

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

Progetto di aste e collegamenti in acciaio

4 - Instabilità locale e profili sottili formati a freddo

Spoletto
2-4 febbraio 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

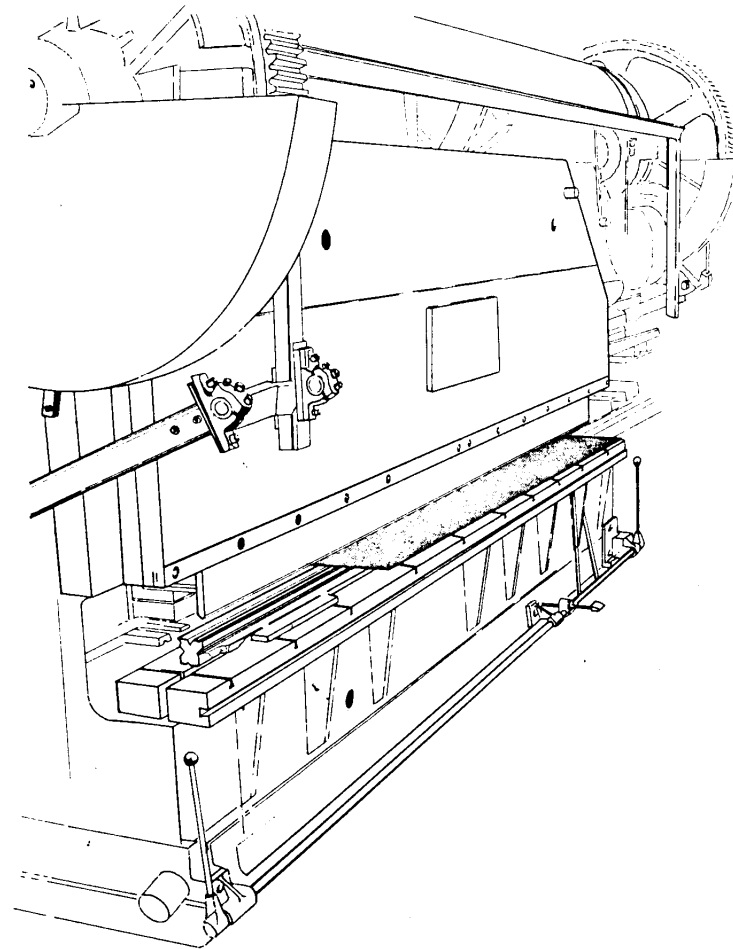
Procedimenti per ottenerli:

1. Stampaggio alla pressa
2. Laminazione a freddo

Come si realizzano

1. Stampaggio alla pressa

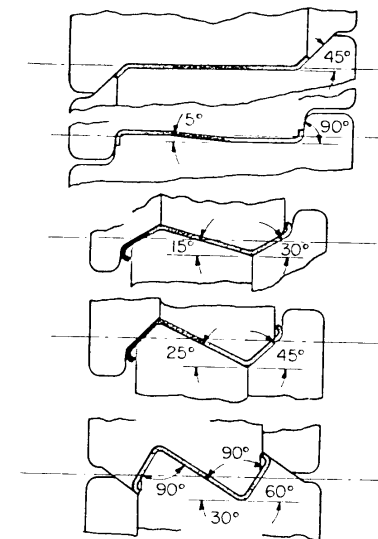
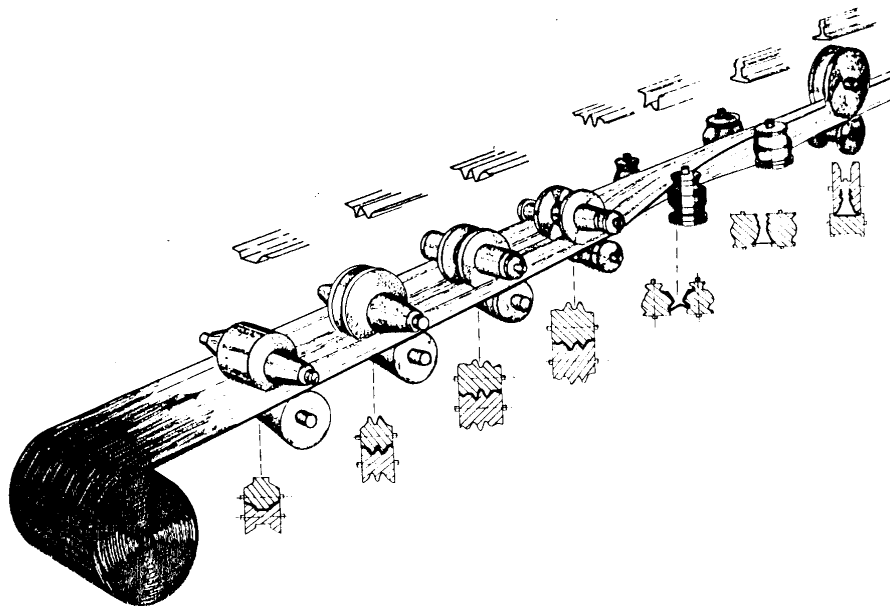
- Il nastro d'acciaio viene pressato, a singoli tratti, su uno stampo



