinati tra i quali vengono interposte lamiere in acciaio. I correnti sono compressi ed inflessi mentre il diagramma delle azioni flettenti ha andamento tipicamente non lineare e deve essere valutato con riferimento alla configurazione deformata dell'elemento (fig. 5.2c). La deformabilità per taglio dipende in modo sostanziale dalla deformabilità flessionale di correnti e collegamenti, nel caso di giunzioni bullonate.



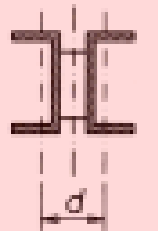
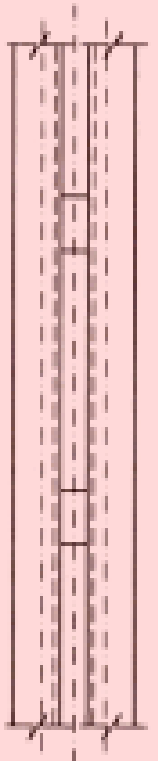
c)



a)



b)



c)



Stabilità – Aste composte

Vantaggi:

- L'uso di profili e membrane distanziate consente di **aumentare il momento di inerzia**
- Ciò avviene senza aumentare significativamente il **peso** della struttura
- Complessivamente, le aste composte offrono **prestazioni superiori** ad altre tipologie e soluzioni

Svantaggi:

- Maggiore **ingombro** delle aste composte
- **Minore rigidità** trasversale
- Maggiore **costo** (lavorazione più complessa)

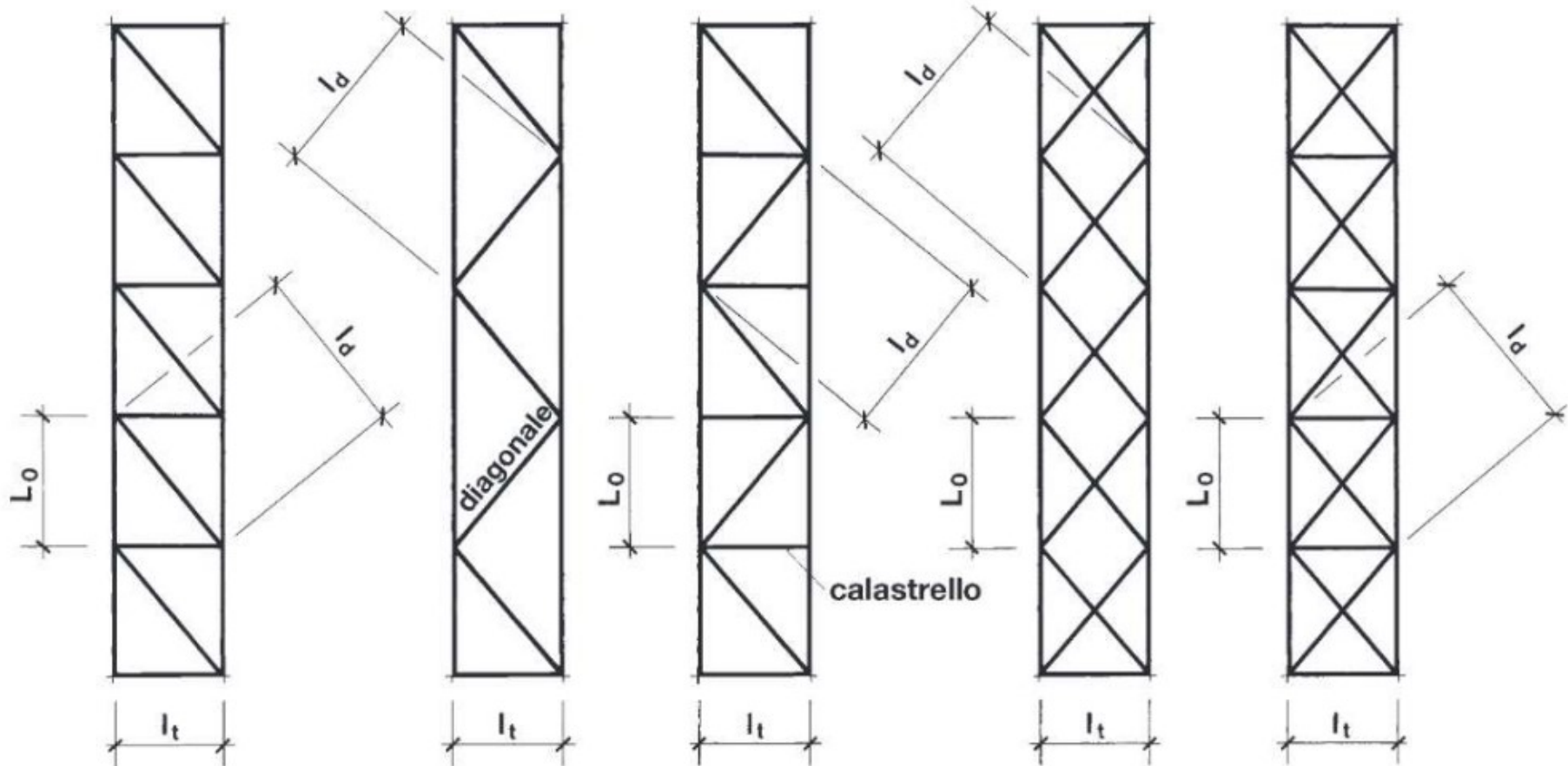
Prestazione meccanica globale:

- Si tratta di aste con prestazione globale fortemente dipendente dalla **deformabilità a flessione e taglio**
- La deformabilità a flessione deriva dal **momento di inerzia della sezione composta**
- La deformabilità a taglio deriva dalla deformabilità delle **aste di collegamento e dei correnti**

Esempi

a) Aste tralicciate

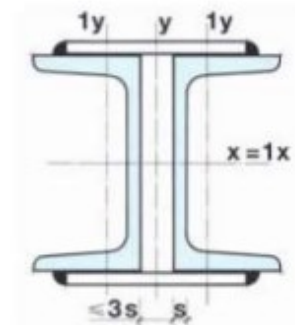
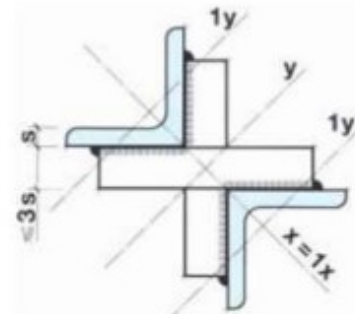
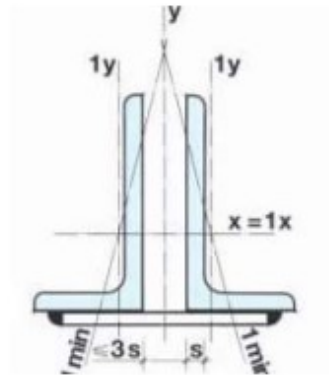
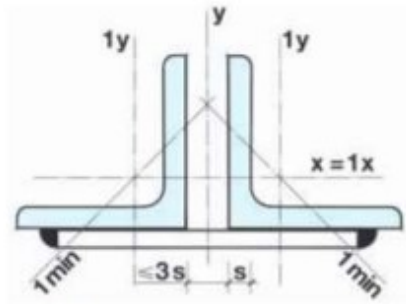
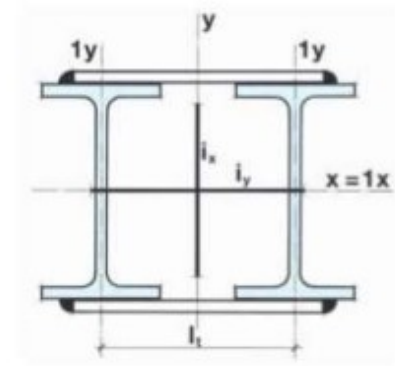
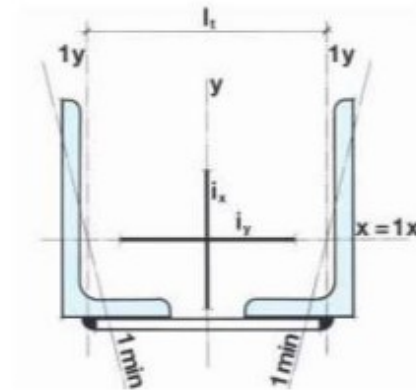
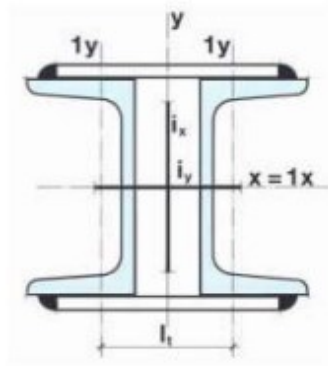
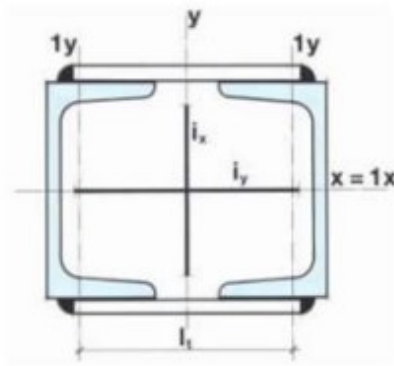
Esempi di possibili schemi:



Esempi

b) Aste calastrellate

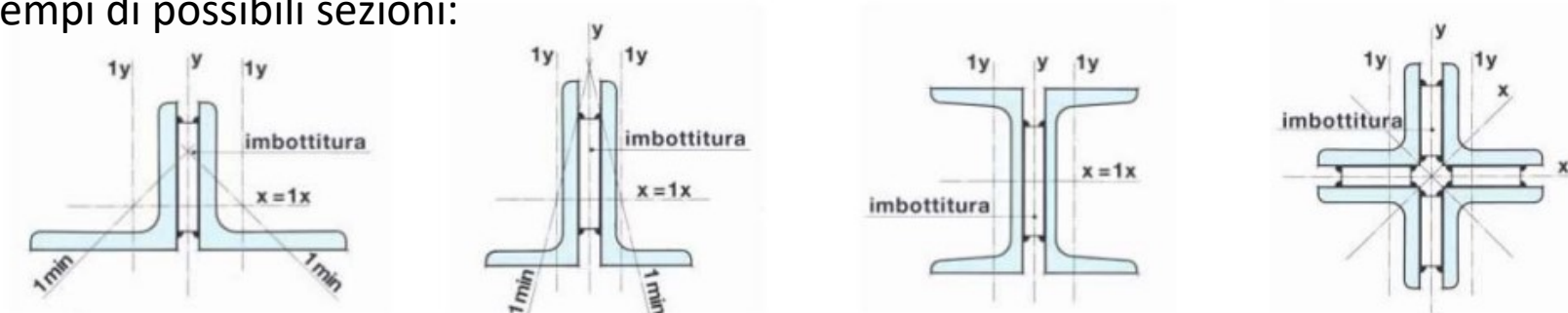
Esempi di possibili sezioni:



