

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni

Progetto di aste e collegamenti in acciaio

4 - Instabilità locale e profili sottili formati a freddo

Spoletto
8-10 novembre 2012
Aurelio Gheresi

Riferimenti

Normativa

- EN 1993-1-3, Eurocodice 3, parte 1-3:
Regole generali - Regole supplementari per l'impiego dei profilati e delle lamiere sottili piegati a freddo
- EN 1993-1-5, Eurocodice 3, parte 1-5:
Elementi strutturali a lastra

Testi

- A.C. Walker, *Design and Analysis of Cold-formed Sections*, London, Intertext books, 1975
- A. Ghersi, R. Landolfo, F.M. Mazzolani, *Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members*, Spon Press, London and New York, 2002
- V. Dipaola, G. Prete, F. Prete, *I profili formati a freddo nelle opere di carpenteria metallica*, Aracne editrice, 2010

Profili sottili formati a freddo

sottili → thin gauge (o thin-walled)
formati a freddo → cold-formed

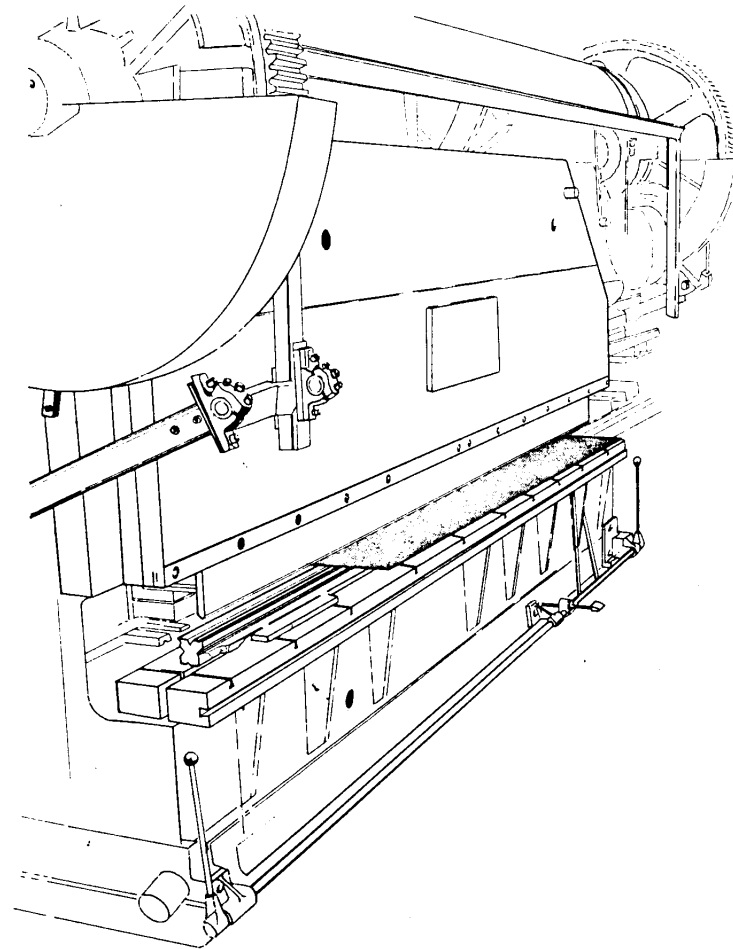
Procedimenti per ottenerli:

1. Stampaggio alla pressa
2. Laminazione a freddo

Come si realizzano

1. Stampaggio alla pressa

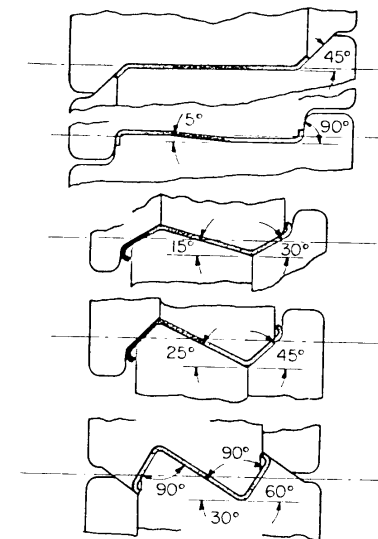
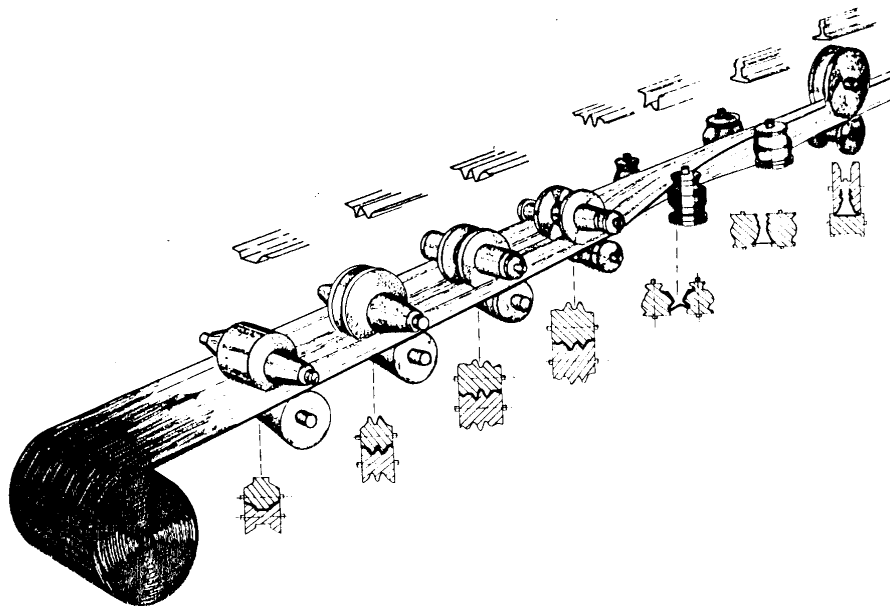
- Il nastro d'acciaio viene pressato, a singoli tratti, su uno stampo



Come si realizzano

2. Laminazione a freddo

- Il nastro d'acciaio viene deformato gradualmente facendolo passare attraverso coppie di rulli



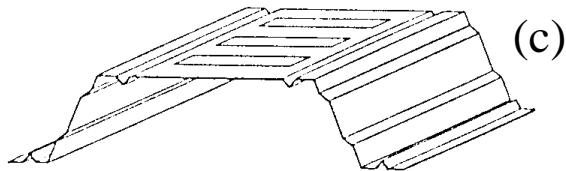
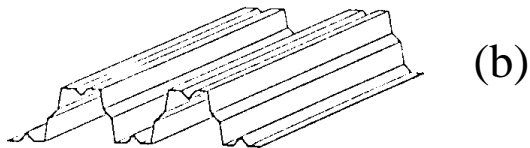
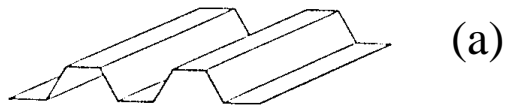
Come si realizzano

2. Laminazione a freddo

- Il nastro d'acciaio viene deformato gradualmente facendolo passare attraverso coppie di rulli
- Vantaggi della laminazione:
 - alta capacità produttiva
 - notevole precisione dimensionale
 - possibilità di sagomare lamiera verniciata o rivestita
- La convenienza economica del procedimento dipende soprattutto da:
 - complessità del profilo
 - quantità da produrre

Elementi prodotti mediante formatura a freddo

- lamiere grecate spessore t $0.5 \leq t \leq 4.0$ mm

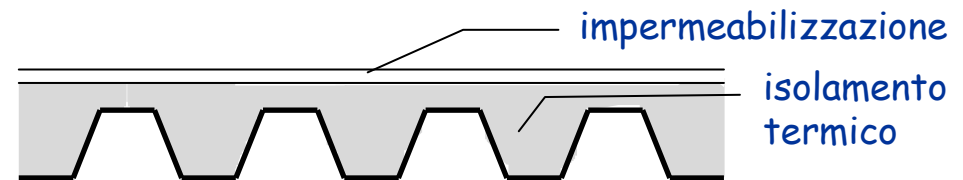


- massima luce per le tipologie usuali:
da 1.50 m a 3.00 m
- richiedono quindi travi secondarie (arcarecci)
- dimensioni della greca molto maggiori consentono di evitare le travi secondarie

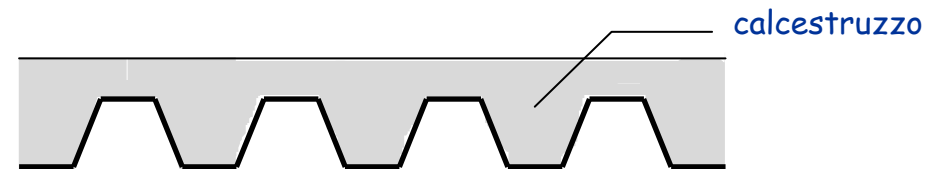
Elementi prodotti mediante formatura a freddo

- lamiere grecate spessore t $0.5 \leq t \leq 4.0$ mm

- usate per coperture non praticabili (in genere già predisposte con isolamento termico e impermeabilizzazione)

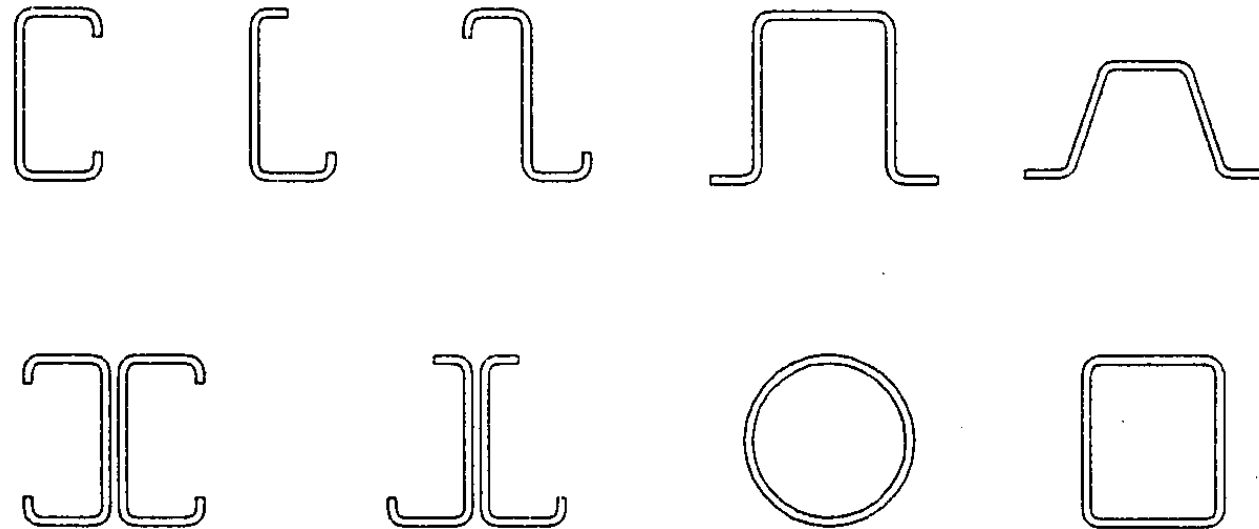


- oppure per solai praticabili (in genere con soletta in calcestruzzo, eventualmente armata con una rete)



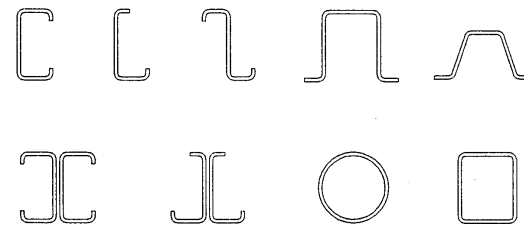
Elementi prodotti mediante formatura a freddo

- Elementi strutturali spessore t $1.0 \leq t \leq 8.0$ mm



Elementi prodotti mediante formatura a freddo

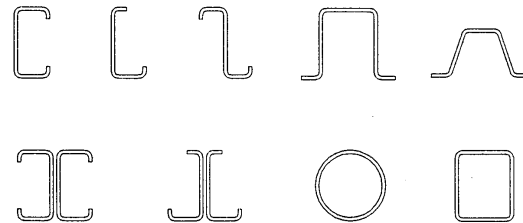
- Elementi strutturali spessore t $1.0 \leq t \leq 8.0$ mm



- Usati come:
 - elementi secondari (arcarecci) che sostengono la lamiera grecata di una copertura (di solito sezioni a C o a Z)
 - aste di travature reticolari (in particolare per luci non molto elevate, fino a 15 m)

Elementi prodotti mediante formatura a freddo

- Elementi strutturali spessore t $1.0 \leq t \leq 8.0$ mm



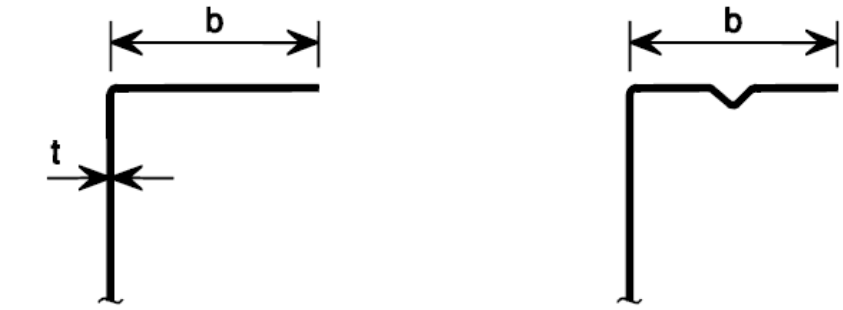
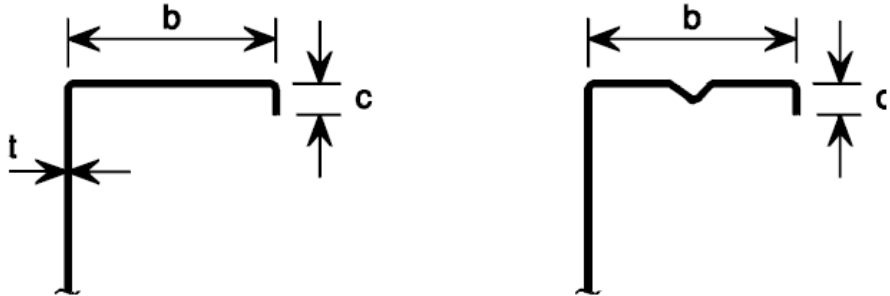
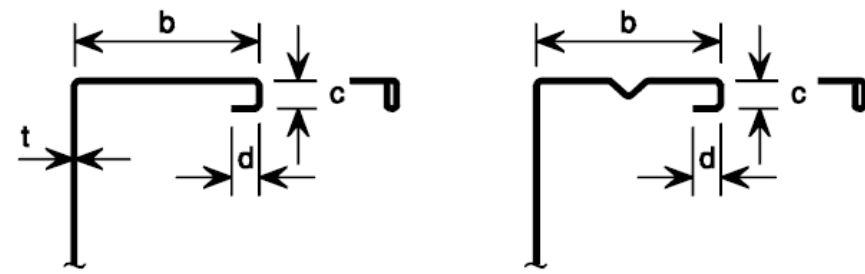
- Usati come:
 - travi principali (di solito sezioni a C accoppiate)
 - colonne (sezioni scatolari o anche sezioni a Ω accoppiate a formare uno scatolare)

Nota: aspetto critico per l'utilizzazione come travi e colonne in zona sismica è la duttilità