Come si realizzano

2. Laminazione a freddo

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



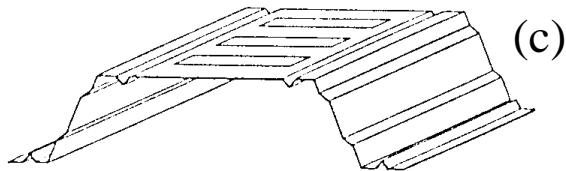
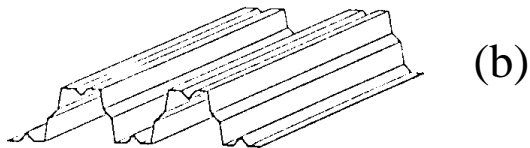
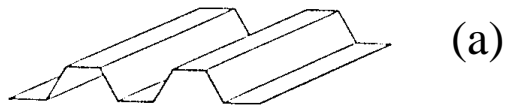
Come si realizzano

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

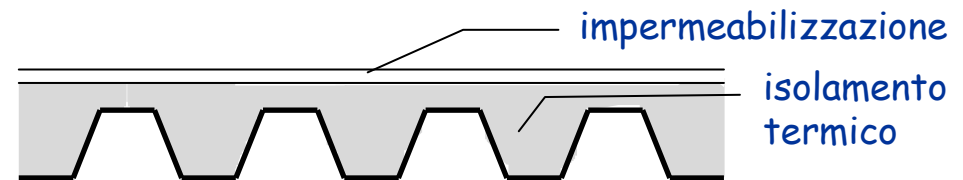


- massima luce per le tipologie usuali:
da 1.50 m a 3.00 m
- richiedono quindi travi secondarie (arcarecci)
- dimensioni della greca molto maggiori consentono di evitare le travi secondarie

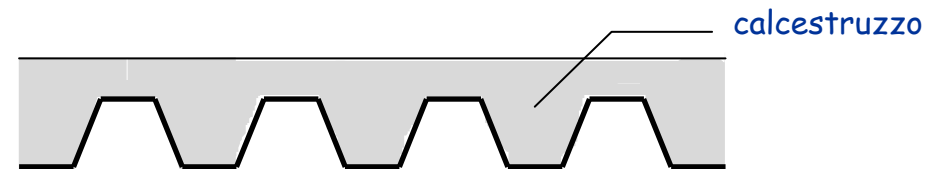
Elementi prodotti mediante formatura a freddo

- 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)