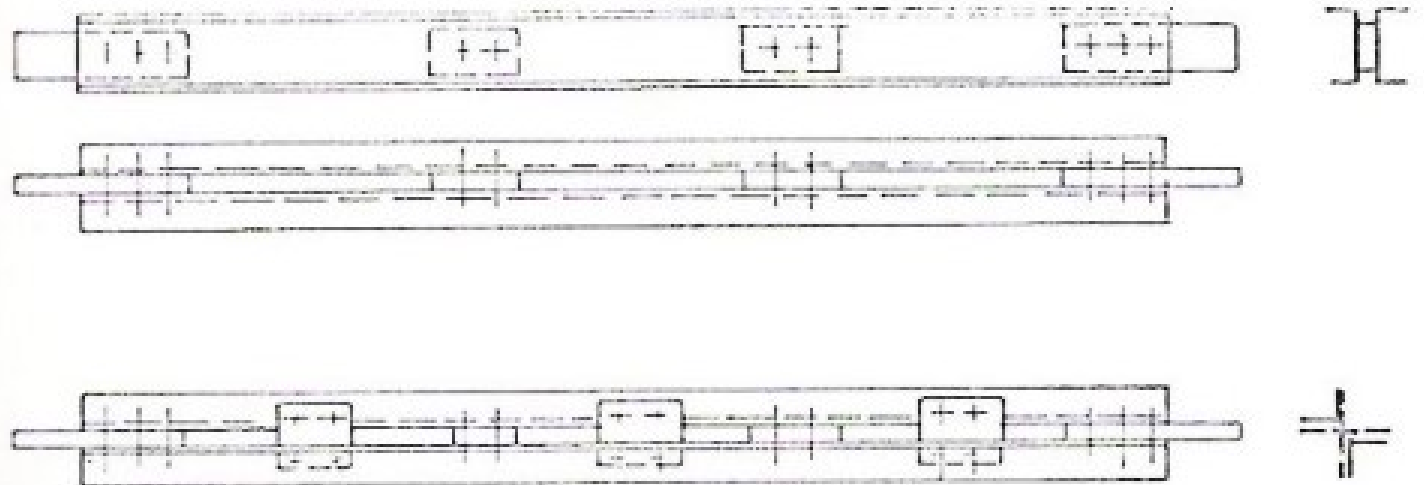
Esempi

c) Aste abbottonate (o imbottite)

Esempi di possibili sezioni:



Attenzione all'efficacia del collegamento!!
(rischio asta **NON** composta)

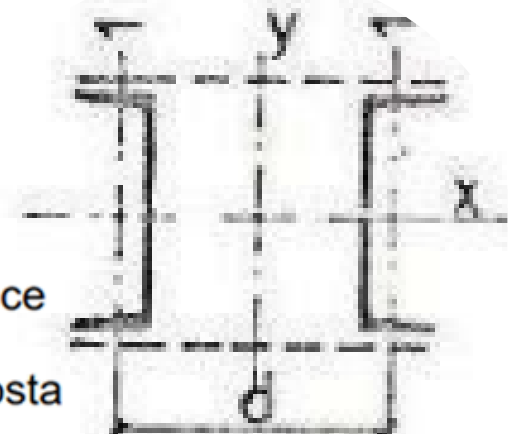


Stabilità – Aste composte

ESEMPIO:

se piano di inflessione Y (inerzia in X) → asta semplice

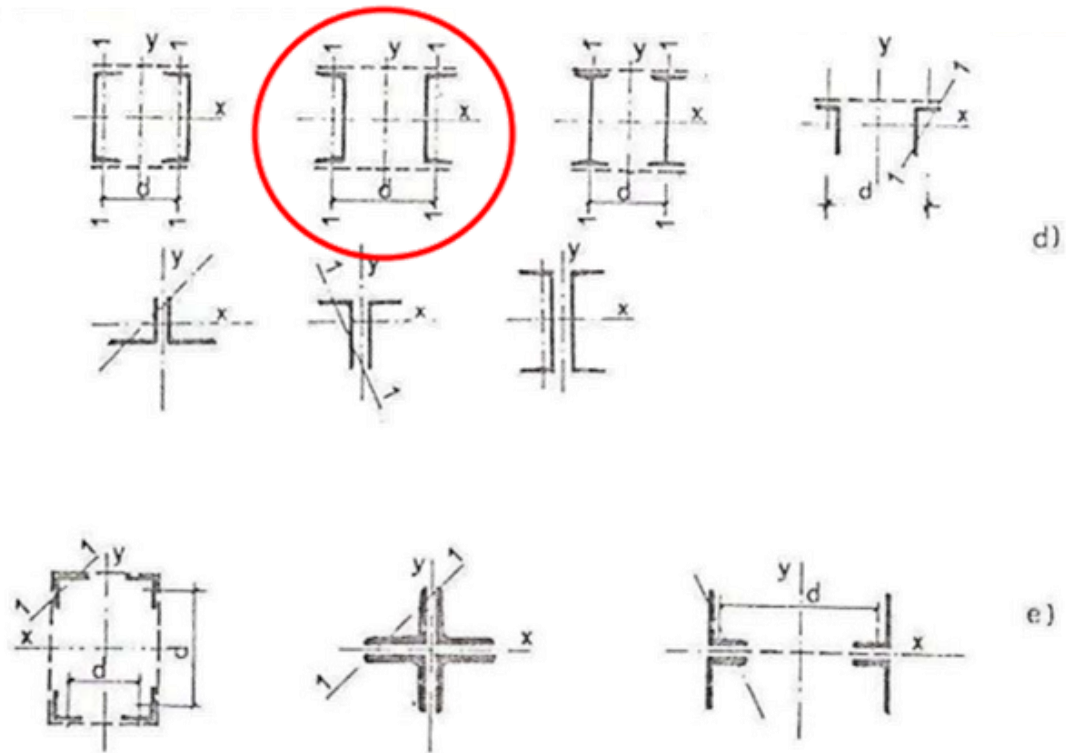
se piano di inflessione X (inerzia in Y) → asta composta



COMPORTAMENTO GLOBALE

Deformabilità per flessione

$$I = 2 I_1 + 2 A_1 d^2/4$$



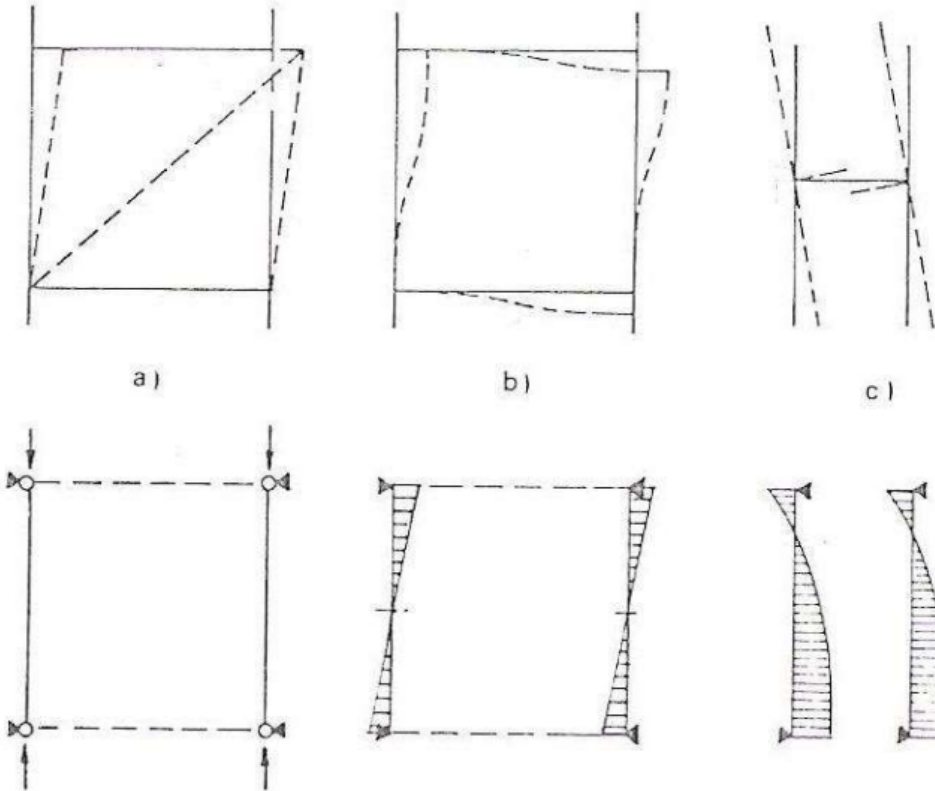
d (o h₀)= distanza assi baricentrici

Stabilità – Aste composte

COMPORTAMENTO LOCALE (funzione del tipo di collegamento)

a) Aste tralicciate b) Aste calastrellate c) Aste abbottonate

- a) Lunghezza libera di inflessione pari all'interasse dei collegamenti (rigidezza assiale della diagonale)
- b) Momenti flettenti valutabili rispetto alla configurazione indeformata (rigidezza assiale correnti paralleli)
- c) È più significativo il contributo dell'inflessione globale rispetto a quello locale dei singoli campi (correnti, attrito, ecc.)