Limiti negli spessori

elemento della sezione

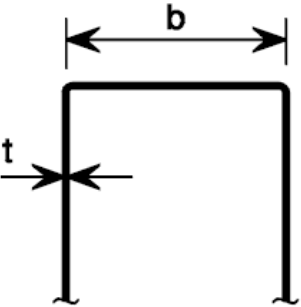
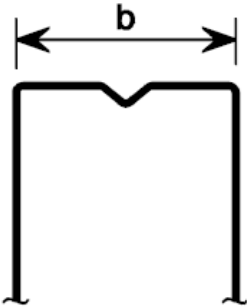
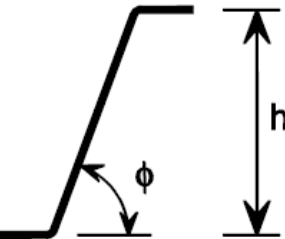
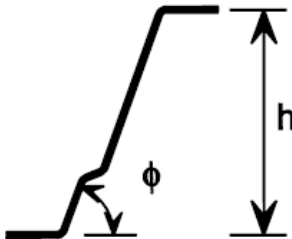
limite

| | |
|--|---|
|  | $b/t \leq 50$ |
|  | $b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$ |
|  | $b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$ |

Limiti negli spessori

elemento della sezione

limite

| | | |
|--|--|--|
|  |  | $b/t \leq 500$ |
|  |  | $45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$ |

Effetti della piegatura

- Riduzione dello spessore nelle zone piegate



Si può considerare localmente uno spessore ridotto

- Tensioni residue di tipo flessionale (variabili nello spessore)



Possono influire sull'instabilità locale

- Incrudimento dell'acciaio nelle zone piegate (con contemporanea riduzione della duttilità)



Distinzione tra tensione del materiale base e tensione media

Riduzione dello spessore

La piegatura produce una riduzione dello spessore nelle zone di piega (raccordi circolari)

- L'Eurocodice non fornisce indicazioni specifiche
- La normativa inglese suggeriva di usare uno spessore ridotto t_{rid}

$$t_{rid} = \left(\frac{r + k t}{r + 0.5 t} \right) t$$

con

r raggio interno di curvatura
 $k=0.35$ per $r \geq 1.5 t$

esempio

$t=4.0$ mm $r=6.0$ mm
 $k=0.35$

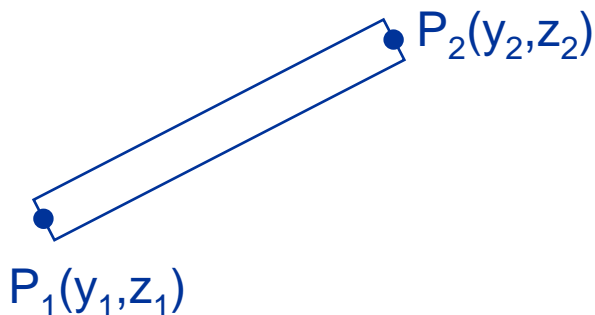
$$t_{rid} = \left(\frac{6.0 + 0.35 \times 4.0}{6.0 + 0.5 \times 4.0} \right) \times 4.0 = 3.7 \text{ mm}$$

Valutazione delle caratteristiche geometriche della sezione

Procedimento rigoroso

- Considerare l'effettivo sviluppo, con tratti rettilinei e raccordi circolari, ciascuno col suo spessore (eventualmente ridotto nei raccordi)

Elemento rettilineo



t spessore

$$y_G = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

$$z_G = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

$$A = lt$$

$$I_y = \frac{A}{12} \left[(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \frac{t^2}{l^2} \right]$$

$$I_z = \frac{A}{12} \left[(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \frac{t^2}{l^2} \right]$$

con

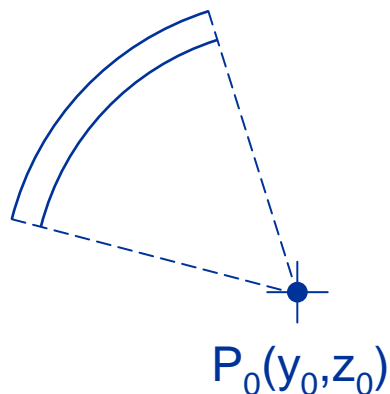
$$l = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Valutazione delle caratteristiche geometriche della sezione

Procedimento rigoroso

- Considerare l'effettivo sviluppo, con tratti rettilinei e raccordi circolari, ciascuno col suo spessore (eventualmente ridotto nei raccordi)

Raccordo circolare



t spessore
 r_m raggio medio
 α_1, α_2 angoli

$$A = (\alpha_2 - \alpha_1) r_m t$$

$$y_G = (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \left(r_m^2 + \frac{t^2}{12} \right) \frac{t}{A} + y_0$$

$$z_G = (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \left(r_m^2 + \frac{t^2}{12} \right) \frac{t}{A} + z_0$$

$$I_y = \left[\alpha_2 - \alpha_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \right] (4r_m^2 + t^2) \frac{r_m t}{8} - A (z_G - z_0)^2$$

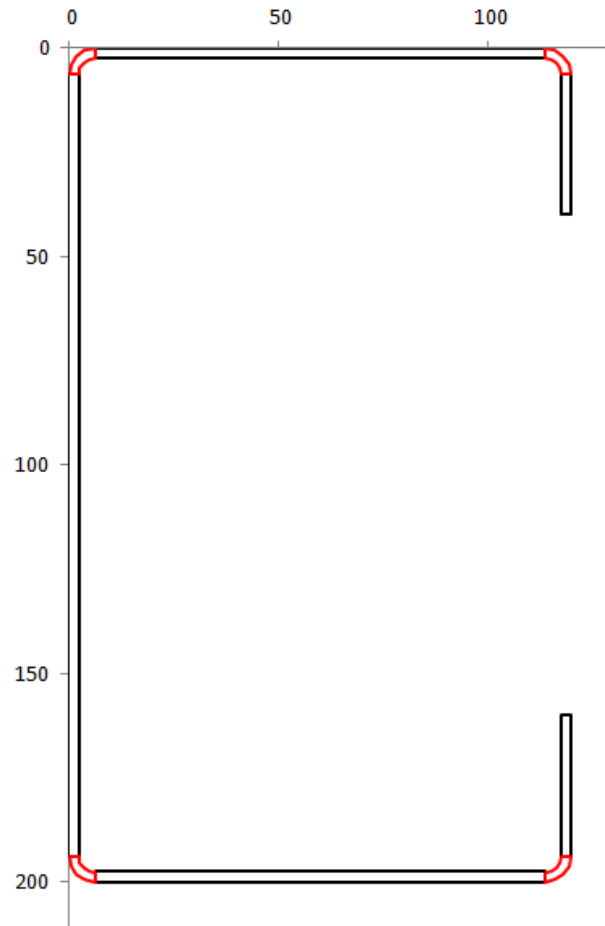
$$I_z = \left[\alpha_2 - \alpha_1 + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \right] (4r_m^2 + t^2) \frac{r_m t}{8} - A (y_G - y_0)^2$$

Esempio - sezione C 200x120x2.5

| Caratteristiche geometriche di una sezione costituita da rettangoli e raccordi | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--|----------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--|
| | | | | yG | 45.9 | mm | A | Sy | Sz | | | | |
| | | | | zG | 100.0 | mm | 1247.6 | 124765 | 57234 | | lyG | lzG | |
| | | | | | | | mm2 | mm3 | mm3 | | 8311935 | 2705494 | |
| | | | | | | | | | | | mm4 | mm4 | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Rettangoli | | Dati | | Area, momenti del primo e secondo ordine | | | | | | | | | |
| elemento | y1 | y2 | t | yG | I | A | Sy | Sz | ly | lz | lyG | lzG | |
| | z1 | z2 | | zG | | | | | | | | | |
| 1 | 118.75 | 118.75 | 2.5 | 118.75 | 33.8 | 84.4 | 1951 | 10020 | 8009 | 44 | 506646 | 448159 | |
| | 6.25 | 40 | | 23.13 | | | | | | | | | |
| 2 | 6.25 | 113.75 | 2.5 | 60.00 | 107.5 | 268.8 | 336 | 16125 | 140 | 258812 | 2620872 | 312444 | |
| | 1.25 | 1.25 | | 1.25 | | | | | | | | | |
| 3 | 1.25 | 1.25 | 2.5 | 1.25 | 187.5 | 468.8 | 46875 | 586 | 1373291 | 244 | 1373291 | 933643 | |
| | 6.25 | 193.75 | | 100.00 | | | | | | | | | |
| 4 | 6.25 | 113.75 | 2.5 | 60.00 | 107.5 | 268.8 | 53414 | 16125 | 140 | 258812 | 2620872 | 312444 | |
| | 198.75 | 198.75 | | 198.75 | | | | | | | | | |
| 5 | 118.75 | 118.75 | 2.5 | 118.75 | 33.8 | 84.4 | 14924 | 10020 | 8009 | 44 | 506646 | 448159 | |
| | 193.75 | 160 | | 176.88 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Raccordi circolari | | Dati | | Area, momenti del primo e secondo ordine | | | | | | | | | |
| elemento | y0 | α1 [°] | t | yG | α1 [rad] | A | Sy | Sz | ly | lz | lyG | lzG | |
| | z0 | α2 [°] | rm | zG | α2 [rad] | | | | | | | | |
| 1 | 113.75 | 0 | 2.3125 | 116.99 | 0.00 | 18.2 | 55 | 2125 | 49 | 49 | 170902 | 91905 | |
| | 6.25 | 90 | 5 | 3.01 | 1.57 | | | | | | | | |
| 2 | 6.25 | 90 | 2.3125 | 3.01 | 1.57 | 18.2 | 55 | 55 | 49 | 49 | 170902 | 33417 | |
| | 6.25 | 180 | 5 | 3.01 | 3.14 | | | | | | | | |
| 3 | 6.25 | 180 | 2.3125 | 3.01 | 3.14 | 18.2 | 3578 | 55 | 49 | 49 | 170902 | 33417 | |
| | 193.75 | 270 | 5 | 196.99 | 4.71 | | | | | | | | |
| 4 | 113.75 | 270 | 2.3125 | 116.99 | 4.71 | 18.2 | 3578 | 2125 | 49 | 49 | 170902 | 91905 | |
| | 193.75 | 360 | 5 | 196.99 | 6.28 | | | | | | | | |

Vedi file Instabilità locale, foglio GeomSez

Esempio - sezione C 200x120x2.5

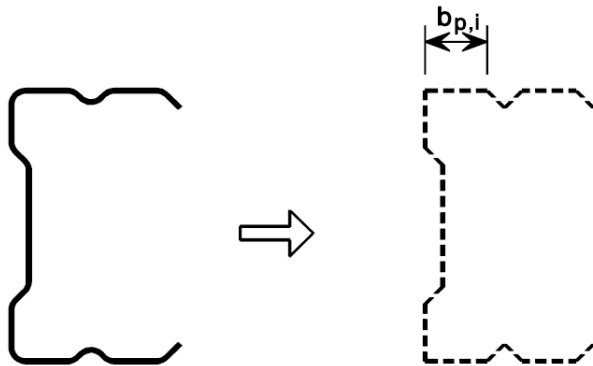


Vedi file Instabilità locale, foglio Sezione

Valutazione delle caratteristiche geometriche della sezione

Alternativa 1 (Eurocodice 8)

- Considerare la sezione idealizzata ottenuta da quella curvilinea eliminando i raccordi e sostituendoli con spigoli vivi, valutarne le proprietà ($A_{g,sh}$ $I_{g,sh}$) e poi ridurre i valori così trovati



$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}}$$

$$A_g \approx A_{g,sh} (1 - \delta)$$

$$I_g \approx I_{g,sh} (1 - 2\delta)$$

r raggio interno
 ϕ angolo tra gli elementi

Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.1

Valutazione delle caratteristiche geometriche della sezione

Alternativa 1 (Eurocodice 8)

- Considerare la sezione idealizzata ottenuta da quella curvilinea eliminando i raccordi e sostituendoli con spigoli vivi, valutarne le proprietà e poi ridurre i valori così trovati

Alternativa 2

- Considerare la sezione curvilinea costituita dalla linea media, valutarne le proprietà e poi moltiplicarle per lo spessore (assunto unico per tutti i tratti)

Acciaio

tensioni di riferimento

- La normativa europea (Eurocodice 3, parte 1-3) distingue:
 - f_{yb} tensione di snervamento del materiale base
 - f_{ya} tensione media di snervamento
- La distinzione nasce dal fatto che il processo di piegatura produce un incrudimento nelle zone piegate

Acciaio

tensioni di riferimento

- Tensione media di snervamento

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{k n t^2}{A_g} \quad \text{ma} \quad f_{ya} \leq \frac{f_u + f_{yb}}{2}$$

con

k coefficiente funzione del tipo di processo di piegatura

k=7 per piegatura in continuo

k=5 per altri tipi di piegatura

n numero degli angoli a 90° presenti nella sezione aventi un raggio di curvatura minore di 5 t

t spessore della lamiera prima della formatura (mm)

A_g area geometrica della sezione trasversale

Acciaio

tensioni di riferimento - esempio

- Tensione media di snervamento

profilo a C con irrigidimenti (200x120x2.5)

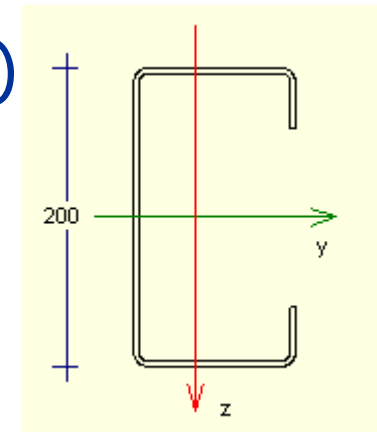
$k=5$

$n=4$

$t=2.5 \text{ mm}$

$A_g=1247.6 \text{ mm}^2$

Acciaio S235 ($f_{yb}=235 \text{ MPa}$, $f_u=360 \text{ MPa}$)



$$f_{ya} = 235 + (360 - 235) \frac{5 \times 4 \times 2.5^2}{1247.6} = 247.52 \text{ MPa}$$

Acciaio

tensioni di riferimento

- La tensione media di snervamento si può usare quando la sezione non risente di problemi di instabilità locale:
 - aste tese
 - aste compresse, ma con sezione tutta efficace
 - aste inflesse, ma con ali tutte efficaci

Nota: il concetto di "sezione efficace", legato all'instabilità locale, sarà esposto più avanti

- Altrimenti si usa la tensione di snervamento del materiale base

Problemi specifici dei profili sottili

- instabilità locale
 - si manifesta con ondulazioni delle parti della sezione soggette a compressione, con lunghezza d'onda dello stesso ordine di grandezza della larghezza della parte instabilizzata
 - limita la resistenza e la duttilità e riduce la rigidezza dell'asta
 - i suoi effetti possono cumularsi a quelli dell'instabilità globale

Problemi specifici dei profili sottili

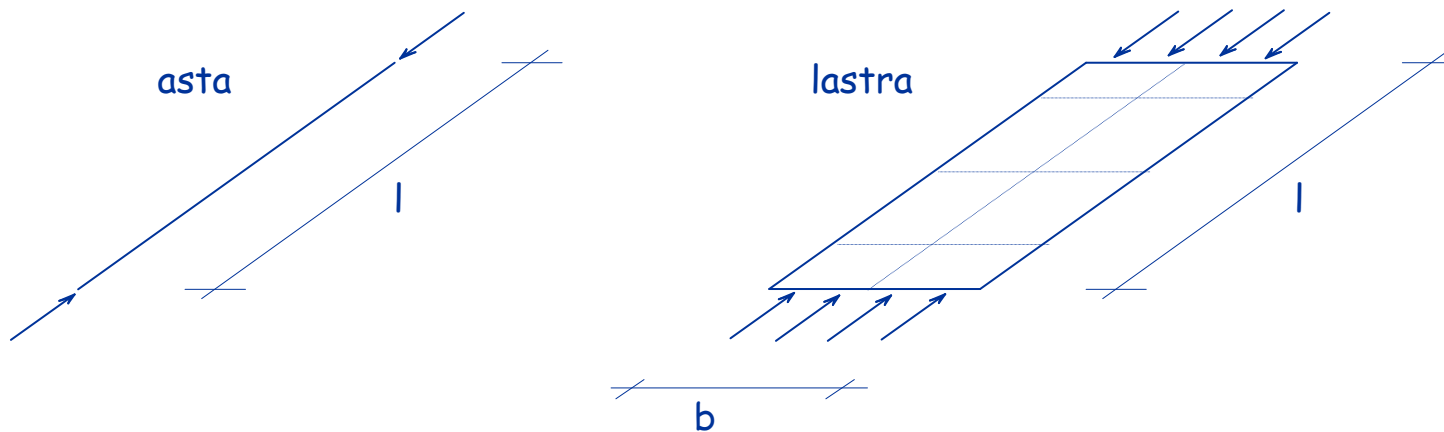
- bassa rigidezza torsionale
 - è dovuta alla piccolezza dello spessore ed alla forma quasi sempre aperta della sezione
 - in molti casi il comportamento è ulteriormente peggiorato dalla mancanza di assi di simmetria
- ridotta resistenza al rifollamento nei collegamenti bullonati
 - porta problemi alla progettazione dei giunti, che possono essere condizionanti nel progetto della membratura
- sensibilità alla corrosione
 - superabile con opportuno trattamento della superficie (zincatura, ecc.)