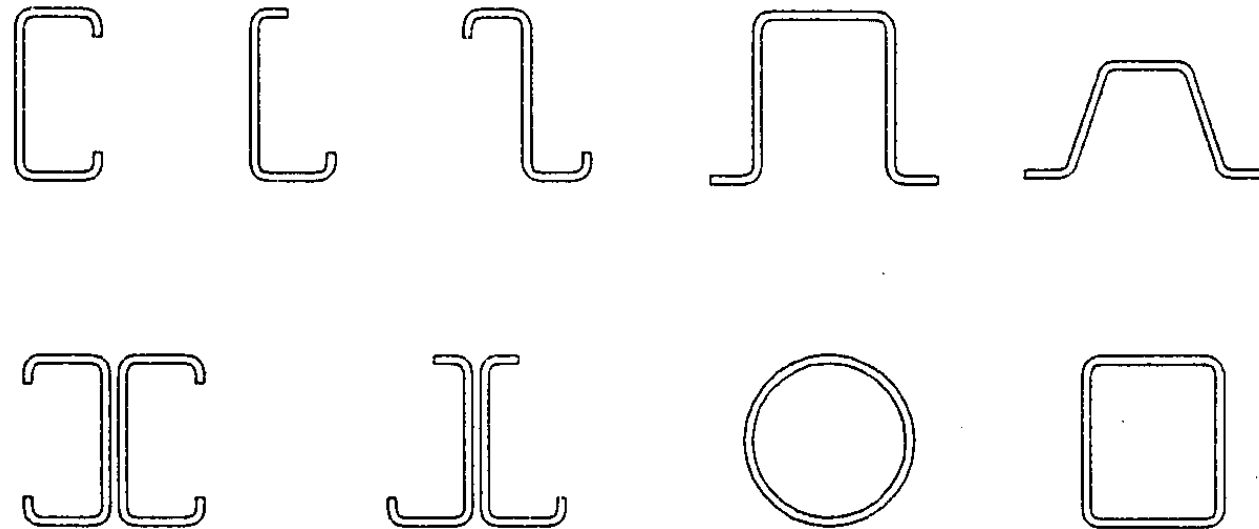


- oppure per solai praticabili (in genere con soletta in calcestruzzo, eventualmente armata con una rete)



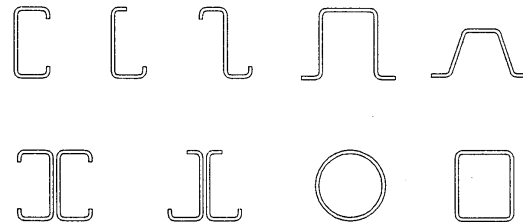
Elementi prodotti mediante formatura a freddo

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



Elementi prodotti mediante formatura a freddo

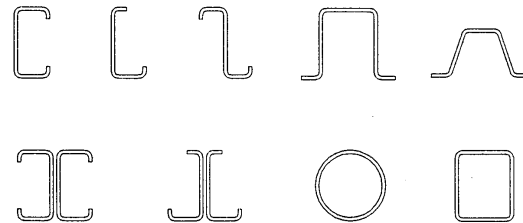
- Elementi strutturali spessore t $1.0 \leq t \leq 8.0$ mm



- 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



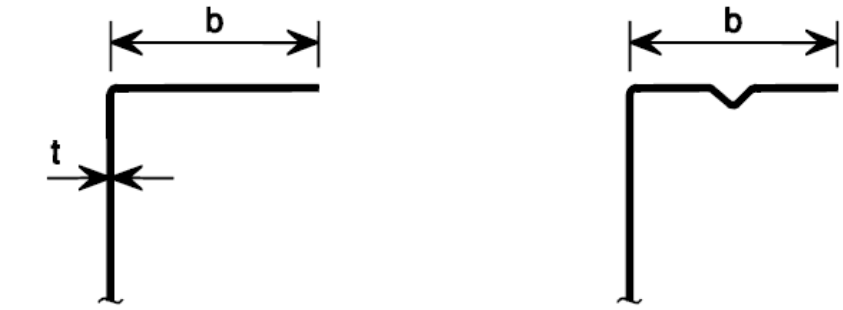
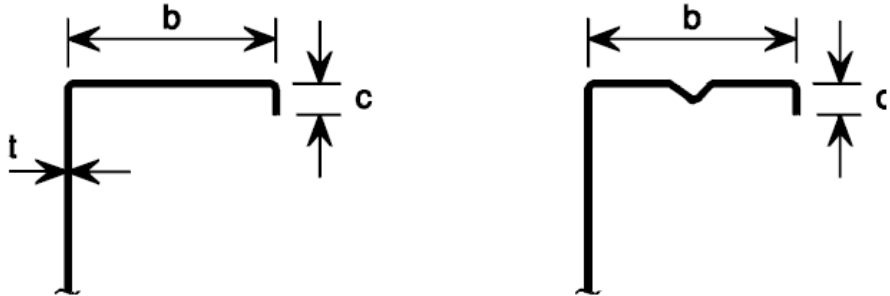
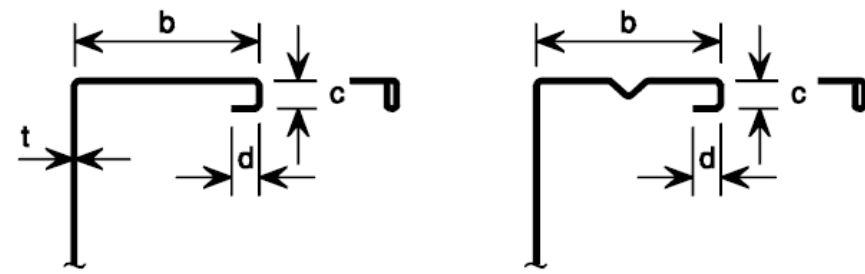
- Usati come:
 - travi principali (di solito sezioni a C accoppiate)
 - colonne (sezioni scatolari o anche sezioni a Ω accoppiate a formare uno scatolare)