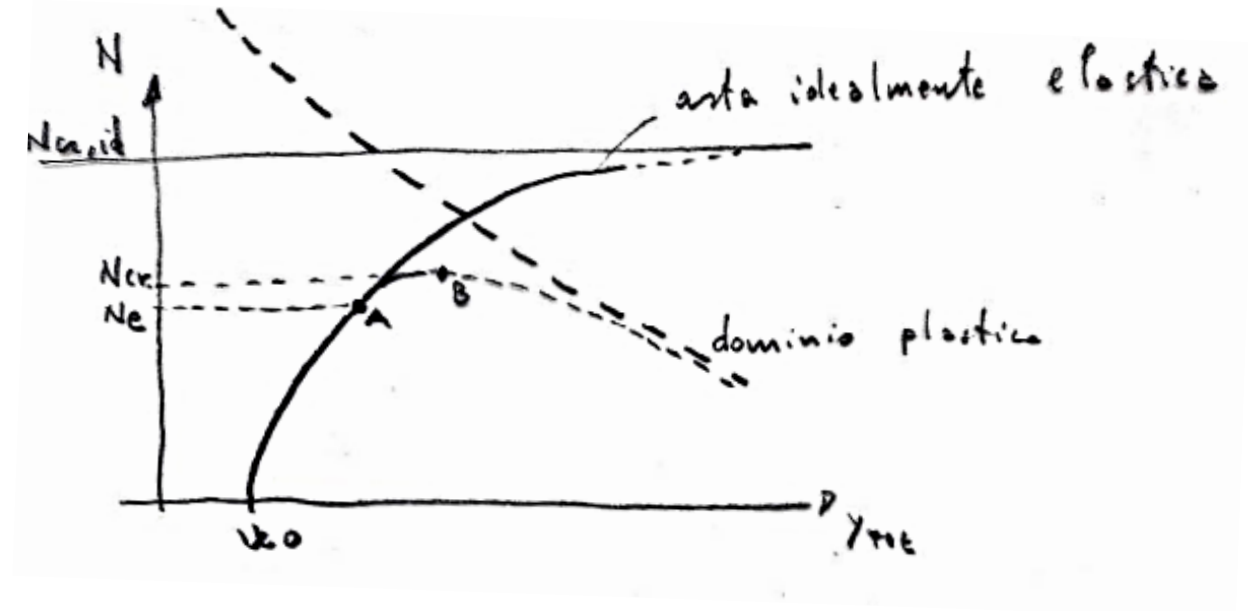
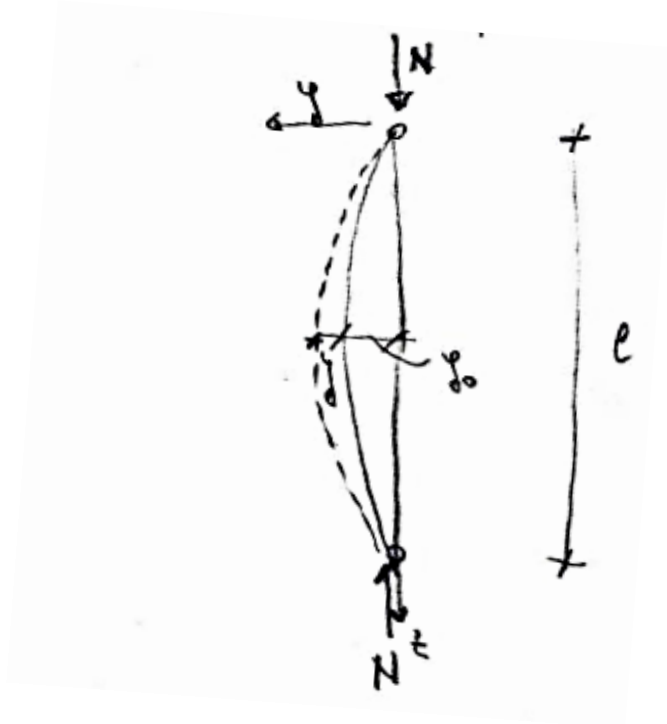


Per assicurare l'indipendenza dal comportamento globale della membratura da quello locale del singolo corrente sono prescritte limitazioni dimensionali

Stabilità – Aste composte

- Sia EC3 che NTC2018 considerano l'effetto penalizzante delle **imperfezioni iniziali**
- Queste vengono schematizzate considerando un difetto di rettilineità:

$$w_0 = e_0 = \frac{L}{500}$$



Aste composte – Collegamenti

- Un aspetto importante riguarda i collegamenti
- Una loro eccessiva deformabilità penalizza la capacità portante di tutta l'asta composta
- Questi devono pertanto essere saldati, ovvero bullonati con un adeguato grado di serraggio, al fine di **evitare scorrimenti anelastici** significativi
- Non tutti collegamenti devono comunque avere una funzione statica, ossia assorbire le forze di scorrimento tra i due correnti
- Per esempio, nel caso di aste composte con correnti ravvicinati, i collegamenti possono avere una «semplice» funzione cinematica, impedendo lo sbandamento dell'elemento composto nella direzione di minore rigidezza della singola componente

Verifica di stabilità – Collegamenti

- La verifica dei calastrelli e degli elementi di parete dei tralicci nei campi estremi può essere eseguita considerando la forza di taglio nell'asta composta:

$$V_{Ed} = \pi \frac{M_{Ed}}{L}$$

dove:

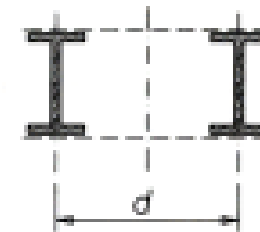
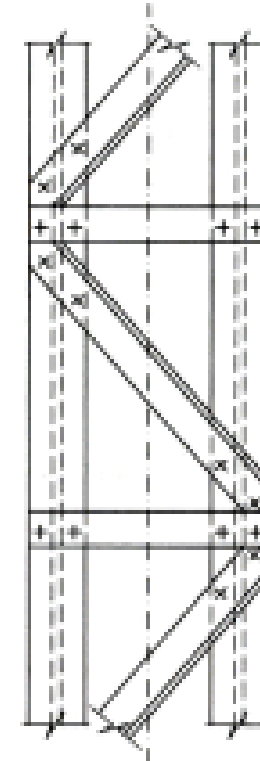
V_{Ed} è lo sforzo di Taglio di progetto dell'asta composta;

M_{Ed} è il momento di progetto

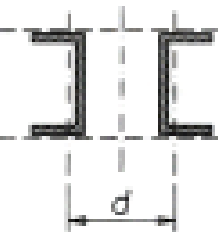
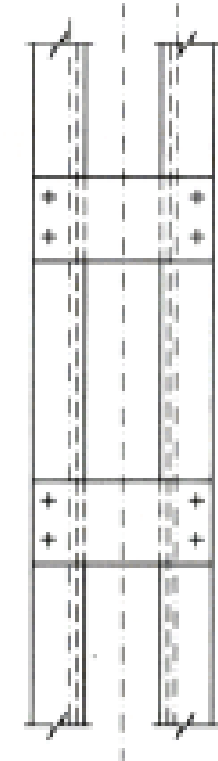
- Per i calastrelli è importante considerare anche il momento flettente e lo sforzo di taglio dovuto al comportamento a telaio

Aste composte – Step di verifica

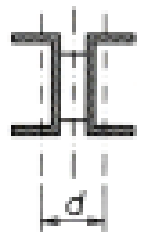
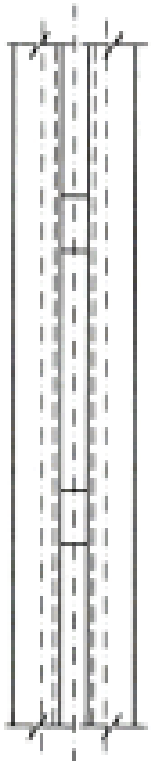
- 
- 1) Determinazione della rigidezza flessionale e della rigidezza a taglio
 - 2) Determinazione delle azioni di progetto in termini di azione assiale, momento flettente e forza di taglio nella sezione maggiormente sollecitata (la mezzeria dell'elemento nel caso di cerniere all'estremità dell'elemento composto)
 - 3) Verifica di stabilità e di resistenza di ogni singolo componente



a)



b)



c)

Verifica di stabilità – Aste composte

- La determinazione della capacità portante delle aste composte è basata sul concetto di **snellezza equivalente**
- Quest'ultima dipende dal **raggio giratore di inerzia** della sezione composta, ossia dalle proprietà inerziali del corrente e dalla loro distanza
- **Aste con correnti distanziati, se $h_0 > 6i$:** Appartengono a questa categoria le aste tralicciate e le aste calastrellate, utilizzate prevalentemente per la realizzazione delle colonne composte
- **Aste con correnti ravvicinati, se $h_0 < 3i$:** Appartengono a questa categoria le aste abbottonate, utilizzate prevalentemente per la realizzazione di correnti diagonali e montanti di travature reticolari

Verifica di stabilità – Aste composte

Aste tralicciate

- Per le aste tralicciate devono essere verificati i fenomeni di instabilità che possono riguardare sia gli elementi diagonali che i correnti
- Il carico critico determinato in funzione della lunghezza libera di inflessione del corrente (L_{ch})
 - Per correnti a parete piena è $L_{ch}=a$
 - Per correnti tralicciati, dipende dallo schema adottato

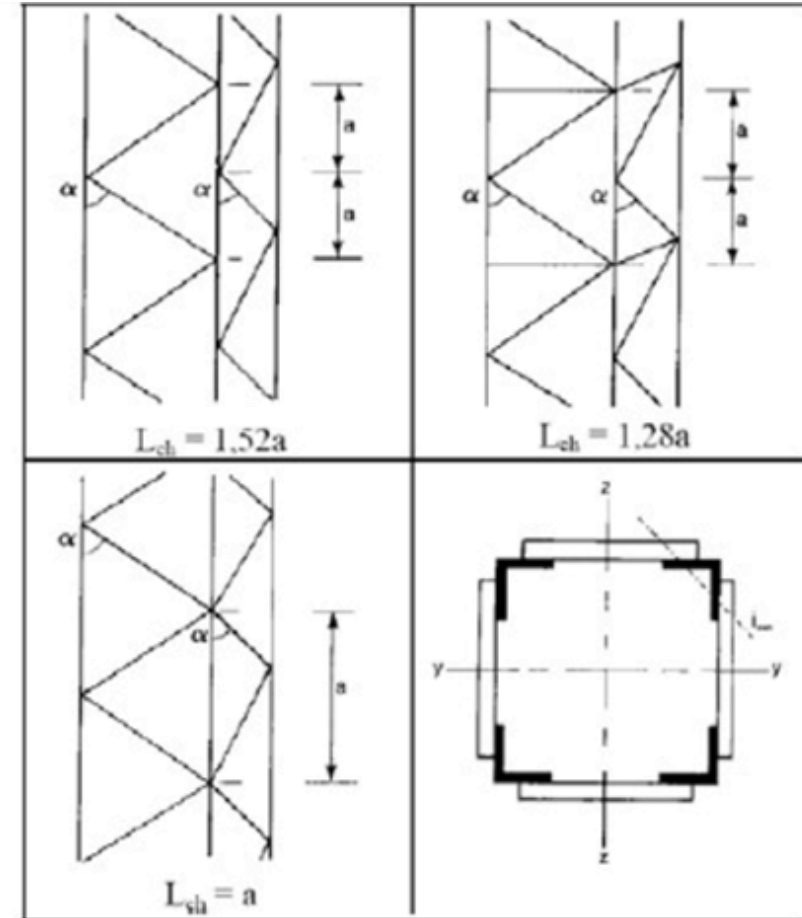


Figura C4.2.8 Lunghezza di libera inflessione dei correnti di aste tralicciate

Si usano metodi semplificati più complessi per aste calastrellate (con effetto momento flettente)