Instabilità locale

Instabilità di un'asta o una lastra compressa

asta elemento monodimensionale
vincolata agli estremi in modo da consentire
spostamenti solo nella direzione del carico

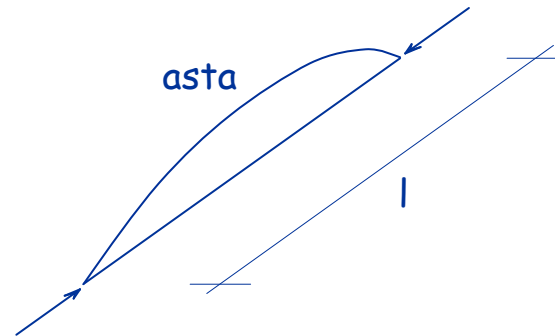
lastra elemento bidimensionale
vincolata lungo i bordi in modo da consentire
spostamenti solo nella direzione del carico



Carico critico di un'asta compressa

asta ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

- la deformata critica
è un'unica onda, con
semi-lunghezza
d'onda pari alla
lunghezza dell'asta l



Carico critico di un'asta compressa

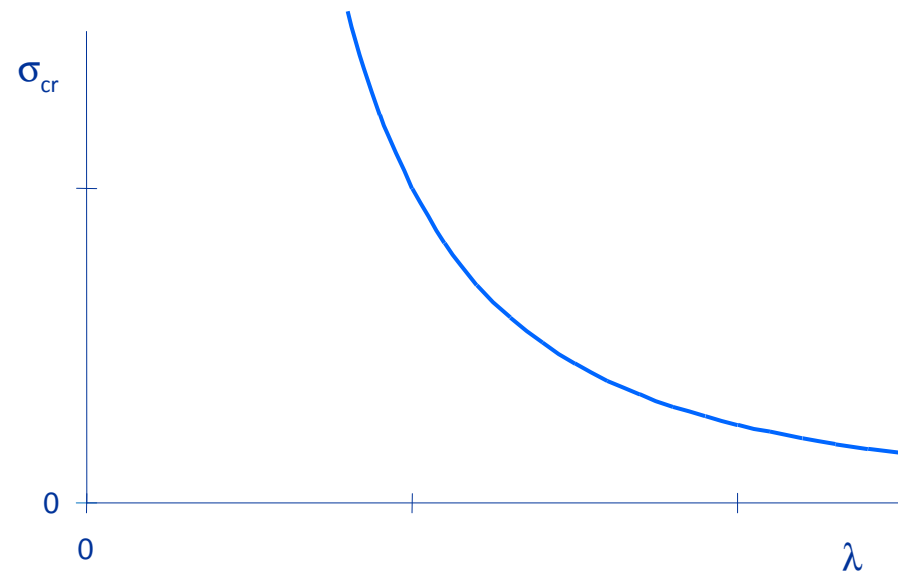
asta ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

La teoria, sviluppata da Eulero, fornisce

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2 A} = \frac{\pi^2 E}{(l/i)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

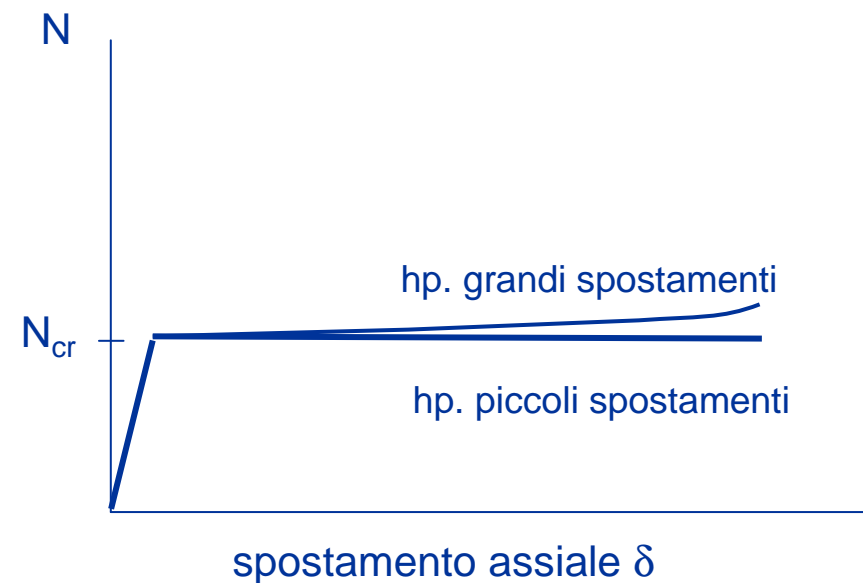
$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \lambda = \frac{l}{i}$$



Comportamento post-critico di un'asta compressa

asta ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

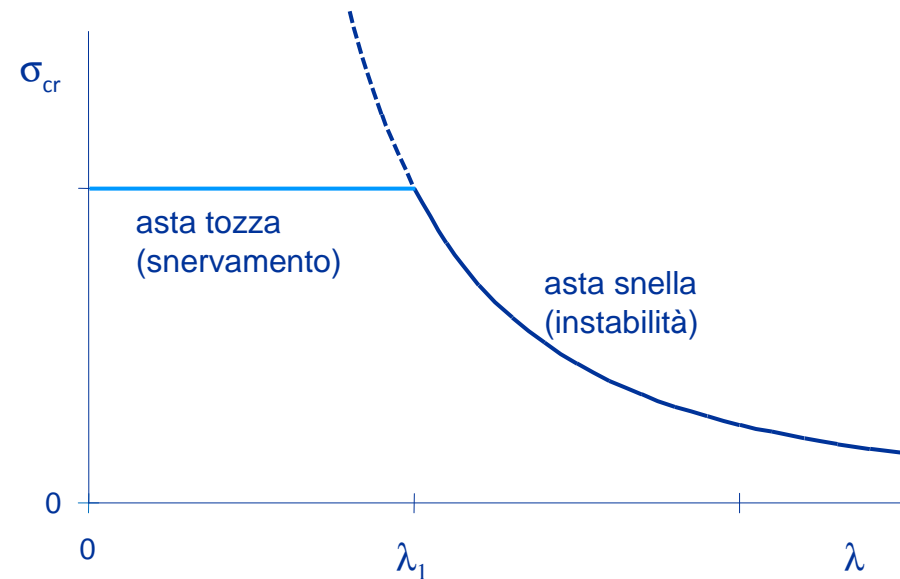
- quando si raggiunge il carico critico si hanno spostamenti trasversali molto grandi per piccolissimi incrementi di carico
- in pratica il carico non può aumentare ulteriormente e la rigidezza assiale si può considerare nulla



Carico critico di un'asta compressa

asta perfetta ma di materiale elastico-
perfettamente plastico

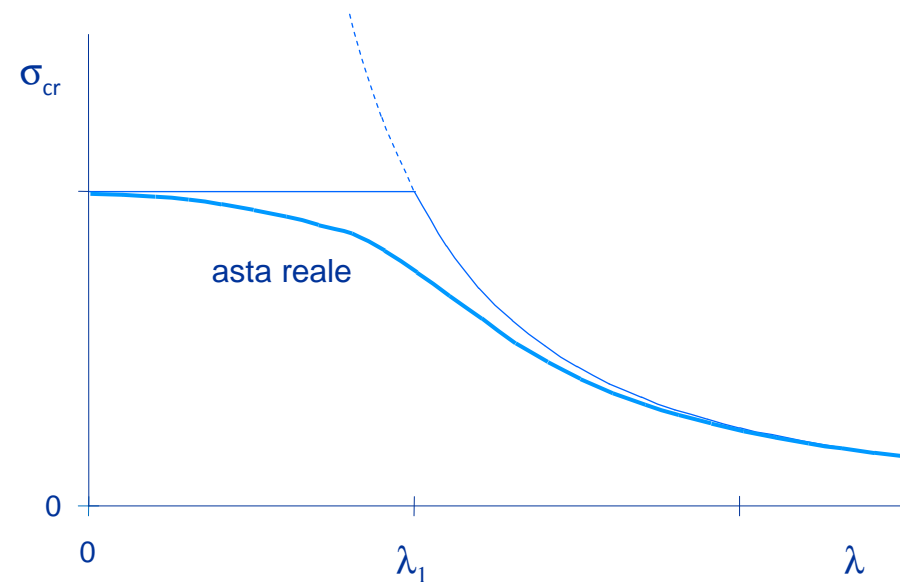
- la tensione critica non può superare la tensione di snervamento
- **aste tozze**: si snervano prima di instabilizzarsi
aste snelle: si instabilizzano in campo elastico
- il limite è costituito dalla snellezza λ_1 che corrisponde alla tensione di snervamento $\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$



Carico critico di un'asta compressa

asta reale con imperfezioni e costituita da materiale elastico-perfettamente plastico

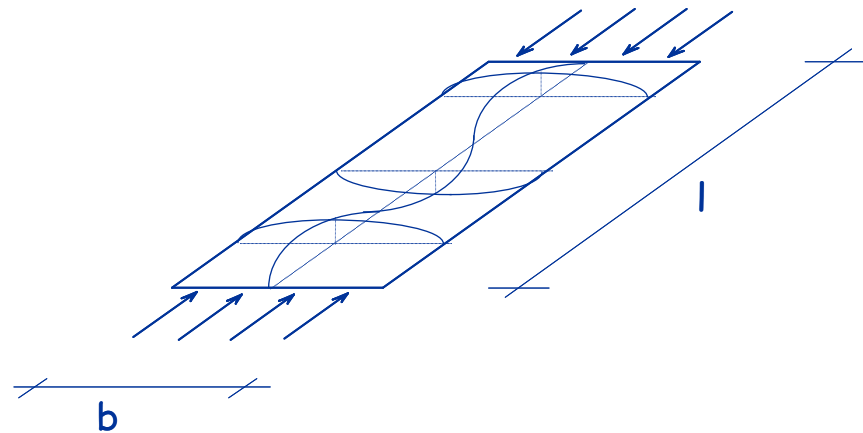
- la tensione critica è minore di quella che si avrebbe nel caso di asta perfetta
- il comportamento post-critico è comunque analogo a quello dell'asta perfetta



Carico critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da materiale linearmente elastico

- le ondulazioni che si formano hanno una lunghezza d'onda comparabile con la larghezza b



Carico critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

- tenendo conto che

$$A = b t \qquad I = \frac{b t^3}{12}$$

si ha

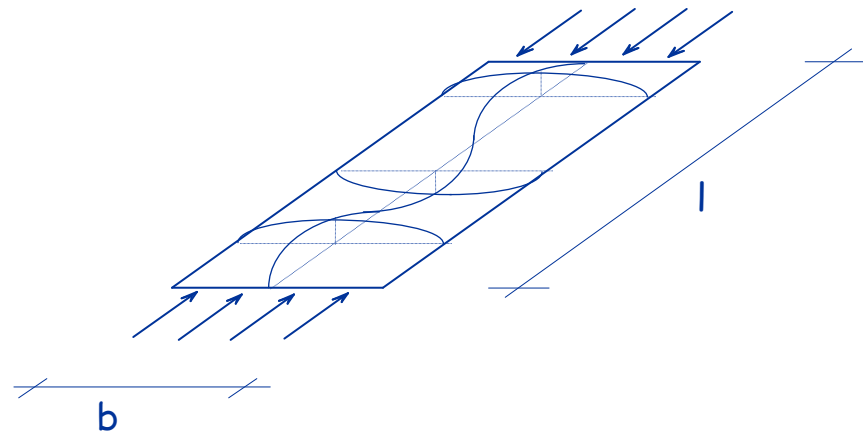
$$N_{cr} = \frac{k \pi^2 E I}{(1 - \nu^2) b^2} = \frac{k \pi^2 E t^3}{12 (1 - \nu^2) b}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) (b/t)^2}$$

$$k = \left(\frac{l}{m b} \right)^2 + 2 + \left(\frac{m b}{l} \right)^2$$

m = numero di
semi-onde

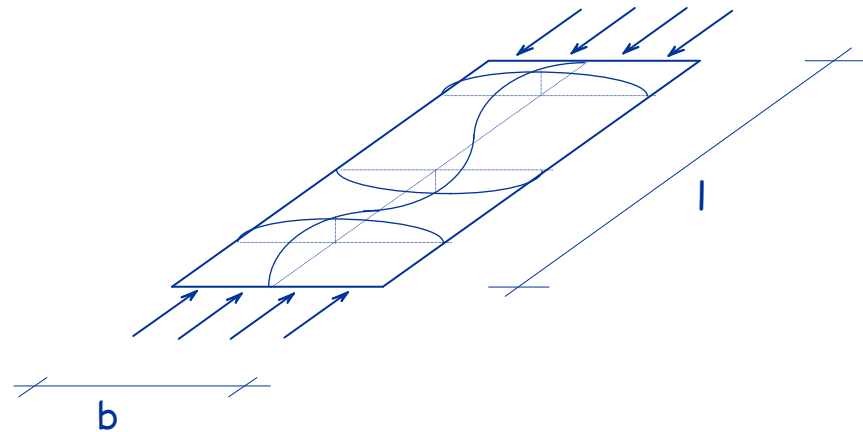
per $l > 4 b$ $k \rightarrow 4$



Comportamento post-critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

- quando si raggiunge il carico critico lo sbandamento fuori piano causa l'allungamento delle fibre trasversali, che tendono quindi a limitarlo grazie alla loro rigidità estensionale