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

Limiti negli spessori

elemento della sezione

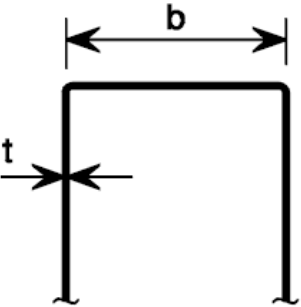
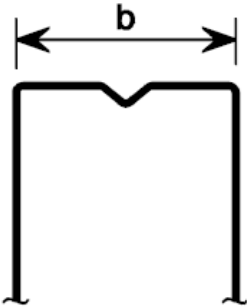
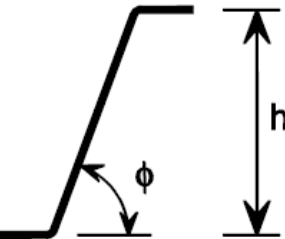
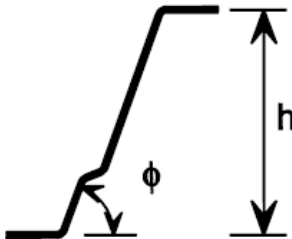
limite

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

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
 $k=0.35$

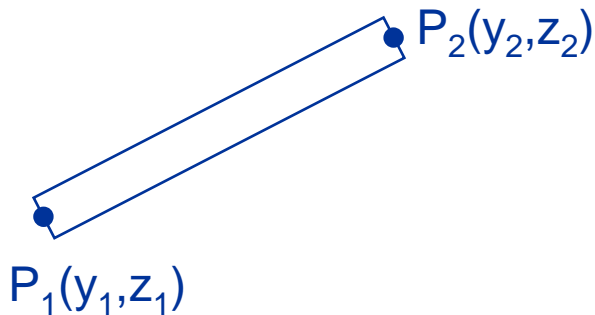
$$t_{rid} = \left(\frac{6.0 + 0.35 \times 4.0}{6.0 + 0.5 \times 4.0} \right) \times 4.0 = 3.7 \text{ mm}$$

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

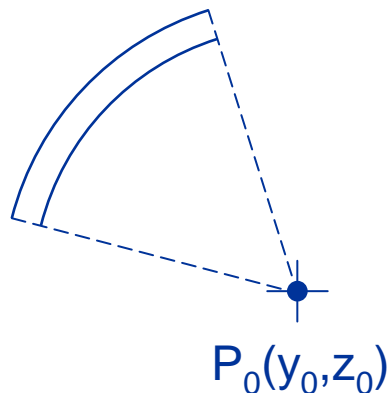
$$l = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

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

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

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

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

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

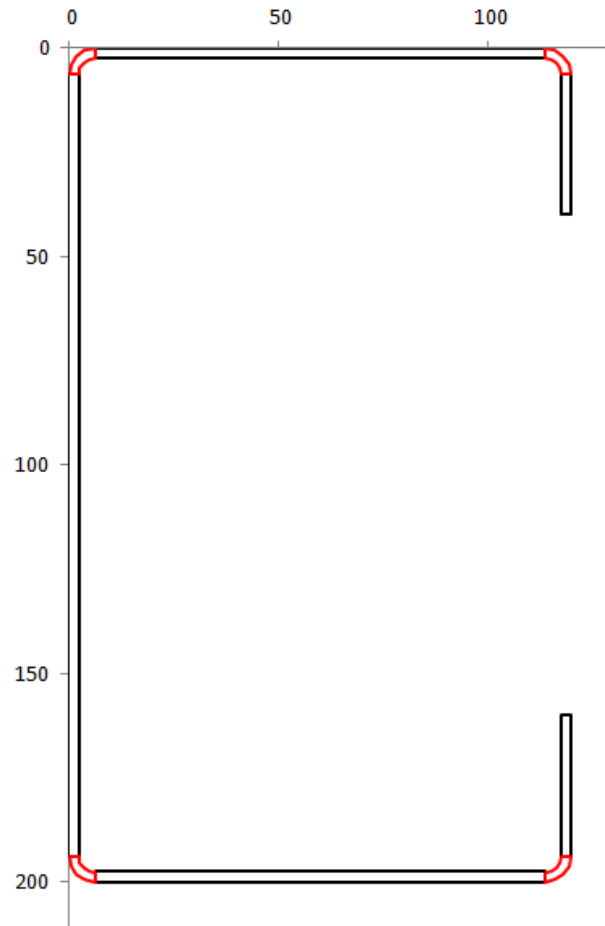
$$I_z = \left[\alpha_2 - \alpha_1 + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \right] (4r_m^2 + t^2) \frac{r_m t}{8} - A (y_G - y_0)^2$$