Verifica di stabilità – Aste composte

- La snellezza equivalente λ_{eq} dipende dalla snellezza del singolo corrente λ ed è opportunamente incrementata per effetto della **deformabilità (o rigidità) a taglio** associata al collegamento trasversale discontinuo

- Tenendo conto del contributo della deformabilità a taglio, la freccia nella sezione di mezzeria di un elemento composto, soggetto ad azione assiale N , è approssimabile in:

(e_0 ampiezza di imperfezione iniziale sinusoidale)

$$v = \frac{e_0}{1 - \frac{N}{N_{cr,id}}}$$

- Il termine $N_{cr,id}$ rappresenta il carico critico elastico dell'asta composta esprimibile in funzione di quello critico valutato con il solo contributo flessionale (dove **S_v è la rigidità a taglio del traliccio**):

$$N_{cr,id} = \frac{1}{\frac{1}{N_{cr}} + \frac{1}{S_v}}$$

Verifica di stabilità – Aste composte

- Nella sezione di mezzeria dell'asta composta, **l'azione flettente** è data dall'eccentricità di N, opportunamente amplificata per tenere conto della deformabilità a taglio e degli effetti del II ordine:

$$M = \nu N = \frac{e_0 N}{1 - \frac{N}{N_{cr,id}}}$$

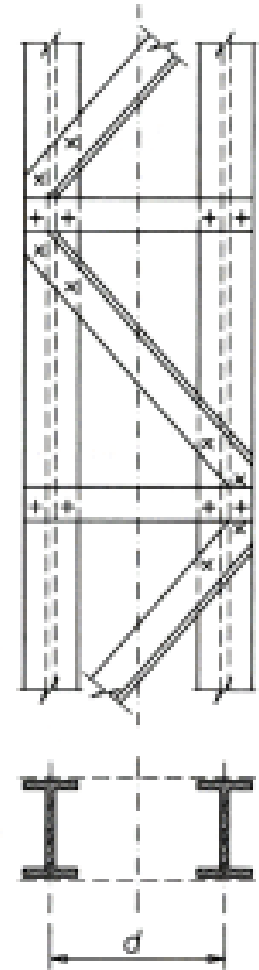
- L'azione assiale** massima associata al singolo corrente appartenente alla membratura composta compressa risulta quindi da semplici considerazioni di equilibrio:

$$N_f = \frac{N}{2} + \frac{M}{h_0} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{\frac{2e_0}{h_0}}{1 - \frac{N}{N_{cr,id}}} \right)$$

Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste tralicciate

- L'effetto dell'azione tagliante sul carico critico dell'asta tralicciata può essere considerato riferendosi ai contributi deformativi dovuti a:
 - Allungamento dell'elemento diagonale
 - Accorciamento del traverso



Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste tralicciate

$$N_{cr,id} = \frac{\pi^2 EI}{\beta_{eq} L^2}$$

$$\beta_{eq} = \sqrt{1 + \pi^2 \frac{EI}{L^2} \left(\frac{1}{\sin(\phi) \cos^2(\phi) EA_d} + \frac{b}{a EA_b} \right)}$$

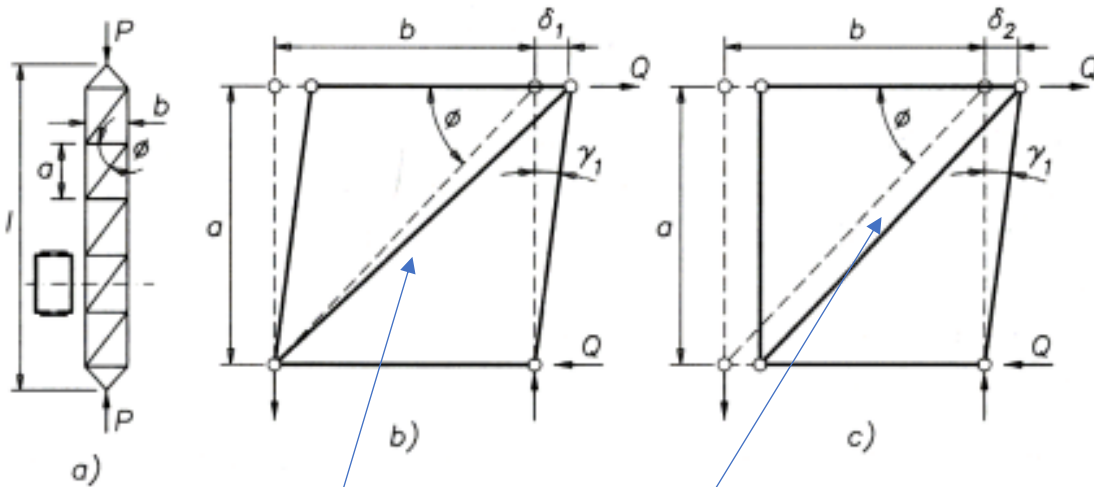


Figura 5.4 Contributi deformativi nel generico campo dell'asta tralicciata:
a) l'allungamento del diagonale e b) l'accorciamento del traverso

- La funzione $\sin(\phi)\cos^2(\phi)$ assume massimo valore per $\phi=35^\circ$
- per valori $\phi=[35^\circ, 40^\circ]$ si ha la massima efficienza della tralicciatura
- Si può anche scrivere $\sin(\phi)=a/L_d$ e $\cos(\phi)=b/L_d$

$$\beta_{eq} = \sqrt{1 + \pi^2 \frac{EI}{L^2} \frac{1}{b^2 a} \left(\frac{L_d^3}{A_d} + \frac{b^3}{A_b} \right)}$$

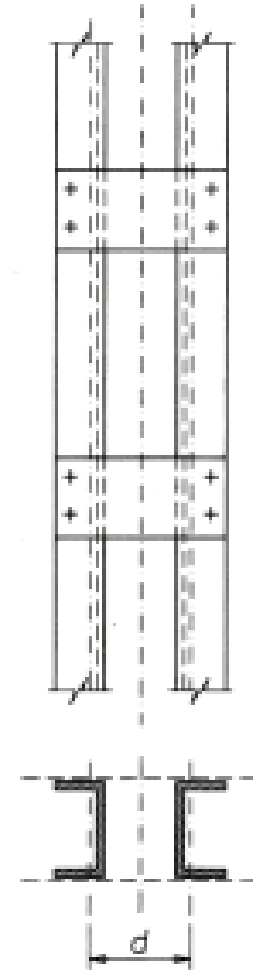
Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste calastrellate

- Nel caso di aste calastrellate i correnti sono compressi e inflessi con un diagramma delle azioni flettenti approssimabile come lineare
- Per la valutazione di S_v si considerano i contributi deformativi dovuti a:
 - **Flessione dei correnti $\delta_{f,corr}$**
 - **Flessione del calastrello $\delta_{f,cal}$**
 - **Deformazione a taglio del calastrello $\delta_{T,cal}$**
- Le aste calastrellate sono strutture **iperstatiche** e si assume che i punti di flesso della deformata siano nella mezzzeria dei calastrelli:

$$\delta_{tot} = \delta_{F,corr} + \delta_{F,cal} + \delta_{T,cal}$$

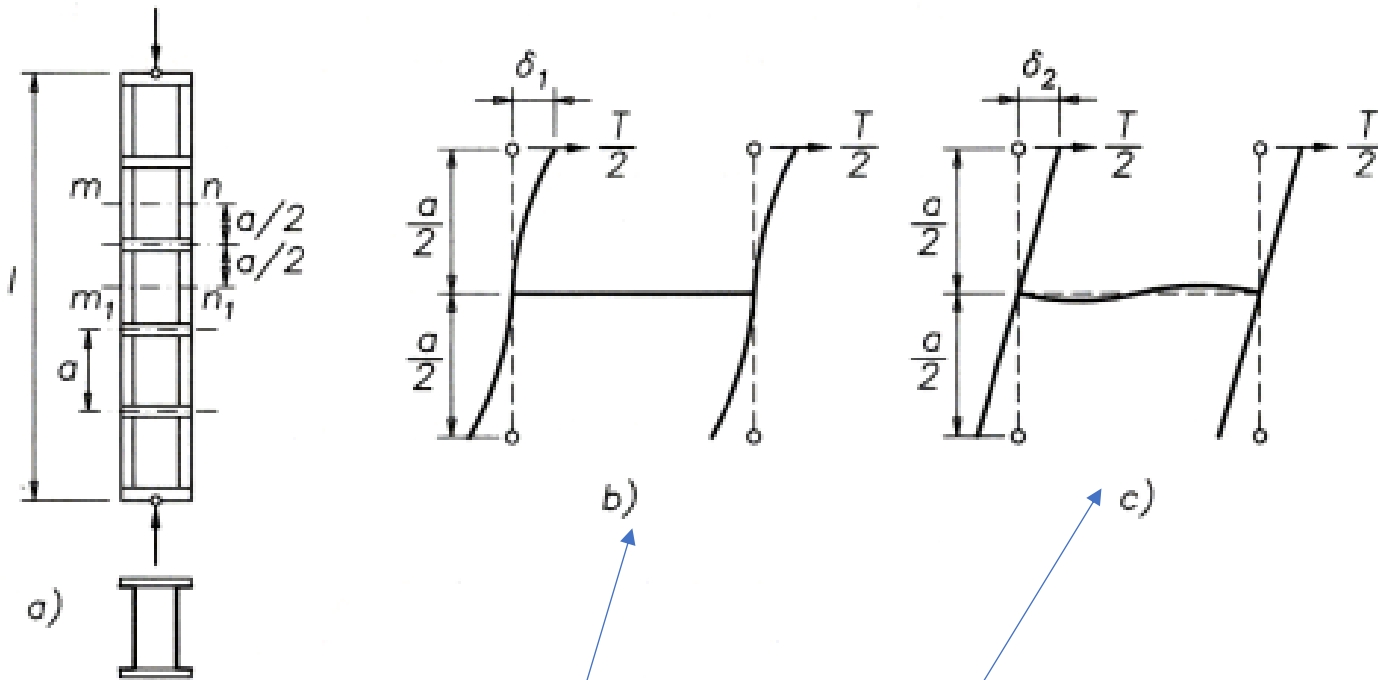
in cui i pedici F e T indicano il contributo deformativo relativo a flessione e taglio mentre cor e cal sono relativi rispettivamente a corrente e calastrello.



Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste calastrellate

- **Flessione dei correnti:** il contributo δ_1 viene valutato riferendosi ad un modello a mensola, sollecitata da una forza pari a $T/2$



$$\delta_1 = \left(\frac{T}{2}\right) \left(\frac{a}{2}\right)^3 \frac{1}{3EI_{corr}} = \frac{Ta^3}{48EI_{corr}}$$

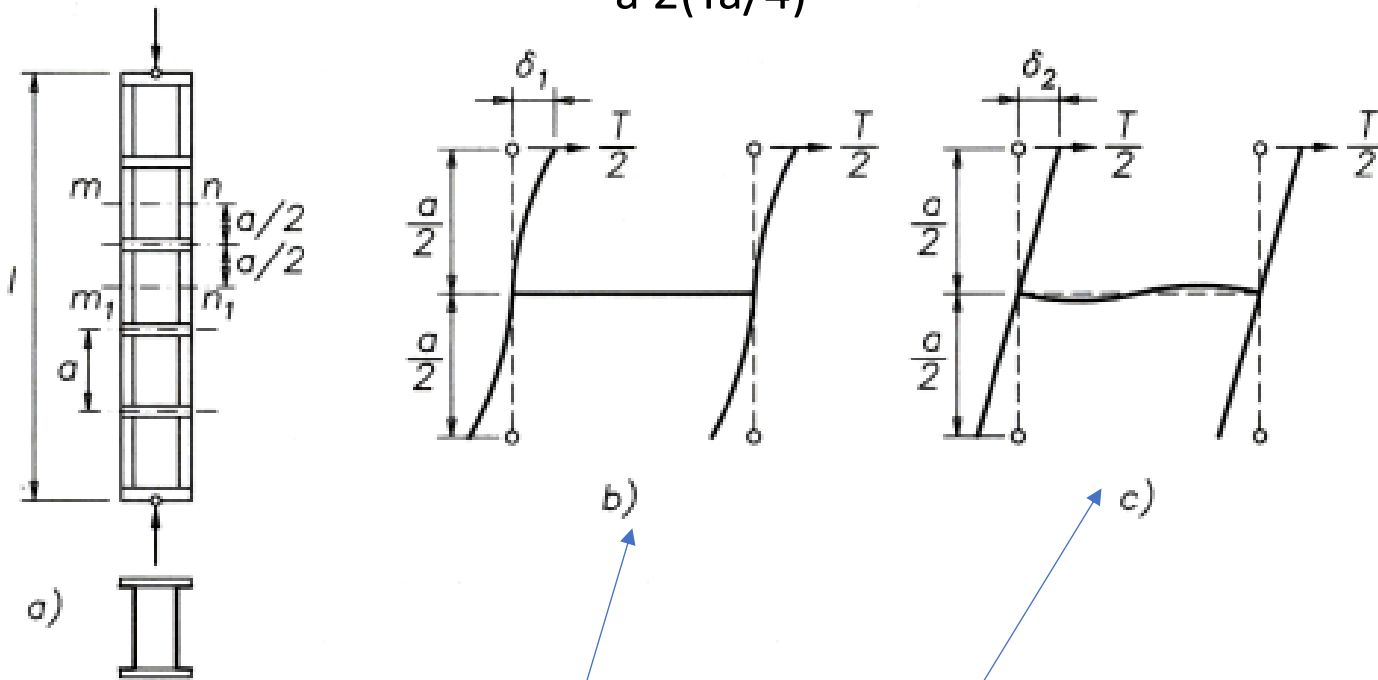
$$\delta_{F,cor} = 2\delta_1 = \frac{Ta^3}{24EI_{corr}}$$

Figura 5.5 Contributi deformativi nel generico campo dell'asta calastrellata:
a) flessione dei correnti e b) flessione del calastrello.

Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste calastrellate

- **Flessione dei calastrello:** il contributo δ_2 viene valutato sulla base della rotazione θ dei nodi tra corrente e calastrello dovuta ad un momento pari a $2(Ta/4)$



$$\theta = 2 \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{a}{2} \right) \frac{1}{3EI_{cal}} \frac{b}{2} = \frac{Tab}{12EI_{cal}}$$

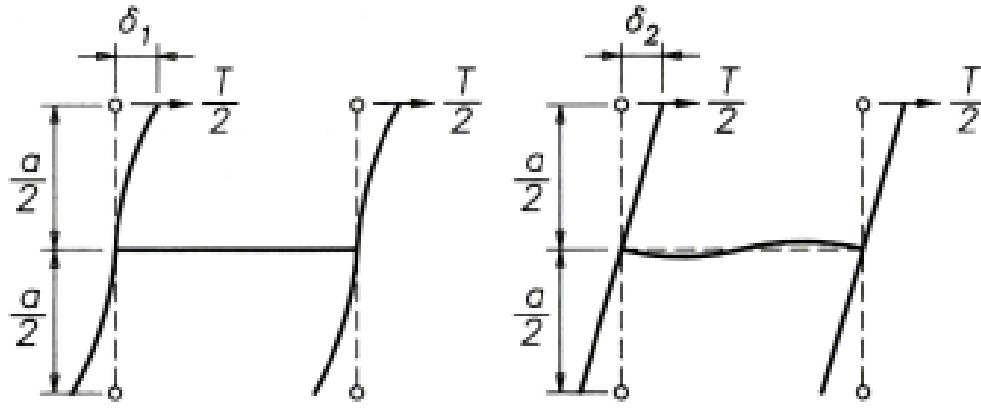
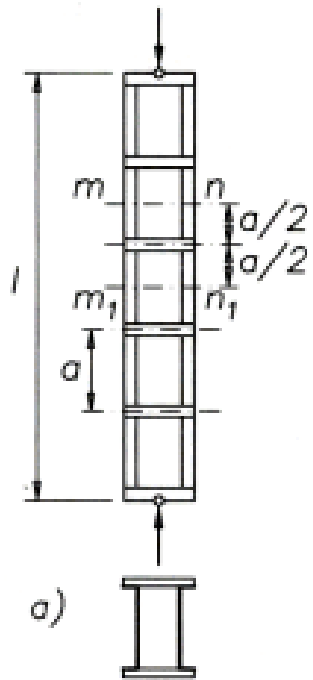
$$\delta_{F,cal} = 2\theta \frac{a}{2} = \frac{Ta^2b}{12EI_{cal}}$$

Figura 5.5 Contributi deformativi nel generico campo dell'asta calastrellata:
a) flessione dei correnti e b) flessione del calastrello.

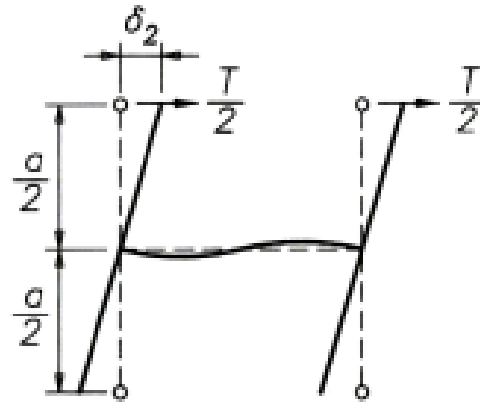
Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste calastrellate

- **Deformazione a taglio del calastrello:** il contributo $\delta_{T,cal}$ viene valutato considerando una trave sollecitata da azione tagliante (Ta/b), sulla base dello scorrimento angolare γ , e considerando che:



b)



c)