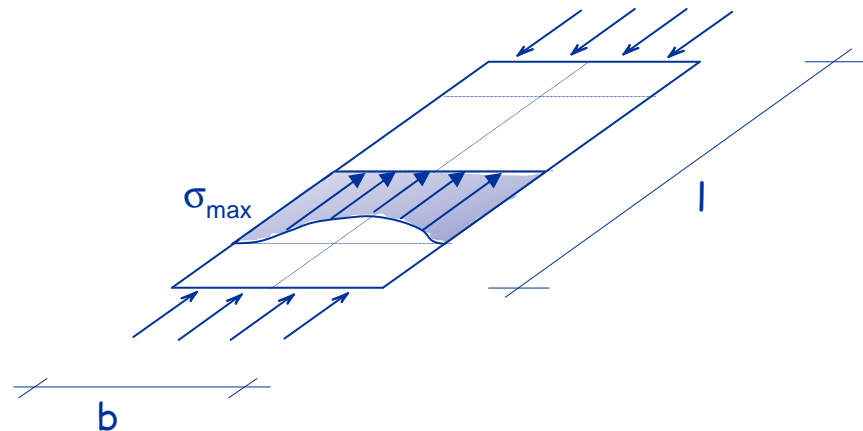


- per questo motivo:
 - è possibile aumentare ulteriormente il carico

Comportamento post-critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da materiale linearmente elastico

- per $N > N_{cr}$
 - le fibre longitudinali più vicine al bordo, più vincolate, sono più rigide di quelle centrali e portano un carico maggiore
 - il diagramma delle tensioni in mezzeria non è uniforme, ma ha un valore massimo in prossimità dei bordi e minimo al centro



$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}} \cong \frac{N}{N_{cr}} + 2.83 \left(\frac{N}{N_{cr}} - 1 \right) + 0.52 \left(\frac{N}{N_{cr}} - 1 \right)^2$$

Tensione massima (σ_{max}) rispetto a quella critica (σ_{cr}) calcolata in funzione di N (diviso N_{cr})

| σ_{max}/σ_{cr} | N/N_{cr} | $\Delta N/\Delta s$ | |
|----------------------------|------------|---------------------|--|
| 0.0000 | 0.00 | | |
| 1.0000 | 1.00 | 1.00 | |
| 1.1928 | 1.05 | 0.26 | |
| 1.3882 | 1.10 | 0.26 | |
| 1.5862 | 1.15 | 0.25 | |
| 1.7868 | 1.20 | 0.25 | |
| 1.9900 | 1.25 | 0.25 | |
| 2.1958 | 1.30 | 0.24 | |
| 2.4042 | 1.35 | 0.24 | |
| 2.6152 | 1.40 | 0.24 | |
| 2.8288 | 1.45 | 0.23 | |
| 3.0450 | 1.50 | 0.23 | |
| 3.2638 | 1.55 | 0.23 | |
| 3.4852 | 1.60 | 0.23 | |
| 3.7092 | 1.65 | 0.22 | |
| 3.9358 | 1.70 | 0.22 | |
| 4.1650 | 1.75 | 0.22 | |
| 4.3968 | 1.80 | 0.22 | |
| 4.6312 | 1.85 | 0.21 | |
| 4.8682 | 1.90 | 0.21 | |
| 5.1078 | 1.95 | 0.21 | |
| 5.3500 | 2.00 | 0.21 | |
| 5.5948 | 2.05 | 0.20 | |
| 5.8422 | 2.10 | 0.20 | |
| 6.0922 | 2.15 | 0.20 | |
| 6.3448 | 2.20 | 0.20 | |
| 6.6000 | 2.25 | 0.20 | |
| 6.8578 | 2.30 | 0.19 | |
| 7.1182 | 2.35 | 0.19 | |
| 7.3812 | 2.40 | 0.19 | |
| 7.6468 | 2.45 | 0.19 | |

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}} \cong \frac{N}{N_{cr}} + 2.83 \left(\frac{N}{N_{cr}} - 1 \right) + 0.52 \left(\frac{N}{N_{cr}} - 1 \right)^2$$

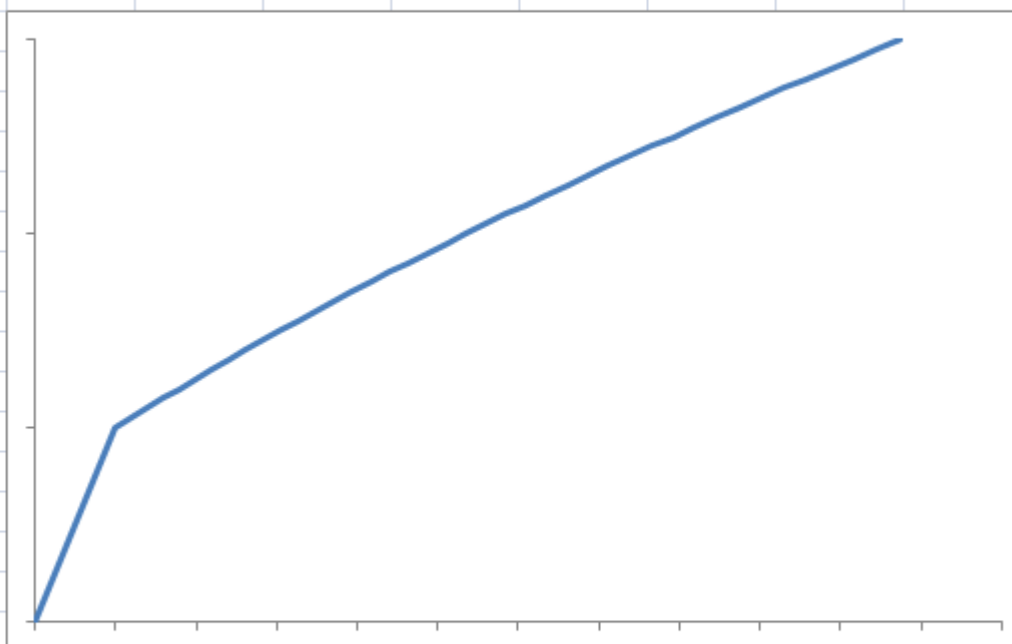


Diagramma di N/N_{cr} in funzione di σ_{max}/σ_{cr}

Si può ritenere che l'accorciamento ϵ_{ps} max sia proporzionale a σ_{max} quindi il diagramma mostra anche N in funzione di ϵ_{ps}

Si nota la brusca riduzione di rigidezza dopo N_{cr}

Il tratto post critico non è esattamente lineare (ma quasi)

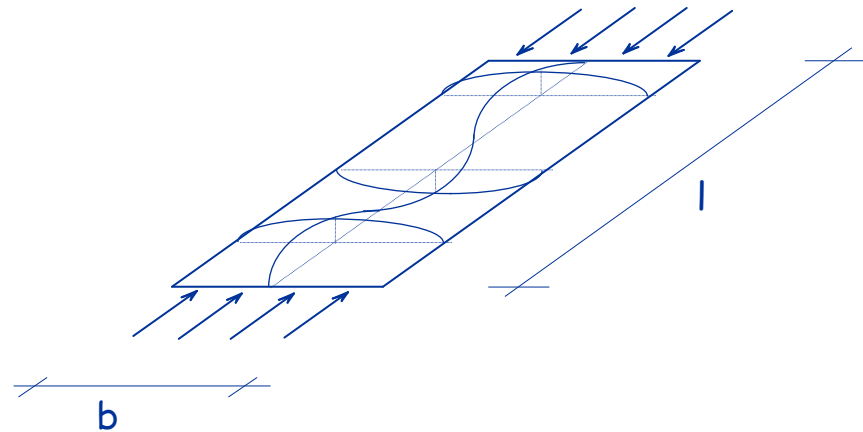
la pendenza (rigidezza) post-critica è qui circa il 20% di quella elastica

Vedi file Instabilità locale, foglio s max

Comportamento post-critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da materiale linearmente elastico

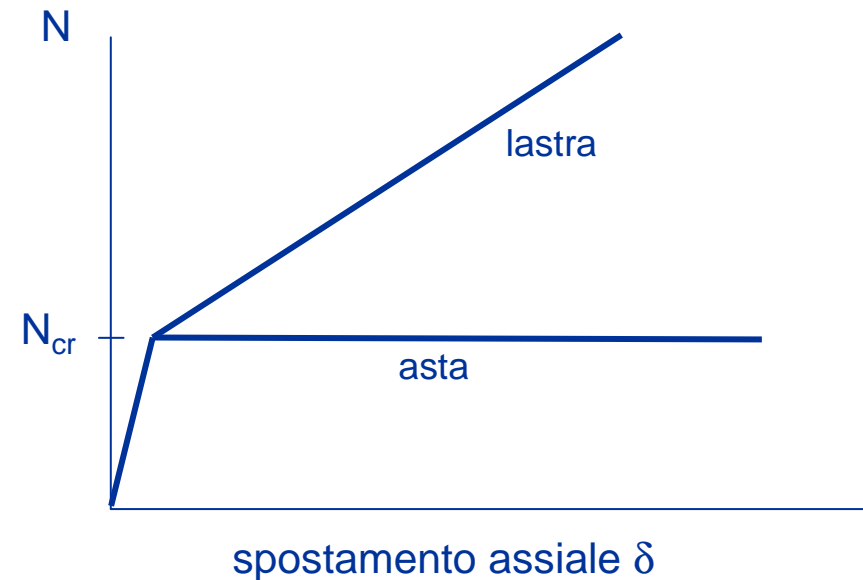
- quando si raggiunge il carico critico lo sbandamento fuori piano causa l'allungamento delle fibre trasversali, che tendono quindi a limitarlo grazie alla loro rigidità estensionale
- per questo motivo:
 - è possibile aumentare ulteriormente il carico
 - la rigidità assiale della lastra si riduce (fino al 40% del valore iniziale) ma non si annulla



Comportamento post-critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da materiale linearmente elastico

- quando si raggiunge il carico critico lo sbandamento fuori piano causa l'allungamento delle fibre trasversali, che tendono quindi a limitarlo grazie alla loro rigidezza estensionale



- per questo motivo:
 - è possibile aumentare ulteriormente il carico
 - la rigidezza assiale della lastra si riduce (fino al 40% del valore iniziale) ma non si annulla

Carico massimo di una lastra compressa

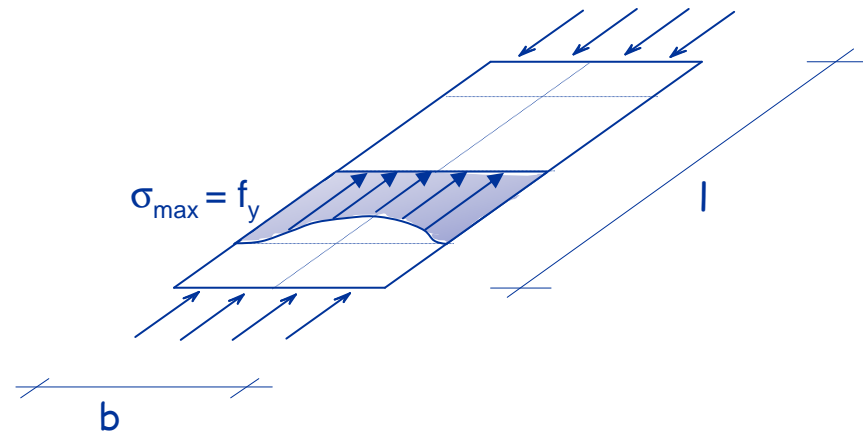
lastra perfetta ma di materiale elastico-
perfettamente plastico

- il carico massimo
corrisponde al
raggiungimento della
tensione di snervamento
nella fibra più sollecitata

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{cr}} \cong \frac{N}{N_{cr}} + 2.83 \left(\frac{N}{N_{cr}} - 1 \right) + 0.52 \left(\frac{N}{N_{cr}} - 1 \right)^2$$



$$\frac{N_{ult}}{N_y} = 0.36 + 0.83 \frac{N_{cr}}{N_y} - 0.19 \frac{(N_{ult}/N_y)^2}{N_{cr}/N_y}$$



$$\frac{N_{ult}}{N_y} = \frac{N_{cr}}{N_y} \left[-2.683 + \sqrt{11.639 + \frac{1.923}{N_{cr}/N_y}} \right]$$

Nult/Ny in funzione di Ncr/Ny

| Ncr/Ny | Nu/Ny | err | Nu/Ny |
|--------|-------|---------|-------|
| 0.00 | 0.000 | | 0.000 |
| 0.005 | 0.086 | 0.0000 | 0.086 |
| 0.01 | 0.116 | -0.0008 | 0.116 |
| 0.02 | 0.153 | -0.0001 | 0.154 |
| 0.05 | 0.219 | 0.0000 | 0.220 |
| 0.10 | 0.287 | -0.0004 | 0.287 |
| 0.15 | 0.339 | -0.0002 | 0.339 |
| 0.20 | 0.385 | -0.0002 | 0.385 |
| 0.25 | 0.428 | 0.0010 | 0.428 |
| 0.30 | 0.469 | 0.0000 | 0.470 |
| 0.35 | 0.510 | -0.0002 | 0.510 |
| 0.40 | 0.549 | 0.0000 | 0.549 |
| 0.45 | 0.588 | 0.0001 | 0.588 |
| 0.50 | 0.626 | -0.0001 | 0.626 |
| 0.55 | 0.664 | -0.0001 | 0.664 |
| 0.60 | 0.702 | 0.0000 | 0.702 |
| 0.65 | 0.740 | -0.0003 | 0.739 |
| 0.70 | 0.777 | 0.0000 | 0.777 |
| 0.75 | 0.815 | -0.0010 | 0.814 |
| 0.80 | 0.852 | 0.0000 | 0.851 |
| 0.85 | 0.889 | 0.0001 | 0.889 |
| 0.90 | 0.926 | -0.0002 | 0.926 |
| 0.95 | 0.963 | 0.0000 | 0.963 |
| 1.00 | 1.000 | 0.0000 | 1.000 |

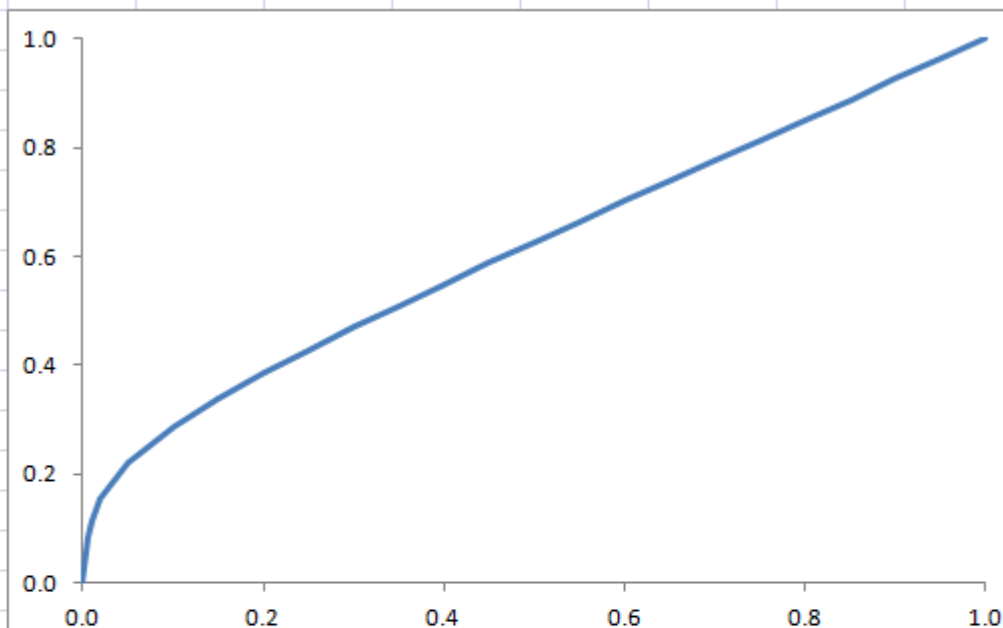


Diagramma di Nult/Ny in funzione di Ncr/Ny

$$\frac{N_{ult}}{N_y} = \frac{N_{cr}}{N_y} \left[-2.683 + \sqrt{11.639 + \frac{1.923}{N_{cr}/N_y}} \right]$$

$$\frac{N_{ult}}{N_y} = 0.36 + 0.83 \frac{N_{cr}}{N_y} - 0.19 \frac{(N_{ult}/N_y)^2}{N_{cr}/N_y}$$

Vedi file Instabilità locale, foglio N ult

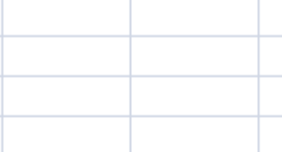
Esempio

| Determinazione di Ncr e Nult | | |
|----------------------------------|--------|-----|
| b | 200 | mm |
| l | 950 | mm |
| t | 2.5 | mm |
| E | 210000 | MPa |
| v | 0.3 | |
| fy | 235 | MPa |
| l/b | 4.75 | |
| b/t | 80.00 | |
| m | 5 | |
| k | 4.011 | |
| σ _{cr} | 118.9 | |
| N _{cr} | 59.5 | kN |
| N _y | 117.5 | kN |
| N _{cr} /N _y | 0.506 | |
| N _{ult} /N _y | 0.631 | |
| N _{ult} | 74.1 | kN |

$$k = \left(\frac{l}{m b} \right)^2 + 2 + \left(\frac{m b}{l} \right)^2$$

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) (b/t)^2}$$

$$\frac{N_{ult}}{N_y} = \frac{N_{cr}}{N_y} \left[-2.683 + \sqrt{11.639 + \frac{1.923}{N_{cr}/N_y}} \right]$$

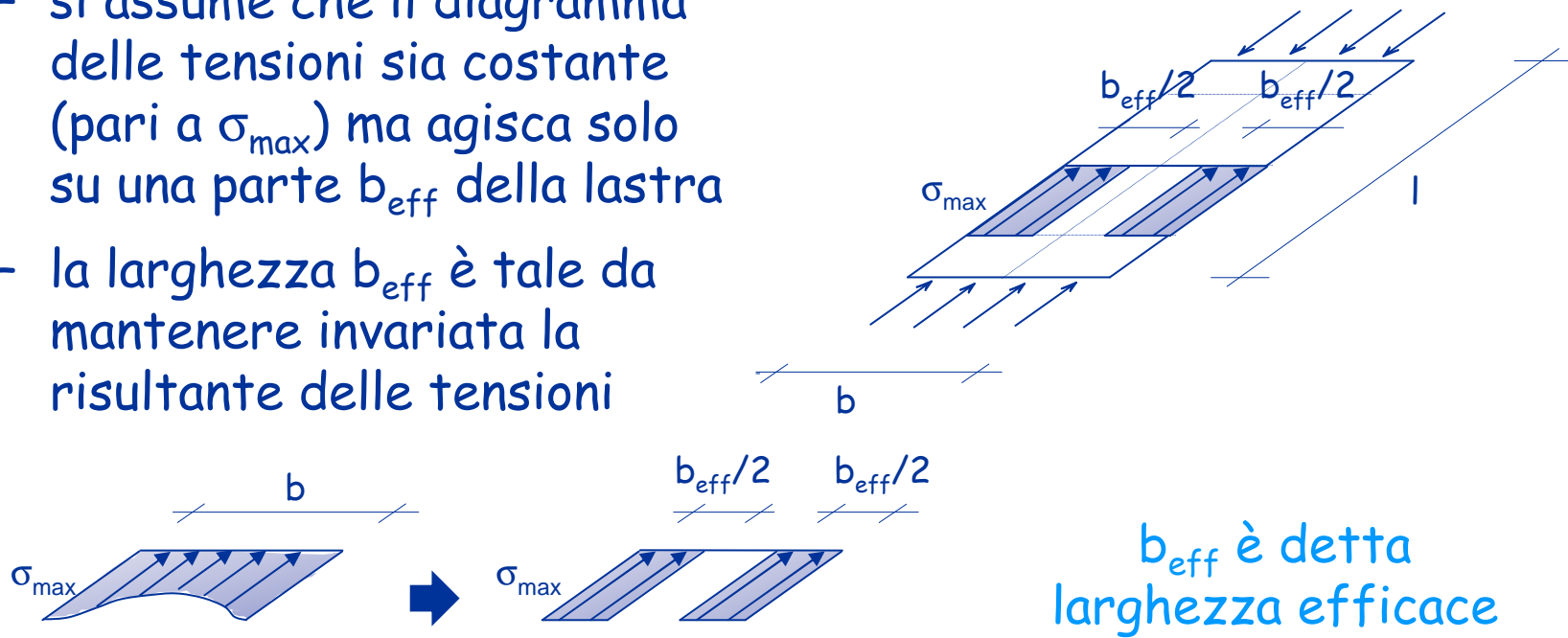


Vedi file Instabilità locale, foglio esempio

Comportamento post-critico di una lastra compressa

Approccio semplificato: Von Karman, 1932

- per $N > N_{cr}$
 - si assume che il diagramma delle tensioni sia costante (pari a σ_{max}) ma agisca solo su una parte b_{eff} della lastra
 - la larghezza b_{eff} è tale da mantenere invariata la risultante delle tensioni



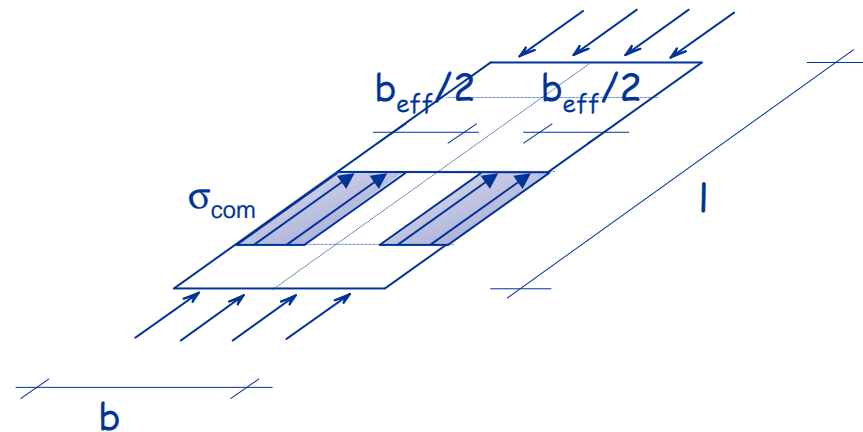
Comportamento post-critico di una lastra compressa

Approccio semplificato: Von Karman, 1932
(asta perfetta)

- la larghezza efficace potrebbe essere calcolata dalle espressioni mostrate in precedenza

es. per $N=N_{ult}$ $\frac{b_{eff}}{b} = \frac{N_{ult}}{N_y}$

- ma si preferisce assumere che, per un dato σ_{com} , b_{eff} sia la larghezza per la quale questa tensione è critica



$$\sigma_{com} = \sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) (b_{eff}/t)^2} \quad \rightarrow \quad b_{eff}$$

Comportamento post-critico di una lastra compressa

Approccio semplificato: Von Karman, 1932 - EC3
(asta perfetta)

$$\sigma_{com} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2) (b_{eff}/t)^2}$$



$$\sigma_{com} = \frac{k \pi^2 E (b/b_{eff})^2}{12 (1 - \nu^2) (b/t)^2}$$



$$\frac{b}{b_{eff}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12 (1 - \nu^2) \sigma_{com}}{k \pi^2 E}}$$

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p}$$



$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k}}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$



$$\bar{\lambda}_p \quad (\text{per } \sigma_{com} = f_y)$$

Si noti che è anche $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$

Comportamento post-critico di una lastra compressa

Approccio semplificato: Von Karman, 1932 - EC3

lastra perfetta:

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p}$$

L'espressione viene
generalizzata
nell'Eurocodice 3
per tener conto di vincoli
differenti e distribuzioni
di tensioni non uniformi

Eurocodice 3, parte 1-5, punto 4.4

lastra reale, con imperfezioni:

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.22}{\bar{\lambda}_p^2}$$

– internal compression elements:

$$\rho = 1,0$$

for $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$$

for $\bar{\lambda}_p > 0,673$, where $(3 + \psi) \geq 0$

– outstand compression elements:

$$\rho = 1,0$$

for $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$$

for $\bar{\lambda}_p > 0,748$

Indicazioni di normativa

Eurocodice 3, parte 1-5, punto 4.4

Table 4.1: Internal compression elements

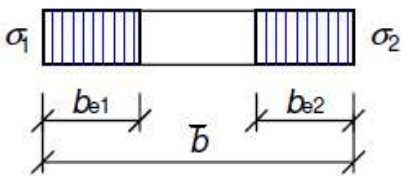
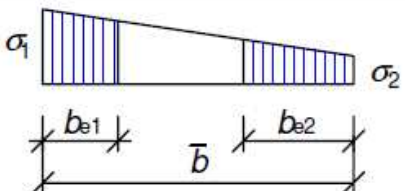
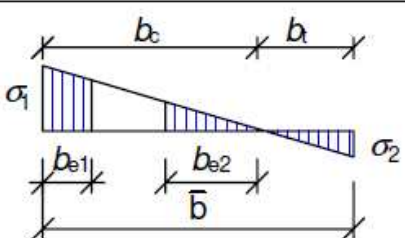
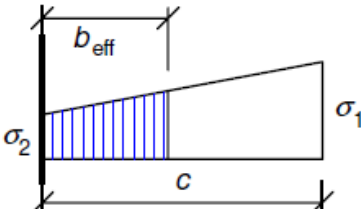
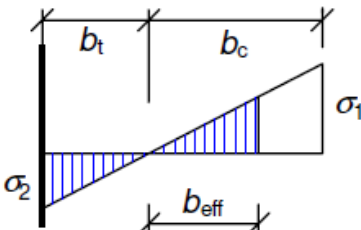
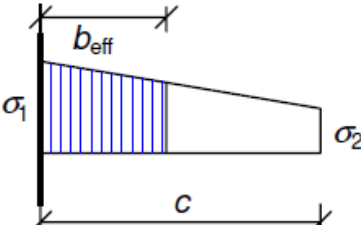
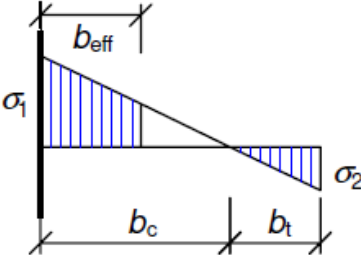
| Stress distribution (compression positive) | | | | Effective ^p width b_{eff} | | |
|---|-----|-----------------------|------|--|------|---------------------|
|  | | | | $\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$ | | |
|  | | | | $1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$ | | |
|  | | | | $\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$ | | |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | 1 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1 | $-1 > \psi > -3$ |
| Buckling factor k_σ | 4,0 | $8,2 / (1,05 + \psi)$ | 7,81 | $7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$ | 23,9 | $5,98 (1 - \psi)^2$ |

Table 4.2: Outstand compression elements

| Stress distribution (compression positive) | | Effective ^p width b_{eff} | | | |
|---|------|--|------|--------------------------------|----------------------------|
|  | | $1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$ | | | |
|  | | $\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$ | | | |
| $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ | 1 | 0 | -1 | $1 \geq \psi \geq -3$ | |
| Buckling factor k_σ | 0,43 | 0,57 | 0,85 | $0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$ | |
|  | | $1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$ | | | |
|  | | $\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$ | | | |
| $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ | 1 | $1 > \psi > 0$ | | 0 | $0 > \psi > -1$ |
| Buckling factor k_σ | 0,43 | $0,578 / (\psi + 0,34)$ | | 1,70 | $1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$ |
| | | | | | -1 |
| | | | | | 23,8 |

Comportamento post-critico di una lastra compressa

Approccio semplificato: Von Karman, 1932 - EC3

Per elementi soggetti a tensioni $< f_y$ si usa

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}}$$

con la stessa espressione di ρ

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{\bar{\lambda}_{p,red} - 0.22}{\bar{\lambda}_{p,red}^2}$$

precedenti versioni dell'EC3 consideravano troppo cautelativa l'espressione e suggerivano

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{\bar{\lambda}_{p,red} - 0.22}{\bar{\lambda}_{p,red}^2} + 0.18 \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0.6}$$

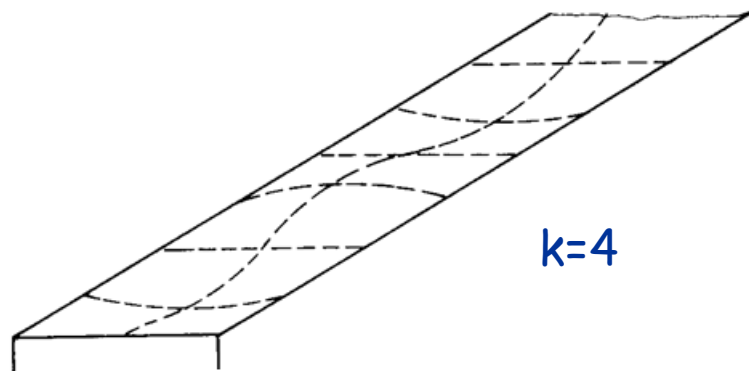
Comportamento post-critico di una lastra compressa

Differenti possibili approcci semplificati:

- larghezza efficace
 - è l'approccio base, il più utilizzato
- spessore efficace
 - è usato per ridurre il contributo degli irrigidimenti nella parte 1-3 dell'Eurocodice 3
 - è usato diffusamente nell'Eurocodice 9 (alluminio)
- area efficace
 - è citato come approccio generale nella parte 1-5 dell'Eurocodice 3
- tensione ridotta
 - era usato nel passato

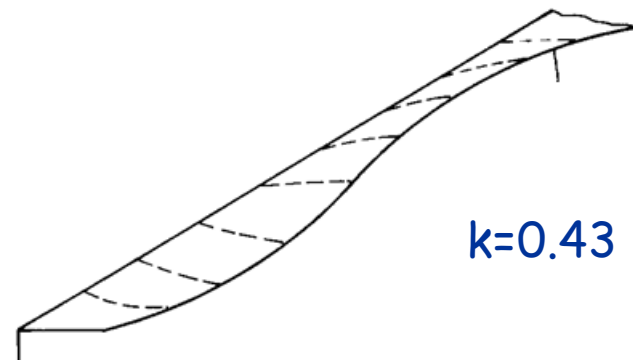
Lastra con un bordo longitudinale libero

- il comportamento è analogo a quello della lastra in cui entrambi i bordi longitudinali sono vincolati, ma il suo carico critico è molto più basso
- la tensione critica può essere calcolata con le stesse espressioni valide per lastra vincolata a entrambi i bordi, ponendo però $k=0.43$