$$\gamma = \frac{\chi_T Ta}{2bGA_{cal}}$$

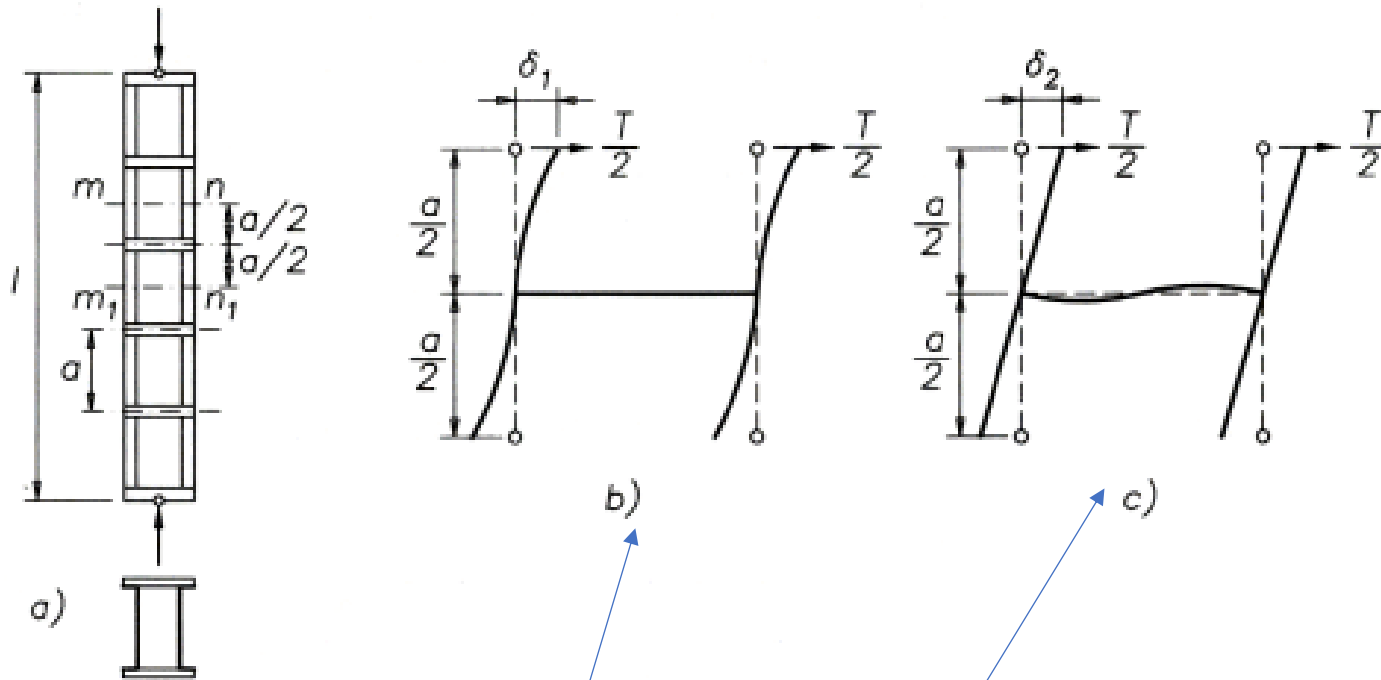
$$\delta_{T,cal} = 2\gamma \frac{a}{2} = \frac{\chi_T Ta^2}{2bGA_{cal}}$$

Figura 5.5 Contributi deformativi nel generico campo dell'asta calastrellata:
a) flessione dei correnti e b) flessione del calastrello.

Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste calastrelate

- E' possibile quindi calcolare la rigidezza S_v come:



$$\begin{aligned} \frac{1}{S_v} &= \frac{\gamma_{tot}}{T} = \\ &= \frac{\delta_{F,cor} + \delta_{F,cal} + \delta_{T,cal}}{(a/2)T} \\ &= \frac{a^2}{24EI_{cor}} + \frac{ab}{12EI_{cal}} + \frac{\chi_T T a^2}{bGA_{cal}} \end{aligned}$$

Figura 5.5 Contributi deformativi nel generico campo dell'asta calastrellata:
a) flessione dei correnti e b) flessione del calastrello.

Aste composte – Rigidezza a taglio

Aste calastrellate

- Il carico critico elastico $N_{cr,id}$ può essere quindi espresso come:

$$N_{cr,id} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{1}{1 + \pi^2 \frac{EI}{L^2} \left(\frac{a^2}{24EI_{corr}} + \frac{ab}{12EI_{cal}} + \frac{\chi_T Ta^2}{bGA_{cal}} \right)} \right]$$

$$\beta_{eq} = \sqrt{1 + \pi^2 \frac{EI}{L^2} \left(\frac{a^2}{24EI_{corr}} + \frac{ab}{12EI_{cal}} + \frac{\chi_T Ta^2}{bGA_{cal}} \right)}$$

L'influenza della deformabilità a taglio è maggiore per l'asta calastrellata che per l'asta tralicciata

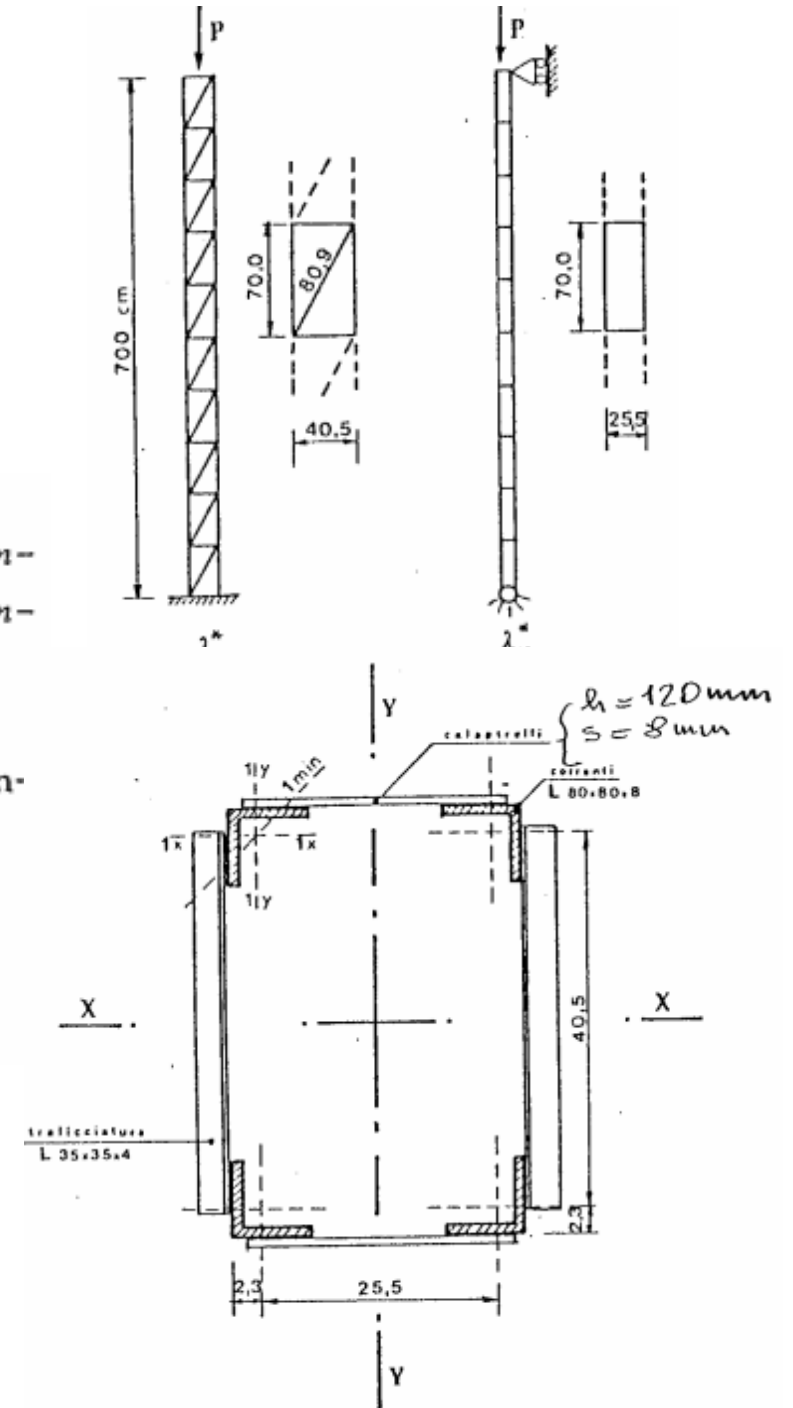
Esempio di calcolo secondo EC3

Determinare il valore massimo del carico ammissibile, secondo la normativa italiana, per l'asta di fig. 3, in acciaio tipo 1, vincolata nei due piani principali di flessione rispettivamente a incastro estremo libero e cerniera-carrello.

I correnti sono costituiti da angolari L 80x80x8 aventi le seguenti caratteristiche statiche

$$A_1 = 12,3 \text{ cm}^2 \quad i_{1x} = i_{1y} = 2,42 \text{ cm} \quad i_{1\min} = 1,56 \text{ cm}$$

$$J_{px} = J_{py} = i_{1x}^2 A = 72 \text{ cm}^4$$



Esempio di calcolo secondo EC3

I correnti sono costituiti da angolari L 80x80x8 mm aventi le seguenti caratteristiche statiche:

$$A_1 = 12.3 \text{ cm}^2 \quad i_{1x} = i_{1y} = 2.42 \text{ cm} \quad i_{1\min} = 1.56 \text{ cm} \quad I_{1x} = I_{1y} = 72 \text{ cm}^4$$

Le caratteristiche statiche dell'asta composta sono quindi:

$$A = 4 \cdot 12.3 = 49.2 \text{ cm}^2 \quad (4 \text{ L } 80 \times 80 \times 8)$$

$$i_x = \sqrt{2.42^2 + (40.5/2)^2} = 20.39 \text{ cm} \quad i_y = \sqrt{2.42^2 + (25.5/2)^2} = 12.98 \text{ cm}$$

$$I_x = A i_x^2 = 20455 \text{ cm}^4 \quad I_y = A i_y^2 = 8289 \text{ cm}^4$$

Le lunghezze di libera inflessione e le relative snellezze, considerando l'asta come un'asta semplice, valgono:

$$\ell_x = 2 \cdot 700 = 1400 \text{ cm} \quad \ell_y = 1 \cdot 700 = 700 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = 1400/20.39 = 68.7 \quad \lambda_y = 700/12.98 = 53.9$$

Eseguiamo le verifiche per $N_{Sd} = 1.5 P_{adm} = 1.5 \cdot 528.3 = 792.5 \text{ kN}$

Esempio di calcolo secondo EC3

a) Instabilità per inflessione attorno all'asse x-x (che impegna la tralicciatura)

Inerzia efficace (#5.9.2.3)

$$I_{\text{eff}} = 0.5 h_0^2 A_f = 20175 \text{ cm}^4$$

$$\text{con: } A_f = 2 \cdot 12.3 = 24.6 \text{ cm}^2 \text{ (2 L 80x80x8)} \quad h_0 = 40.5 \text{ cm}$$

contro un'inerzia $I_x = 20475$ calcolata tenendo conto anche dei momenti d'inerzia baricentrici dei singoli correnti.