$k=4$

vincolata su due lati



$k=0.43$

vincolata su un solo lato

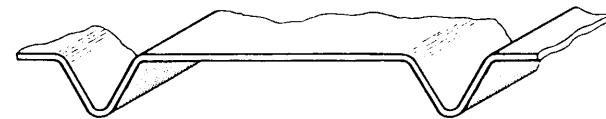
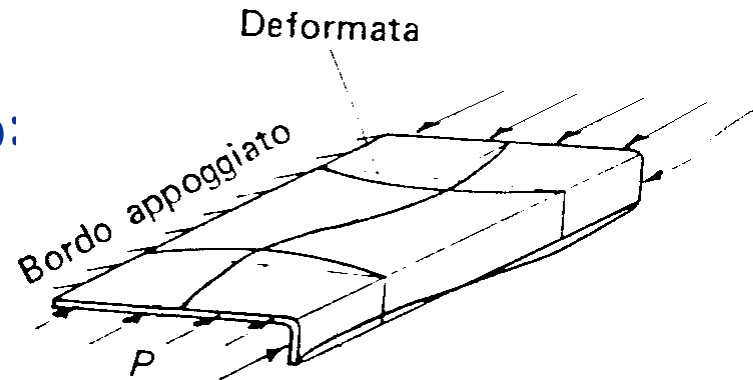
Esempio

| Larghezza efficace | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-----|------------------|--|--|--|--------|-----|------------------|--|--|
| lastra vincolata su due bordi longitudinali | | | | | | lastra con un bordo longitudinale libero | | | | | |
| b | 200 | mm | | | | b | 100 | mm | | | |
| t | 2.5 | mm | | | | t | 2.5 | mm | | | |
| k | 4 | | | | | k | 0.43 | | | | |
| E | 210000 | MPa | | | | E | 210000 | MPa | | | |
| v | 0.3 | | | | | v | 0.3 | | | | |
| f _y | 235 | MPa | | | | f _y | 235 | MPa | | | |
| b/t | 80 | | | | | b/t | 40 | | | | |
| EC3 | | | | | | EC3 | | | | | |
| per $\sigma_{max}=f_y$ | | | | | | per $\sigma_{max}=f_y$ | | | | | |
| in assenza di imperfezioni | | | con imperfezioni | | | in assenza di imperfezioni | | | con imperfezioni | | |
| λ_p | 1.408 | | | | | λ_p | 2.148 | | | | |
| b _{eff} /b | 0.710 | | 0.599 | | | b _{eff} /b | 0.466 | | 0.418 | | |
| per $\sigma_{max}=0.5 f_y/\gamma_{mo}$ | | | | | | per $\sigma_{max}=0.5 f_y/\gamma_{mo}$ | | | | | |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.996 | | | | | $\lambda_{p,red}$ | 1.519 | | | | |
| b _{eff} /b | 1.000 | | 0.782 | | | b _{eff} /b | 0.658 | | 0.563 | | |

Vedi file Instabilità locale, foglio b eff

Lastre molto snelle

- per annullare o limitare la riduzione del carico critico (e quindi della capacità portante) si possono aggiungere degli irrigidimenti
 - per lastre con un bordo libero: irrigidimenti di bordo
 - per tutte le lastre : irrigidimenti intermedi

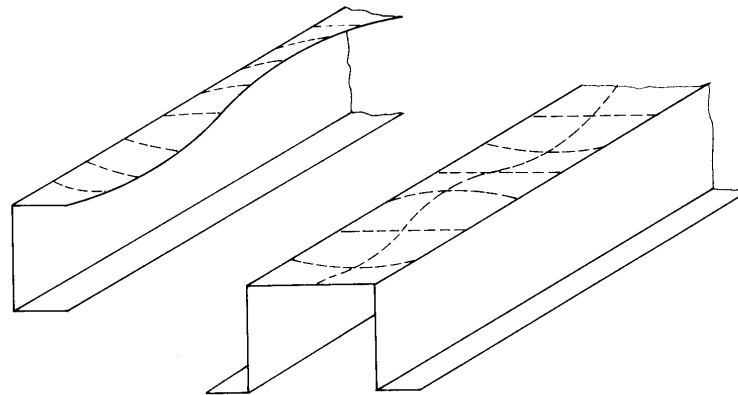


occorre verificare l'efficacia degli irrigidimenti
(controllare che non vadano in carico critico)

Profili sottili

Schematizzazione

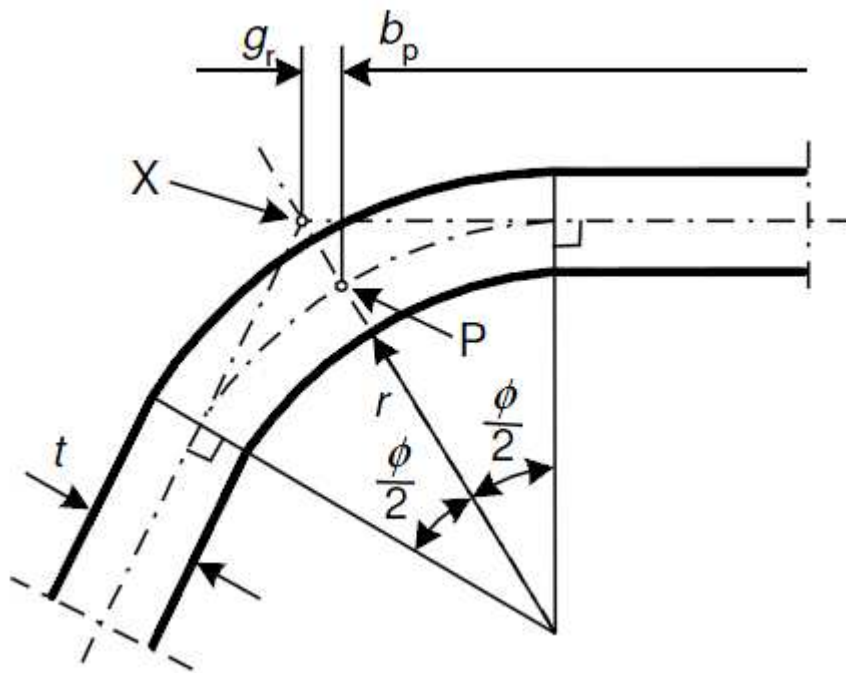
- per l'analisi dell'instabilità locale i profilati a freddo si considerano composti da un insieme di lastre piane mutuamente collegate lungo i bordi comuni



- per semplicità si assume che i bordi siano semplici appoggi, trascurando il possibile vincolo mutuo alla rotazione
- in presenza di irrigidimenti di bordo o intermedi occorre verificare l'efficacia dell'irrigidimento, cioè la sua capacità di impedire spostamenti

Larghezza

- per l'Eurocodice 3 la larghezza geometrica è indicata col simbolo b_p ed è misurata dal punto medio del raccordo d'angolo



X intersezione delle linee medie

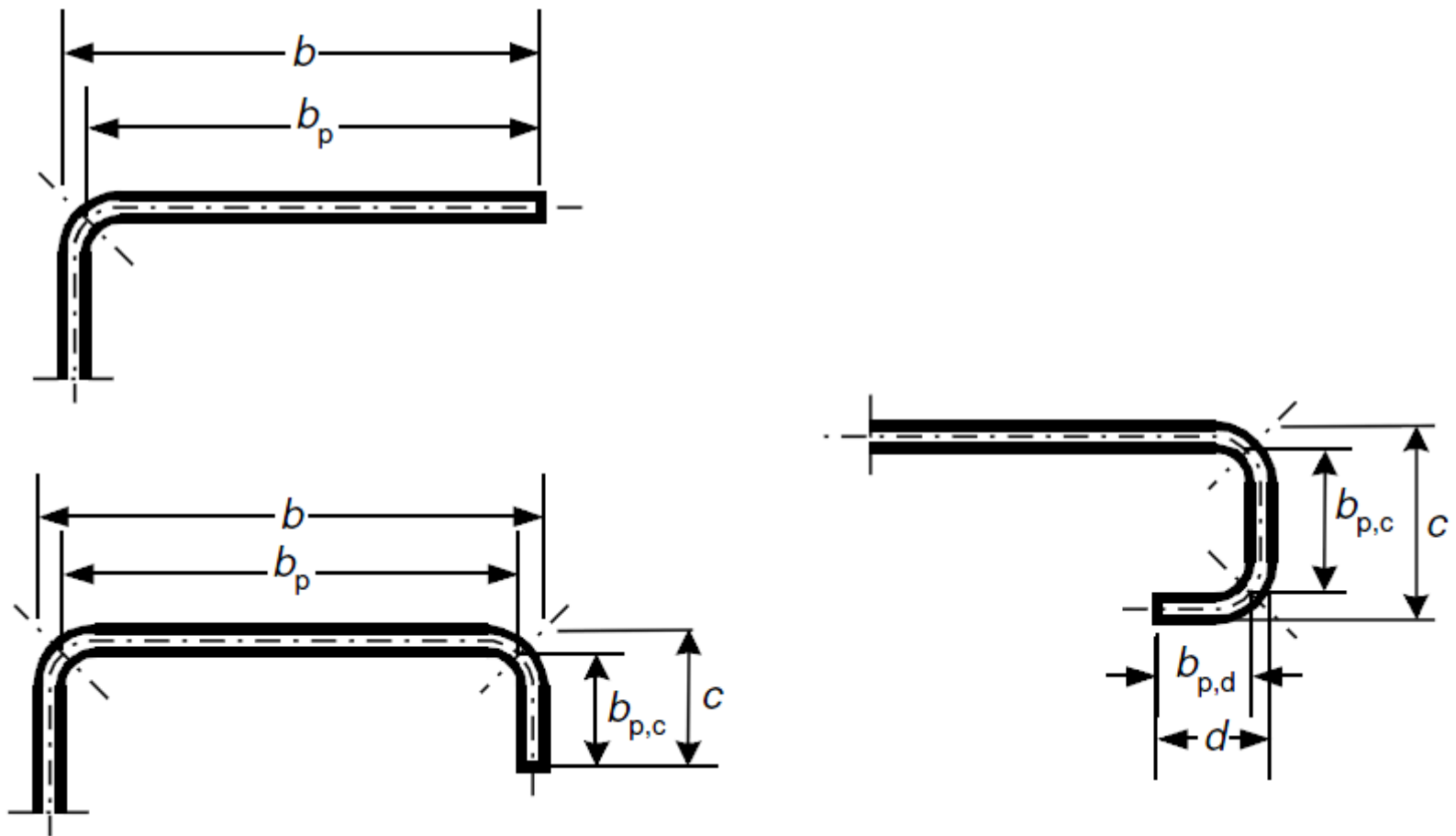
P punto medio del raccordo

$$r_m = r + t/2$$

$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)$$

Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.1

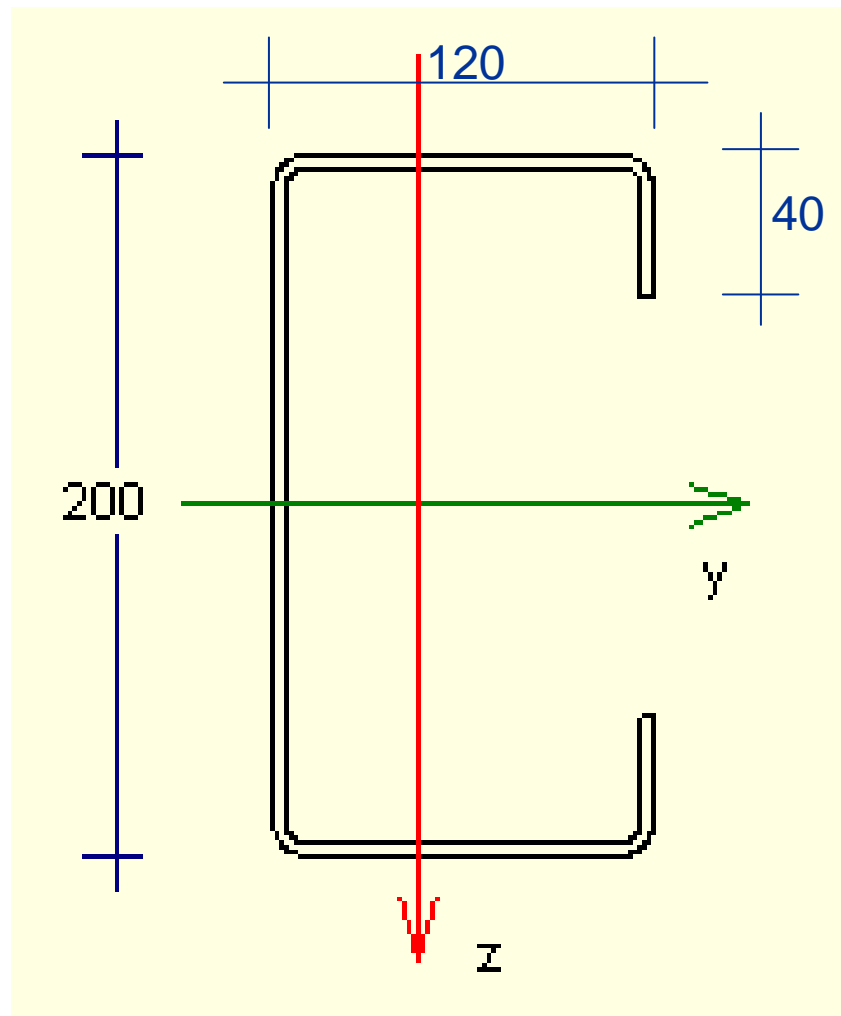
Larghezza



Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.1

Esempio

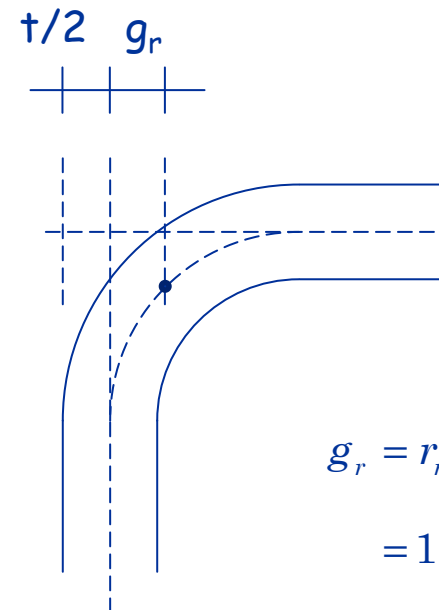
profilo a C 200 x 120 x 2.5



raggio interno di curvatura
 $r = 1.5 t = 3.75 \text{ mm}$

raggio medio
 $r_m = r + t/2 = 5.0 \text{ mm}$

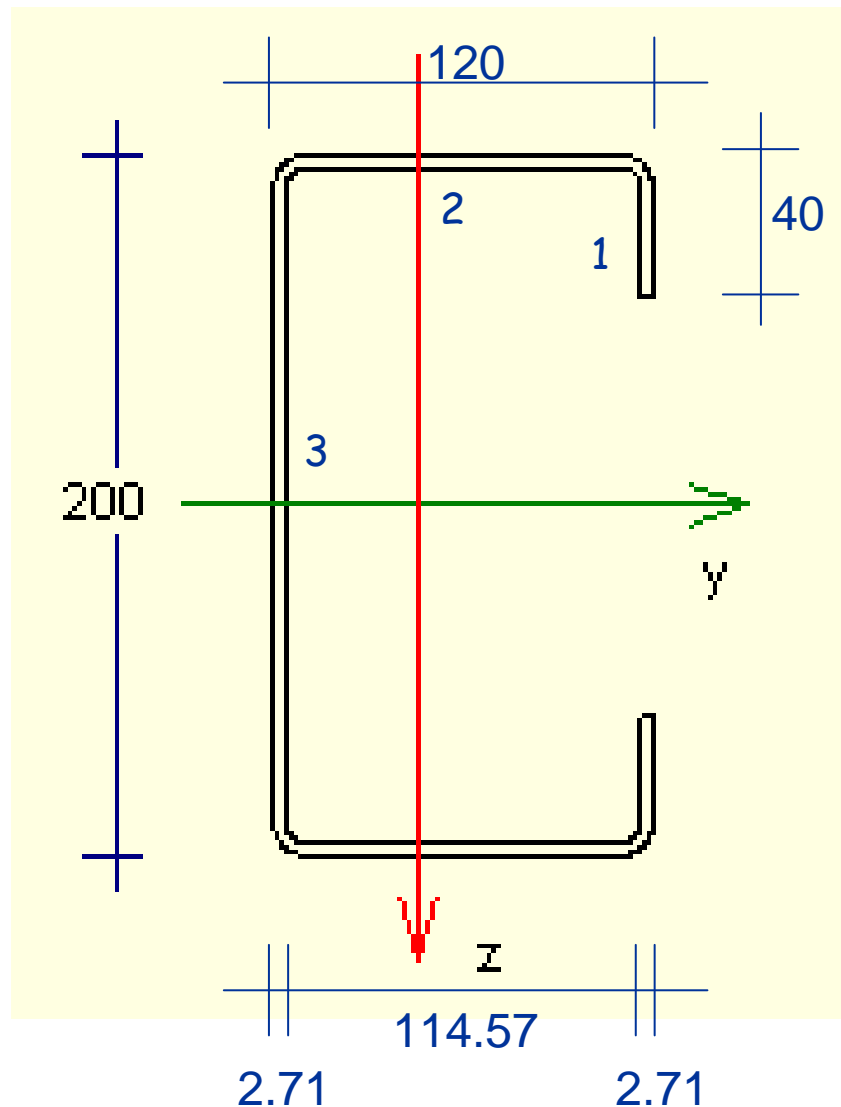
angolo
 $\phi = 90^\circ$



$$g_r = r_m \left(\tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right) = 1.464 \text{ mm}$$