Forze nella mezzaria (baricentro) dei correnti (#5.9.2.4)

$$N_{f,Sd} = 0.5 N_{Sd} + M_S/h_0$$

$$M_S = N_{Sd} e_0 / (1 - N_{Sd}/N_{cr} - N_{Sd}/S_V)$$

M_S è il momento del 2° ordine dovuto all'imperfezione geometrica equivalente $e_0 = \ell/500$.

$$\ell = 2 \cdot 700 = 1400 \text{ cm} \quad (\text{lunghezza di libera inflessione})$$

$$e_0 = 1400/500 = 2.8 \text{ cm}$$

$$N_{cr} = \pi^2 EI_{\text{eff}}/\ell^2 = 2133 \text{ kN} \quad (E = 210000 \text{ MPa})$$

S_V è la rigidezza a taglio della tralicciatura ($=GA/\chi$) ricavabile dalla figura 5.9.3 e coincidente con la formulazione della CNR 10011:

Esempio di calcolo secondo EC3

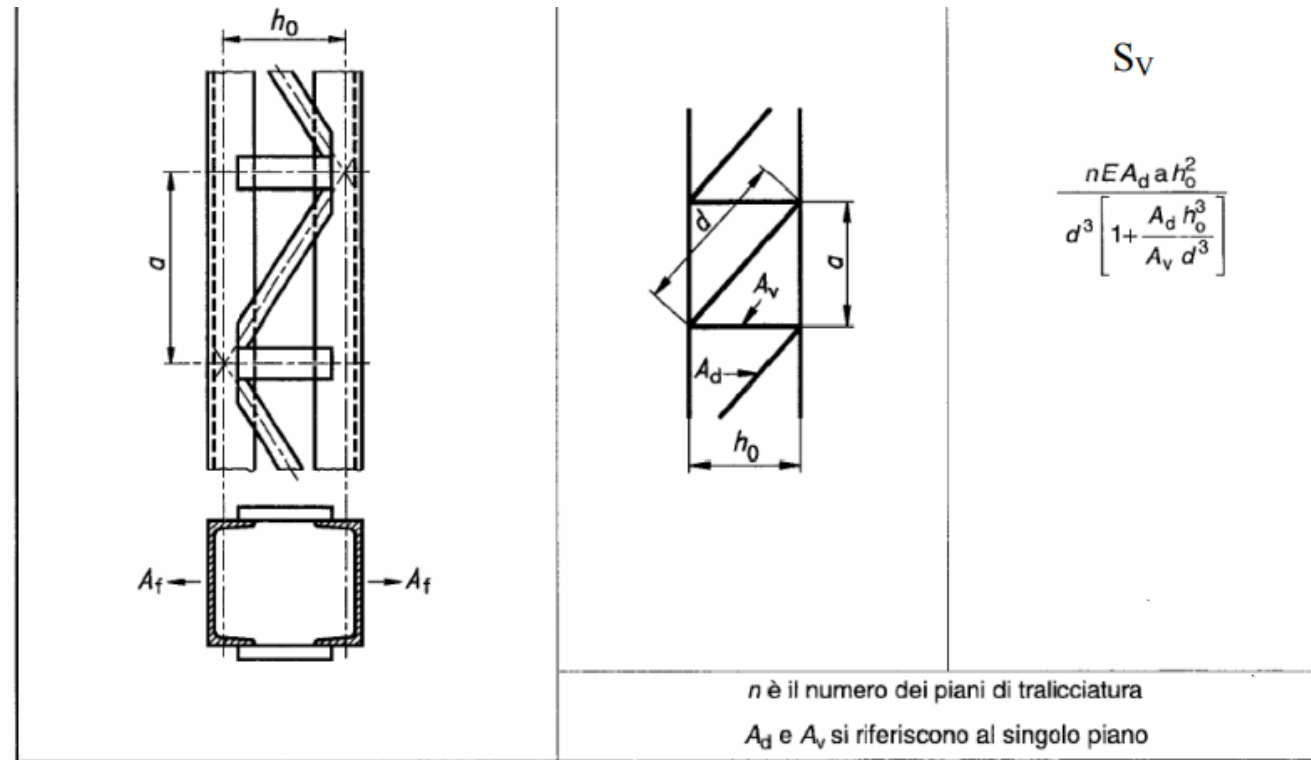


Fig. 5.9.3 - Membratura tralicciata compressa

$$S_V = 2 \frac{EA_d a h_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]} = 27371 \text{ kN}$$

con: $A_d = A_v = 2.67 \text{ cm}^2$ (L35x35x4) $a = 70 \text{ cm}$ $h_0 = 40.5 \text{ cm}$ $d = 80.9 \text{ cm}$

Esempio di calcolo secondo EC3

Si ha pertanto:

$$\frac{1}{N_{cr}} + \frac{1}{S_V} = \frac{1}{2133} + \frac{1}{27371} = 0.505 \cdot 10^{-3} \text{ kN}^{-1}$$

$$M_S = \frac{N_{Sd} e_0}{1 - N_{Sd} \left(\frac{1}{N_{cr}} + \frac{1}{S_V} \right)} = \frac{792.5 \cdot 0.028}{1 - 792.5 \cdot 0.505 \cdot 10^{-3}} = \frac{22.19}{0.5995} = 37.01 \text{ kNm}$$

$$N_{f,Sd} = 0.5 N_{Sd} + M_S / h_0 = 396.2 + 91.4 = 487.6 \text{ kN} \quad (\text{su una coppia di correnti})$$

Il singolo corrente (L 80x80x8) va quindi verificato all'instabilità per il carico assiale $N_{1,Sd} = 243.8$ kN. La sua lunghezza di libera inflessione ℓ_f è di 70 cm e il raggio minimo d'inerzia è $i_{1\min} = 1.56$ cm. La verifica va condotta secondo il #5.5.1 (membrature compresse):

$$N_{b,Rd} = \chi A_{fl} f_y / \gamma_{M1} = 224.8 \text{ kN} < N_{1,Sd} = 243.8$$

$$\text{con: } f_y = 235; \quad \gamma_{M1} = 1.1 \quad A_{fl} = 12.3 \text{ cm}^2$$

$$\lambda = 70 / 1.56 = 44.9 \quad \lambda_1 = 93.9 \quad \bar{\lambda} = \lambda / \lambda_1 = 0.478$$

si deve usare la curva c (angolari); si ottiene:

$$\bar{\lambda} = 0.4 \rightarrow \chi = 0.8973$$

$$\bar{\lambda} = 0.5 \rightarrow \chi = 0.8430$$

$$\bar{\lambda} = 0.478 \rightarrow \chi = 0.8549 \quad \text{per interpolazione lineare}$$

Il corrente non è verificato (di poco) secondo l'eurocodice 3.

Esempio di calcolo secondo EC3

b) Instabilità per inflessione attorno all'asse y-y (che impegna i calastrelli)

Inerzia efficace (#5.9.3.3)

5.9.3.3. Momento d'inerzia della sezione

(1) Si raccomanda che il momento d'inerzia efficace nel piano I_{eff} di una membratura compressa calastrellata con due elementi principali sia assunto pari a:

$$I_{eff} = 0,5 h_0^2 A_f + 2 \mu I_f \quad [5.90]$$

$$I_{eff} = 0,5 h_0^2 A_f + 2 \mu I_f = 8289 \text{ cm}^4$$

$$\text{con: } A_f = 2 \cdot 12,3 = 24,6 \text{ cm}^2 \quad h_0 = 25,5 \text{ cm}$$

μ dipende dalla snellezza λ dell'intera asta composta, considerata come un'asta semplice a parete piena; quindi:

$$\lambda = \lambda_y = 53,9 < 75 \quad \rightarrow \quad \mu = 1$$

Per $\mu = 1$ I_{eff} è il momento d'inerzia calcolato normalmente: $I_{eff} = I_y = 8289 \text{ cm}^4$

Per il calcolo della rigidezza a taglio S_V si deve tener conto della deformabilità dei calastrelli (eq. [5.93]) perché non è verificata né la clausola #5.9.3.2 (5) (larghezza calastrello = 12 cm < 0,5 h_0 = 0,5 · 25,5 = 12,75 cm), né la clausola (6) eq. [5.89] essendo:

$$\frac{nI_b}{h_0} = \frac{2 \cdot 115}{25,5} = 9,02 < 10 \frac{I_f}{a} = 10 \frac{144}{70} = 20,6$$

$$\text{con: } I_b = \frac{1}{12} 0,8 \cdot 12^3 = 115 \text{ cm}^4 \quad \text{momento d'inerzia calastrello}$$

$$I_f = 2 I_{1y} = 144 \text{ cm}^4 \quad \text{momento d'inerzia coppia correnti}$$

$$a = 70 \text{ cm} \quad \text{interasse calastrelli}$$

Esempio di calcolo secondo EC3

La relazione [5.93] fornisce la rigidezza a taglio:

$$S_V = \frac{24EI_f}{a^2 \left[1 + \frac{2I_f h_0}{nI_b a} \right]} = \frac{24 \cdot 210000 \cdot 144 \cdot 10^4}{700^2 \left[1 + \frac{2 \cdot 144 \cdot 25.5}{2 \cdot 115 \cdot 70} \right]} 10^{-3} = 10170 \text{ kN}$$

con la limitazione: $S_V \leq \frac{2\pi^2 EI_f}{a^2} = \frac{2\pi^2 \cdot 210000 \cdot 144 \cdot 10^4}{700^2} 10^{-3} = 12182 \text{ kN}$

Si ha pertanto:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{\ell^2} = \frac{\pi^2 210000 \cdot 8289 \cdot 10^4}{7000^2} 10^{-3} = 3506 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{N_{cr}} + \frac{1}{S_V} = 0.384 \cdot 10^{-3} \text{ kN}^{-1} \quad e_0 = \frac{700}{500} = 1.4 \text{ cm}$$

Il momento sollecitante del 2° ordine vale quindi:

$$M_S = \frac{N_{Sd} e_0}{1 - N_{Sd} (1/N_{cr} + 1/S_V)} = \frac{792.5 \cdot 0.014}{1 - 792.5 \cdot 0.384 \cdot 10^{-3}} = \frac{11.09}{0.696} = 15.93 \text{ kNm}$$

Forza nella mezzaria del corrente [5.91]:

$$N_{f,Sd} = 0.5 N_{Sd} + M_S h_0 A_f / I_{eff} = 0.5 (792.5 + 15.93 \cdot 0.255 \cdot 24.6 \cdot 10^{-4} / (8289 \cdot 10^{-8}))$$

$$N_{f,Sd} = 396.2 + 60.3 = 456.5 \text{ kN} \quad \text{su una coppia di correnti}$$

$$N_{lf,Sd} = 456.6/2 = 228.3 \text{ kN} \quad \text{sul singolo profilo a L}$$

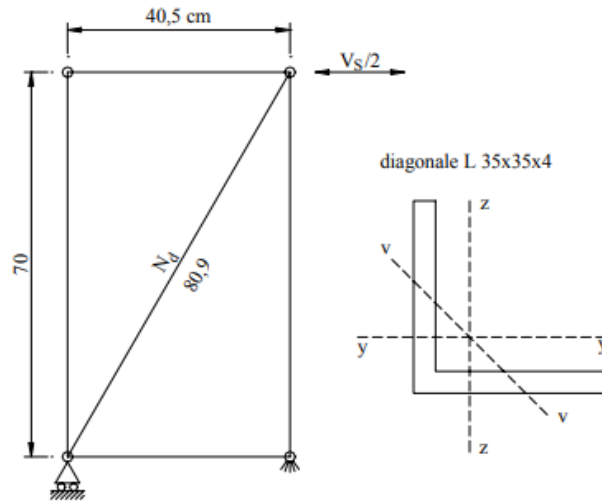
La verifica di stabilità è praticamente soddisfatta essendo la resistenza del singolo profilo a L

$$N_{b,Rd} = 224.8 \text{ kN}.$$

Esempio di calcolo secondo EC3

Verifica delle aste di parete

Diagonali



$$i_v = 0.678 \text{ cm} \quad \lambda_v = \frac{80.9}{0.678} = 119 \quad \bar{\lambda}_v = \frac{119}{93.9} = 1.2707$$

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0.35 + 0.7 \bar{\lambda}_v = 1.2395$$

$$i_z = i_y = 1.05 \text{ cm} \quad \lambda_z = \frac{80.9}{1.05} = 77.05 \quad \bar{\lambda}_z = \frac{77.05}{93.9} = 0.8205$$

$$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0.35 + 0.7 \bar{\lambda}_z = 1.0744 < \bar{\lambda}_{eff,v}$$

Si verifica quindi la diagonale, soggetta a $N_{sd}=8.30 \text{ kN}$, per la snellezza $\bar{\lambda}_{eff,v} = 1.2395$ con la curva c. Non si tiene conto dell'eccentricità dell'asse baricentrico rispetto alle connessioni di estremità perché queste sono sufficientemente rigide (2 bulloni). Si ha:

$$\chi = 0.4160 \quad N_{b,Rd} = 0.4160 \cdot 267 \cdot 235 / 1.1 \cdot 10^{-3} = 23.7 \text{ kN} \gg N_{sd}$$

La verifica della diagonale è quindi soddisfatta.

La forza di taglio interna (#5.9.2.6) vale:

$$V_S = \pi M_S / \ell = \pi \cdot 37.01 / 14 = 8.31 \text{ kN}$$

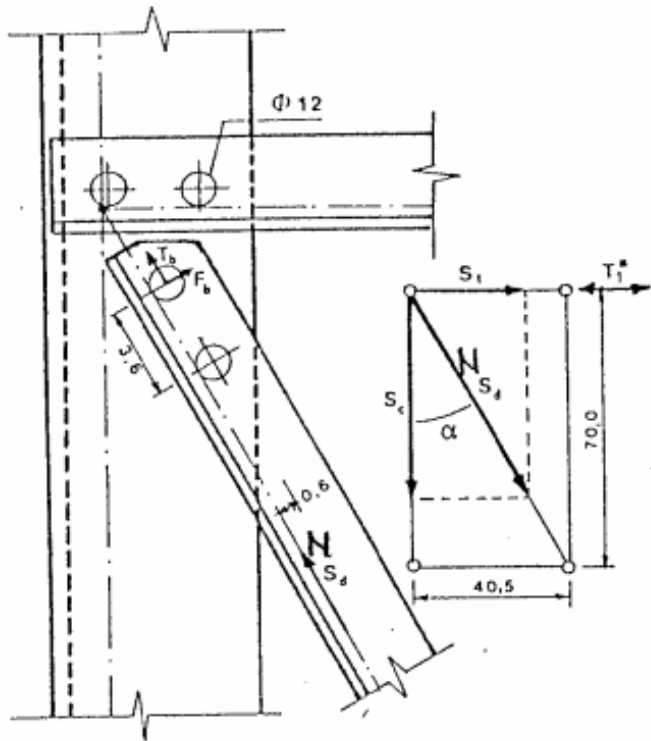
La forza in una diagonale è quindi:

$$N_d = \frac{V_S}{2} \frac{80.9}{40.5} = 8.30 \text{ kN}$$

La diagonale, costituita da un profilato a L 35x35x4, va verificata a compressione con lunghezza di libera inflessione 80.9 cm, ma con snellezza efficace data dal #5.8.3 (angolari quali aste di parete in compressione) per l'inflessione intorno agli assi v-v e z-z (o y-y):

Esempio di calcolo secondo EC3

Verifica del collegamento bullonato



I bulloni vanno verificati per la risultante R_b delle forze:

$$T_b = N_{Sd} / 2 = 4.16 \text{ kN}$$

$$F_b = N_{Sd} \cdot 0.6 / 3.6 = 1.39 \text{ kN}$$

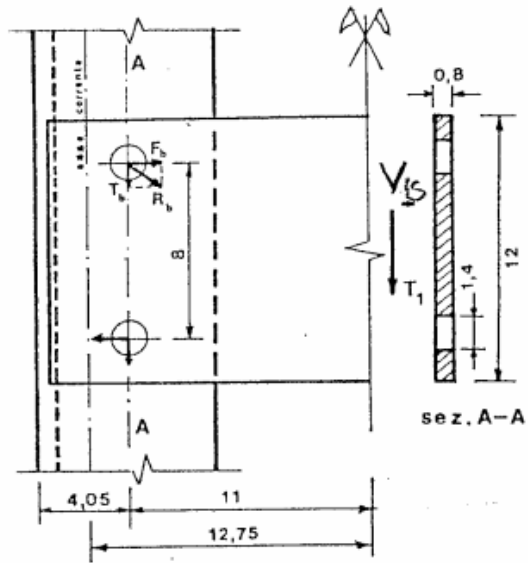
$$R_b = \sqrt{T_b^2 + F_b^2} = 4.39 \text{ kN}$$

L'angolare deve essere verificato a rifollamento e la sua sezione netta, dato che la N può essere di trazione, deve essere verificata secondo #6.5.2.3

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{con} \quad \beta_2 = 0.46 \quad \text{essendo} \quad p_1 = 3.6 = 3d_0$$

Esempio di calcolo secondo EC3

Calastrelli



Forza interna di taglio:

$$V_S = \pi M_S / \ell = 7.15 \text{ kN} \quad [5.94]$$

con: $M_S = 15.93 \text{ kNm}$; $\ell = 700 \text{ cm}$

Su ciascun calastrello agisce il taglio:

$$V_{1S} = \frac{1}{2} V_s \frac{a}{h_0} = \frac{1}{2} 7.15 \frac{70}{25.5} = 9.81 \text{ kN}$$

Nella sezione A-A il calastrello è soggetto al momento flettente:

$$M_{Sd} = 9.81 \cdot 0.11 = 1.080 \text{ kNm}$$

La sezione netta ha modulo di resistenza elastico (si potrebbe usare quello plastico) $W_{\text{net}} = 13.2 \text{ cm}^3$.

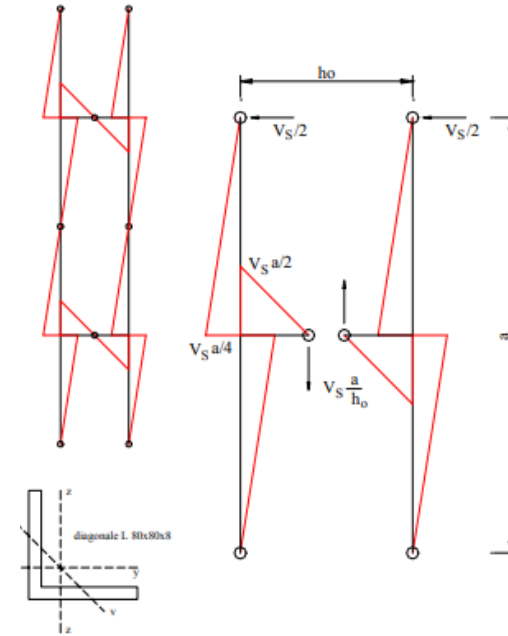
La sua resistenza è (v. #5.4.5.1 (3)):

$$M_{u,Rd} = 0.9 W_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0.9 \cdot 13.2 \cdot 360 / 1.25 \cdot 10^{-3} = 3.42 \text{ kNm} \gg M_{Sd}$$

I bulloni sono soggetti alle forze:

$$T_b = 9.81/2 = 4.90 \text{ kN} \quad F_b = 1.080/0.08 = 13.49 \text{ kN}$$

$$R_b = \sqrt{T_b^2 + F_b^2} = 14.36 \text{ kN}$$



Il taglio V_{1S} determina nel corrente il momento:

$$M_{Sd} = V_{1S} a/4 = 9.81 \cdot 0.70/4 = 1.72 \text{ kNm}$$

che va combinato con l'azione assiale:

$$N_{Sd} = 792.5/4 = 198.1 \text{ kN.}$$

Si usa il carico esterno N_{sd} non amplificato dall'effetto del 2° ordine perché i calastrelli più sollecitati sono quelli di estremità dove l'effetto del 2° ordine è nullo (#5.9.3.6 (2)).

Il momento flettente impegna la sezione a L del corrente intorno all'asse z-z. Si avrebbe quindi flessione deviata. Poiché però l'inflessione intorno a y-y è impedita dal collegamento tralicciato con l'angolare opposto, la flessione rimane retta.

esegue una semplice verifica di resistenza perché l'instabilità riguarda la mezzeria dei
correnti, dove il momento dovuto al taglio è nullo.

$$W_z = 12.6 \text{ cm}^3 \quad A = 12.3 \text{ cm}^2$$

Momento resistente $M_{c,Rd} = 12.6 \cdot 235/1.1 \cdot 10^{-3} = 2.691 \text{ kNm}$

Azione assiale resistente $N_{c,Rd} = 12.3 \cdot 235/1.1 \cdot 10^{-1} = 262.7 \text{ kN}$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{c,Rd}} = \frac{19.81}{262.7} + \frac{1.72}{2.691} = 0.075 + 0.639 = 0.714 < 1$$