Esempio

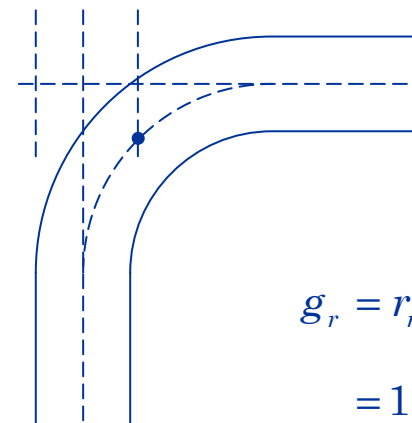
profilo a C 200 x 120 x 2.5



Elemento

| | |
|---|---------------------------|
| 1 | $b_p = 37.29 \text{ mm}$ |
| 2 | $b_p = 114.57 \text{ mm}$ |
| 3 | $b_p = 194.57 \text{ mm}$ |

$$\frac{t}{2} + g_r = 2.714 \text{ mm}$$

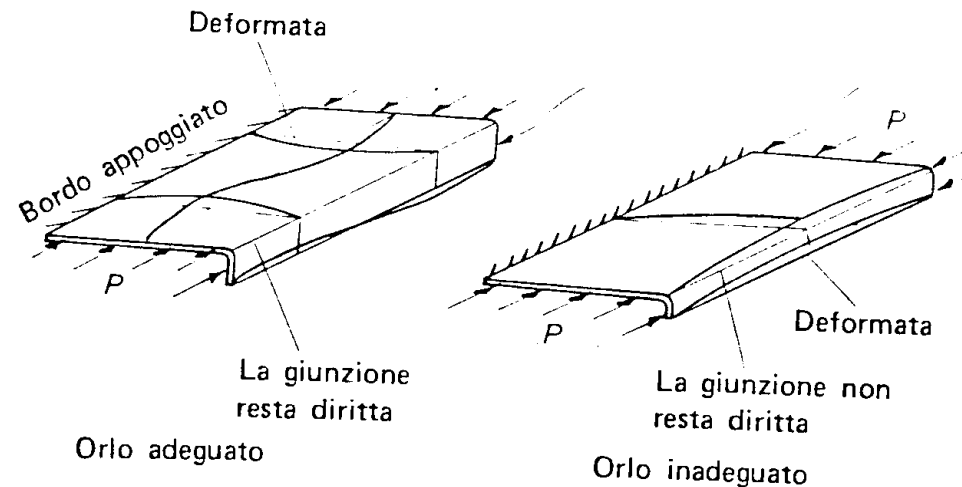


$$g_r = r_m \left(\tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right) = 1.464 \text{ mm}$$

Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

Efficacia degli irrigidimenti di bordo

- Un elemento vincolato da un irrigidimento fornisce la stessa resistenza di un elemento con bordo fisso solo se l'irrigidimento si mantiene rettilineo

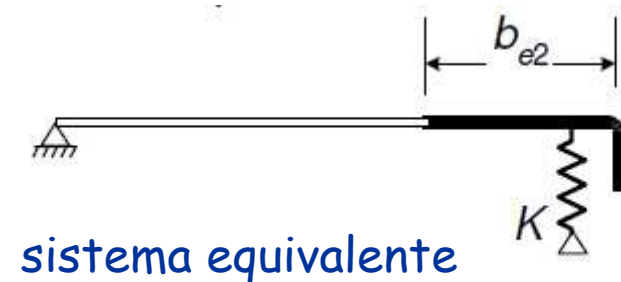
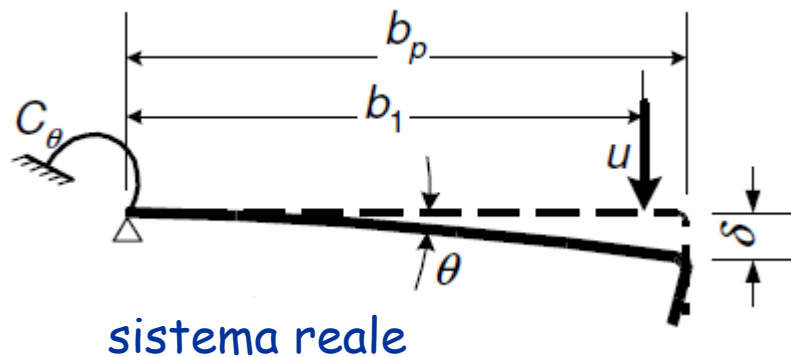


- dimensione c consigliata dell'irrigidimento di bordo affinché sia efficace:

$$c \geq b / 5 \quad e \quad c \leq 10 t$$

Efficacia degli irrigidimenti di bordo

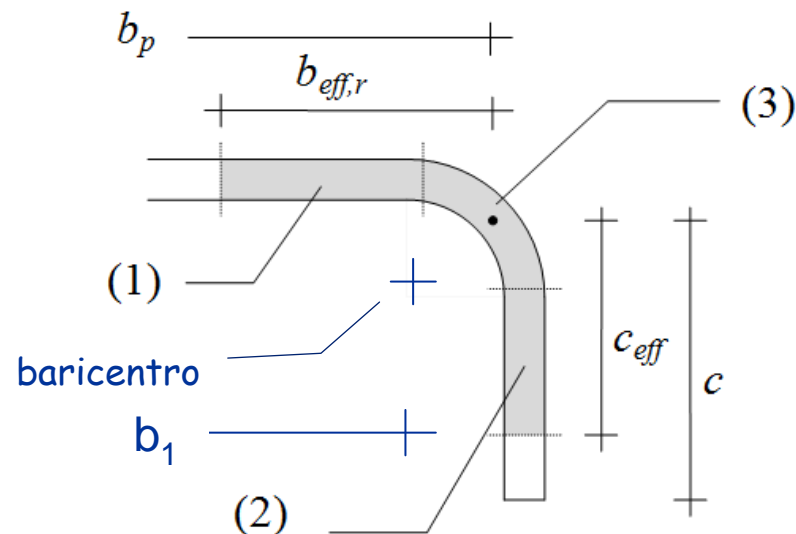
- L'irrigidimento può essere considerato come un'asta compressa, che potrebbe instabilizzarsi; essa è però vincolata elasticamente al resto del profilo (come se fosse quindi un'asta su suolo alla Winkler) e ciò riduce il rischio di instabilità



- La molla ha rigidezza (per unità di lunghezza)
 $K_1 = u / \delta$

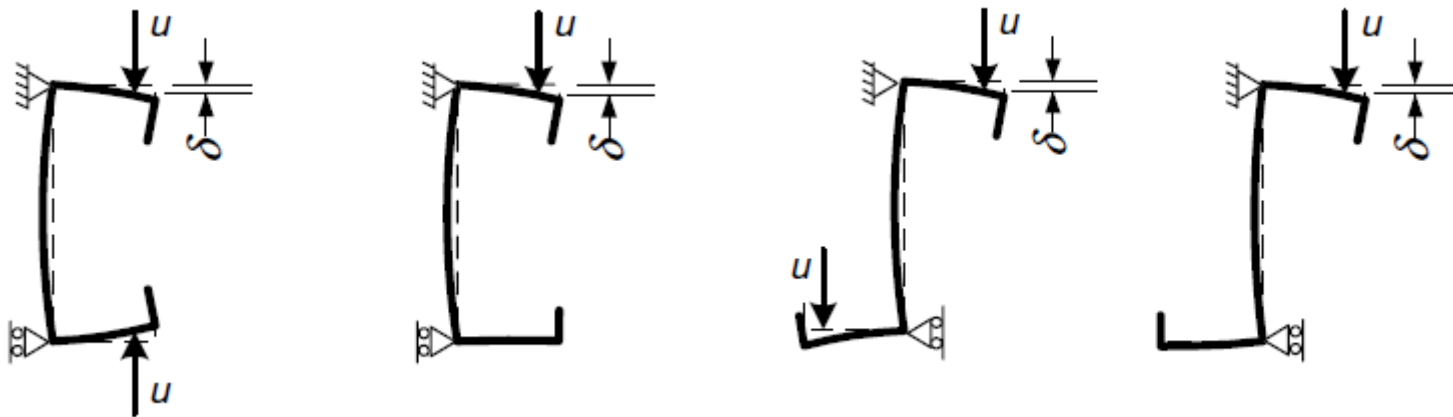
Sezione dell'irrigidimento di bordo

- Nel valutare l'efficacia (e il rischio di instabilità) dell'irrigidimento, lo si deve vedere come un'asta la cui sezione è costituita da tre parti:
 1. parte efficace dell'elemento dal lato dell'irrigidimento
 2. parte efficace dell'irrigidimento
 3. raccordo circolare tra elemento e irrigidimento



Rigidezza della molla per unità di lunghezza

- Deve essere calcolata con lo schema:



$$\delta = \theta b_p + \frac{u b_p^3}{3} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{E t^3} \quad \theta = u b_p / C_\theta$$

$$K_1 = \frac{E t^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 b_1 b_2 h_w k_f}$$

Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.5.3.1

Rigidezza della molla per unità di lunghezza

- Dall'espressione generale si ricava
 - per sezioni a C o Z

$$K_1 = \frac{E t^3}{4 b_1^2 (1 - \nu^2) (b_1 + 1.5 h)} \quad \text{in caso di compressione}$$

$$K_1 = \frac{E t^3}{4 b_1^2 (1 - \nu^2) (b_1 + h)} \quad \text{in caso di flessione}$$

- per sezioni a L irrigidite

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{b^2 (1 - \nu^2) (b + h)} \quad \text{in caso di flessione nel piano } x-z, \text{ con fibre superiori tese}$$

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{h^2 (1 - \nu^2) (b + h)} \quad \text{in caso di flessione nel piano } x-y, \text{ con fibre di destra tese}$$

- per sezioni a omega e per lamiera grecata

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{h^2 (1 - \nu^2) (b + 15h)} \quad \text{in caso di compressione}$$

$$C_r = \frac{0.25 E t^3}{h^2 (1 - \nu^2) (b + h)} \quad \text{in caso di flessione}$$

Carico critico dell'irrigidimento

- Il carico critico di una trave elastica su suolo elastico alla Winkler vale:

$$N_{cr} = 2 \sqrt{K E I_s} \qquad \sigma_{cr} = \frac{2 \sqrt{K E I_s}}{A_s}$$

con A_s I_s area e momento d'inerzia della sezione della trave (ovvero in questo caso dell'irrigidimento)

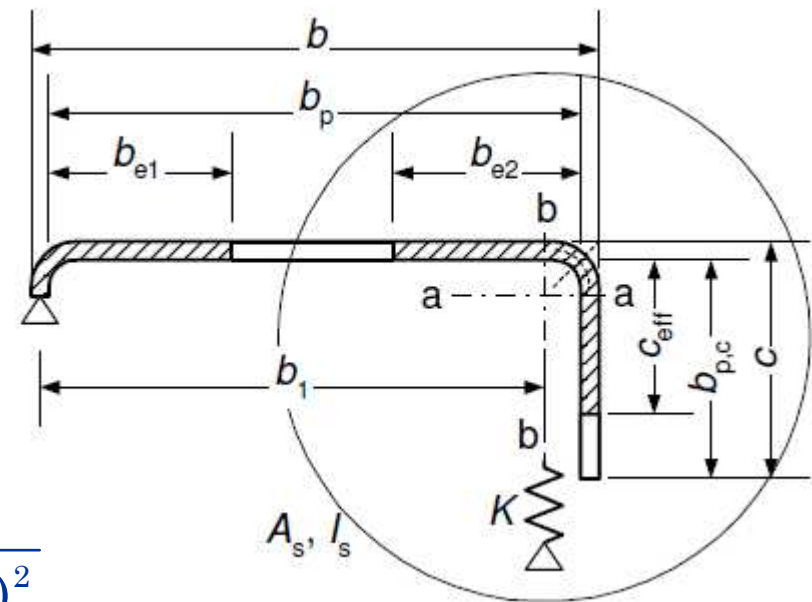
Procedimento

fase 1

- Assegnare la distribuzione di tensioni (inizialmente $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$)
- Determinare i valori di b_{e1} e b_{e2} per l'ala con le formule usuali
- Determinare il valore di c_{eff} con le formule usuali, ma prendendo
 - se $b_{p,c}/b_p \leq 0.35$

$$k_\sigma = 0.5$$
 - se $0.35 < b_{p,c}/b_p \leq 0.6$

$$k_\sigma = 0.5 + 0.83 \sqrt[3]{(b_{p,c}/b_p - 0.35)^2}$$



Procedimento

fase 2

- Determinare le proprietà geometriche della sezione dell'irrigidimento (A_s I_s)
- Determinare la tensione critica in campo elastico dell'irrigidimento ($\sigma_{cr,s}$)
- Determinare la snellezza relativa

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}}$$

- Determinare il coefficiente di riduzione

$$\chi_d = 1.0 \quad \text{se } \bar{\lambda}_d \leq 0.65$$

$$\chi_d = 1.47 - 0.723 \bar{\lambda}_d \quad \text{se } 0.65 \leq \bar{\lambda}_d \leq 1.38$$

$$\chi_d = 0.66 / \bar{\lambda}_d \quad \text{se } \bar{\lambda}_d \geq 1.38$$

Procedimento

fase 3

- Se si è trovato $\chi_d < 1$ occorre considerare per l'irrigidimento un'area ridotta

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}$$

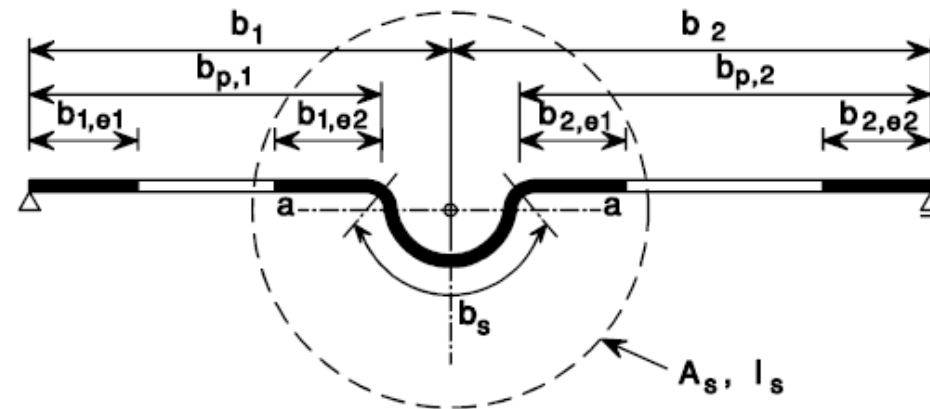
si può assumere che il momento d'inerzia I_s vari nella stessa proporzione e che il baricentro della sezione rimanga inalterato; in pratica si assume che si abbia una riduzione di spessore dell'irrigidimento, cioè $t_{red} = t A_{s,red} / A_s$

- È opportuno iterare il procedimento considerando una nuova tensione massima

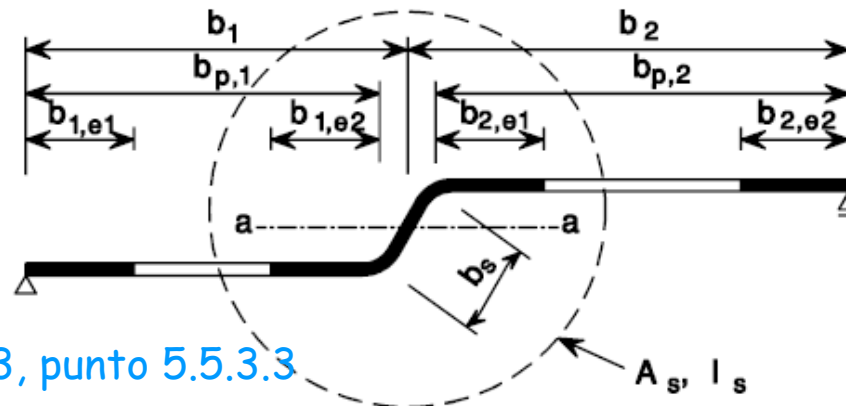
$$\sigma_{com,Ed} = \chi_d f_y / \gamma_{M0}$$

Efficacia degli irrigidimenti intermedi

- Si procede in maniera analoga anche per gli irrigidimenti intermedi



$$K = \frac{E t^3 (b_1 + b_2)}{4 (1 - \nu^2) b_1^2 b_2^2}$$



Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.5.3.3

Caratteristiche di sollecitazioni
resistenti per i profili sottili

Trazione

- Non si hanno problemi di instabilità locale
- Si può usare la tensione di snervamento media nella sezione f_{ya}
- La resistenza a trazione vale

$$N_{t,Rd} = A_g \frac{f_{ya}}{\gamma_{M0}}$$

Trazione

esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo

| Sezione geometrica | | | | | |
|--------------------|---------|-----------------|--|----------------------------------|-----------|
| A | 1247.6 | mm ² | | γM0 | 1.05 |
| I _y | 8311935 | mm ⁴ | | ε | 1.000 |
| I _z | 2705494 | mm ⁴ | | f _{yb} /γ _{m0} | 223.8 |
| | | | | | |
| f _{yb} | 235 | MPa | | Resistenza a trazione | |
| f _u | 360 | MPa | | N _{t,Rd} | 294.12 kN |
| f _{ya} | 247.52 | MPa | | | |

$$A_g = 1247.6 \text{ mm}^2$$

$$f_{ya} = 247.5 \text{ MPa}$$

$$N_{t,Rd} = 1247.6 \times \frac{247.5}{1.05} \times 10^{-3} = 249.1 \text{ kN}$$

Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

Compressione

in assenza di instabilità dell'asta

- Si deve valutare l'area efficace, tenendo conto dell'instabilità locale
- Si deve usare la tensione di snervamento del materiale base f_{yb}
- La resistenza a compressione vale

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

Nota:

se il baricentro della sezione efficace non coincide con quello della sezione geometrica si deve tener conto del momento corrispondente a questa eccentricità

Compressione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo

| elemento 1 | | irrigidimento superiore | | | | |
|-------------------|--------|-------------------------|--|------------|--------|-----|
| yP1 | 118.75 | mm | | σ_1 | 223.81 | MPa |
| zP1 | 6.25 | mm | | σ_2 | 223.81 | MPa |
| yP2 | 118.75 | mm | | | | |
| zP2 | 40 | mm | | k | 0.430 | |
| bp | 37.29 | mm | | ρ | 0.906 | |
| λ_p | 0.801 | | | beff | 33.77 | mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.801 | | | | | |
| elemento 2 | | ala superiore | | | | |
| yP1 | 6.25 | mm | | σ_1 | 223.81 | MPa |
| zP1 | 1.25 | mm | | σ_2 | 223.81 | MPa |
| yP2 | 113.75 | mm | | | | |
| zP2 | 1.25 | mm | | k | 4.000 | |
| bp | 114.57 | mm | | ρ | 0.901 | |
| λ_p | 0.807 | | | be1 | 51.64 | mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.807 | | | be2 | 51.64 | mm |
| elemento 3 | | anima | | | | |
| yP1 | 1.25 | mm | | σ_1 | 223.81 | MPa |
| zP1 | 6.25 | mm | | σ_2 | 223.81 | MPa |
| yP2 | 1.25 | mm | | bc | 194.57 | mm |
| zP2 | 193.75 | mm | | k | 4.000 | |
| bp | 194.57 | mm | | ρ | 0.613 | |
| λ_p | 1.370 | | | be1 | 59.60 | mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 1.370 | | | be2 | 59.60 | mm |

| | |
|-----------------------------------|---|
| Caratteristica di sollecitazione | 1 |
| (1=compressione, 2= flessione M+) | |

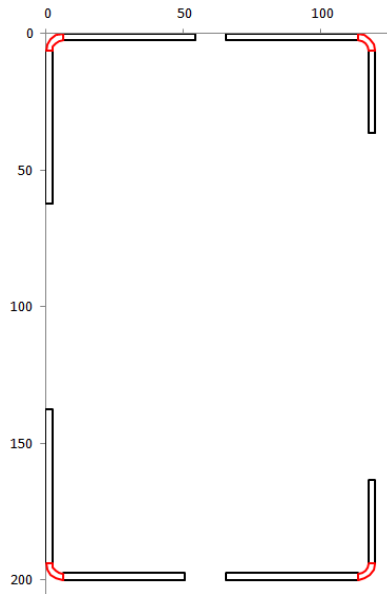
Si determina per ogni elemento la larghezza efficace

Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

Compressione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo



$$N_{c,Rd} = 976.3 \times \frac{235}{1.05} \times 10^{-3} = 218.5 \text{ kN}$$

Nota:

Nel foglio Excel non si è valutata la riduzione di efficacia degli irrigidimenti; tenendone conto la resistenza si riduce a 207.8 kN

EFFECTIVENESS OF EDGE STIFFENERS

Edge stiffener for element 2

spring stiffness: $k = 0,1690 \text{ MPa}$

geometrical data: $A_r = 218,0 \text{ mm}^2$ $I_r = 28453 \text{ mm}^4$

$y_{Gr} = 102,56 \text{ mm}$ $z_{Gr} = 190,98 \text{ mm}$

buckling stress: $\sigma_{cr,s} = 291,52 \text{ MPa}$

reduction: $\lambda = 0,8978$ $\chi = 0,7974$ $\chi_{IR} = 0,8373$

Sezione efficace

| | | | | | | | | | |
|----|------|----|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|-----------------|-----------------|
| yG | 52.3 | mm | A | Sy | Sz | | | IyG | IzG |
| zG | 99.1 | mm | 976.3 | 96762 | 51058 | | | 7518147 | 2184239 |
| | | | mm ² | mm ³ | mm ³ | | | mm ⁴ | mm ⁴ |

Vedi file Instabilità locale, foglio GeomSezE

Compressione

in presenza di instabilità dell'asta

- Si utilizza l'approccio usuale per i profili non sottili, usando però i dati della sezione efficace

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

EVALUATION OF DESIGN BUCKLING RESISTANCE

[6.2]

| | | |
|--------------------------------|---------|----------------------|
| area of the gross section: | Ag = | 1248 mm ² |
| area of the effective section: | Aeff = | 928 mm ² |
| reduction factor: | betaA = | 0,7441 |

x-z plan:

| | | |
|--|--------------|----------|
| buckling length: | l = | 4,00 m |
| radius of gyration of gross cross-section: | i = | 81,62 mm |
| slenderness: | lambda = | 49,01 |
| relative slenderness: | lambda bar = | 0,4501 |
| imperfection factor: | alfa = | 0,34 |
| reduction factor: | chi = | 0,9057 |

x-y plan:

| | | |
|--|--------------|----------|
| buckling length: | l = | 4,00 m |
| radius of gyration of gross cross-section: | i = | 46,57 mm |
| slenderness: | lambda = | 85,90 |
| relative slenderness: | lambda bar = | 0,7890 |
| imperfection factor: | alfa = | 0,34 |
| reduction factor: | chi = | 0,7312 |

| | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| lowest value of chi: | chi min = | 0,7312 |
| Design buckling resistance: | Nb,Rd = | 151,93 kN |

Eurocodice 3, parte 1-3, punto 6.2.2

Flessione

in assenza di instabilità dell'asta

- Si deve valutare l'area efficace, tenendo conto dell'instabilità locale (in genere in maniera iterativa)
- Si deve usare la tensione di snervamento del materiale base f_{yb}
- La resistenza a flessione vale

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

Nota:

La necessità di iterare nasce dal fatto che il baricentro della sezione efficace non coincide con quello della sezione geometrica

Flessione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo
Primo tentativo
 - si considera la posizione dell'asse neutro a metà altezza ($x = 100$ mm)

| elemento 1 | | irrigidimento superiore | | | |
|-------------------|--------|-------------------------|--|------------|-------------|
| yP1 | 118.75 | mm | | σ_1 | 220.49 MPa |
| zP1 | 6.25 | mm | | σ_2 | 135.99 MPa |
| yP2 | 118.75 | mm | | | |
| zP2 | 40 | mm | | k | 0.602 |
| bp | 37.29 | mm | | ρ | 1.000 |
| λ_p | 0.677 | | | beff | 37.29 mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.672 | | | | |
| elemento 2 | | ala superiore | | | |
| yP1 | 6.25 | mm | | σ_1 | 223.81 MPa |
| zP1 | 1.25 | mm | | σ_2 | 223.81 MPa |
| yP2 | 113.75 | mm | | | |
| zP2 | 1.25 | mm | | k | 4.000 |
| bp | 114.57 | mm | | ρ | 0.901 |
| λ_p | 0.807 | | | be1 | 51.64 mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.807 | | | be2 | 51.64 mm |
| elemento 3 | | anima | | | |
| yP1 | 1.25 | mm | | σ_1 | 220.49 MPa |
| zP1 | 6.25 | mm | | σ_2 | -220.49 MPa |
| yP2 | 1.25 | mm | | bc | 97.29 mm |
| zP2 | 193.75 | mm | | k | 23.880 |
| bp | 194.57 | mm | | ρ | 1.000 |
| λ_p | 0.561 | | | be1 | 38.91 mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.557 | | | be2+bt | 155.66 mm |

| Caratteristica di sollecitazione | | 2 | |
|-----------------------------------|-----------|---|--------|
| (1=compressione, 2= flessione M+) | | | |
| posizione asse neutro | | z | 100 mm |
| ds/dz | 2.266 MPa | | |

Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

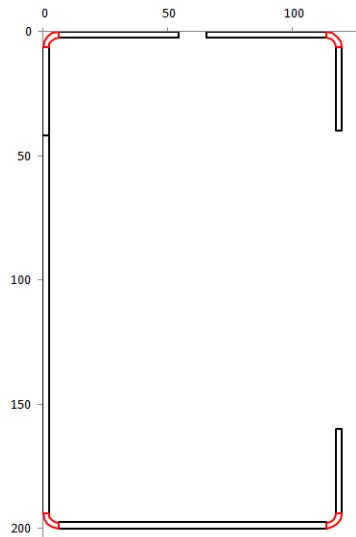
Flessione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo

Primo tentativo

- si considera la posizione dell'asse neutro a metà altezza ($x = 100$ mm)



Il baricentro della
sezione efficace è a
 $x=102.3$ mm

| | | | | | | | | | |
|----|-------|----|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|-----------------|-----------------|
| yG | 45.5 | mm | A | Sy | Sz | | | IyG | IzG |
| zG | 102.3 | mm | 1219.4 | 124730 | 55540 | | | 8030310 | 2699431 |
| | | | mm ² | mm ³ | mm ³ | | | mm ⁴ | mm ⁴ |

Vedi file Instabilità locale, foglio GeomSezE

Flessione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo
Secondo tentativo
 - si considera la posizione dell'asse neutro a
 $x = 102.3 \text{ mm}$

| elemento 1 | | irrigidimento superiore | | | |
|-------------------|--------|-------------------------|--|------------|-------------|
| yP1 | 118.75 | mm | | σ_1 | 220.57 MPa |
| zP1 | 6.25 | mm | | σ_2 | 137.98 MPa |
| yP2 | 118.75 | mm | | | |
| zP2 | 40 | mm | | k | 0.597 |
| bp | 37.29 | mm | | ρ | 0.999 |
| λ_p | 0.680 | | | beff | 37.24 mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.675 | | | | |
| elemento 2 | | ala superiore | | | |
| yP1 | 6.25 | mm | | σ_1 | 223.81 MPa |
| zP1 | 1.25 | mm | | σ_2 | 223.81 MPa |
| yP2 | 113.75 | mm | | | |
| zP2 | 1.25 | mm | | k | 4.000 |
| bp | 114.57 | mm | | ρ | 0.901 |
| λ_p | 0.807 | | | be1 | 51.64 mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.807 | | | be2 | 51.64 mm |
| elemento 3 | | anima | | | |
| yP1 | 1.25 | mm | | σ_1 | 220.57 MPa |
| zP1 | 6.25 | mm | | σ_2 | -210.38 MPa |
| yP2 | 1.25 | mm | | bc | 99.59 mm |
| zP2 | 193.75 | mm | | k | 22.707 |
| bp | 194.57 | mm | | ρ | 1.000 |
| λ_p | 0.575 | | | be1 | 39.83 mm |
| $\lambda_{p,red}$ | 0.571 | | | be2+bt | 154.74 mm |

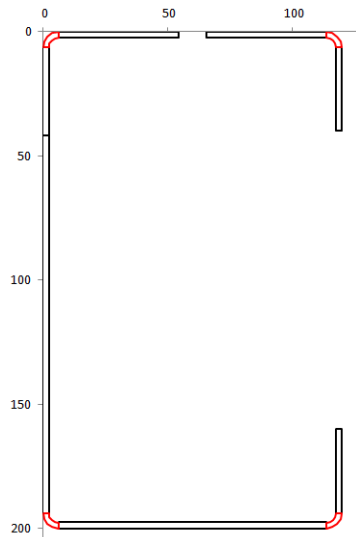
| Caratteristica di sollecitazione | | 2 | |
|-----------------------------------|-----------|---|----------|
| (1=compressione, 2= flessione M+) | | | |
| posizione asse neutro | | z | 102.3 mm |
| ds/dz | 2.215 MPa | | |

Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

Flessione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo
Secondo tentativo
 - si considera la posizione dell'asse neutro a
 $x = 102.3 \text{ mm}$



$$W_{eff} = \frac{8029848}{102.3} = 78493 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,Rd} = 78943 \times \frac{235}{1.05} \times 10^{-6} = 17.57 \text{ kNm}$$

Nota:

Nel foglio Excel non si è valutata la riduzione di efficacia degli irrigidimenti; tenendone conto la resistenza si riduce a 17.38 kNm

| | | | | | | | | | |
|----|-------|----|--------|--------|-------|--|--|---------|---------|
| yG | 45.5 | mm | A | Sy | Sz | | | IyG | IzG |
| zG | 102.3 | mm | 1219.3 | 124725 | 55526 | | | 8029848 | 2698794 |
| | | | mm2 | mm3 | mm3 | | | mm4 | mm4 |

Vedi file Instabilità locale, foglio GeomSezE