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

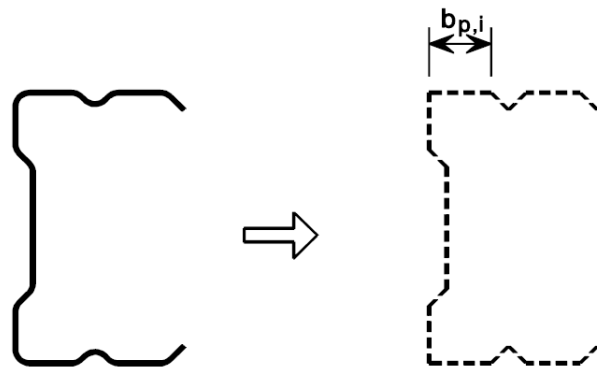


Vedi file Instabilità locale, foglio Sezione

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)

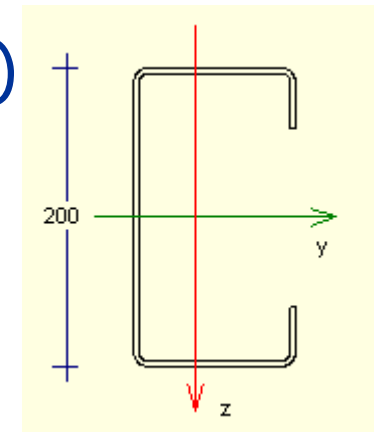
$k=5$

$n=4$

$t=2.5 \text{ mm}$

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

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

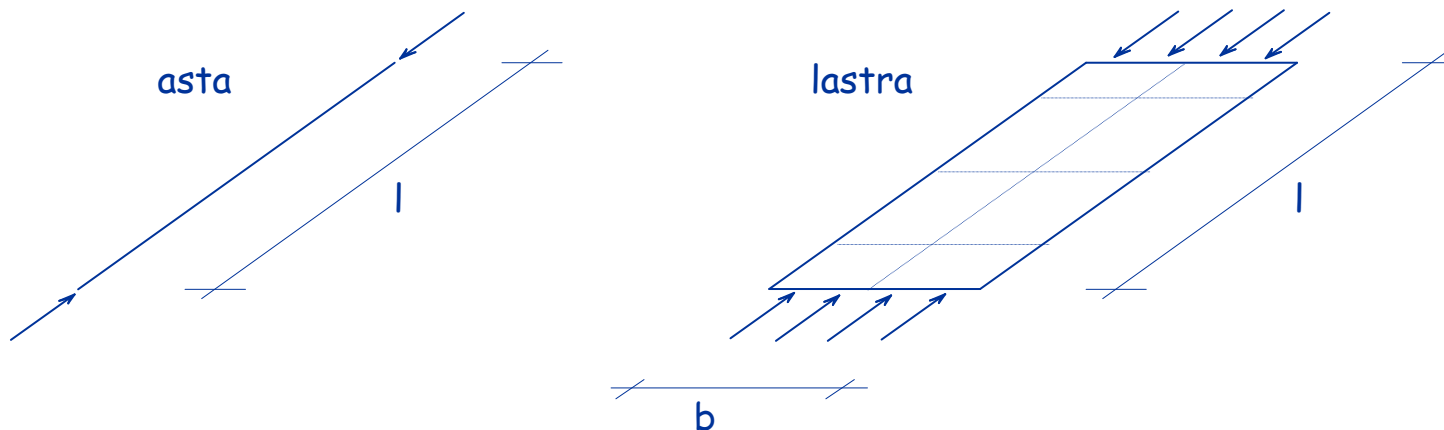
- bassa rigidezza torsionale
 - è dovuta alla piccolezza dello spessore ed alla forma quasi sempre aperta della sezione
 - in molti casi il comportamento è ulteriormente peggiorato dalla mancanza di assi di simmetria
- ridotta resistenza al rifollamento nei collegamenti bullonati
 - porta problemi alla 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

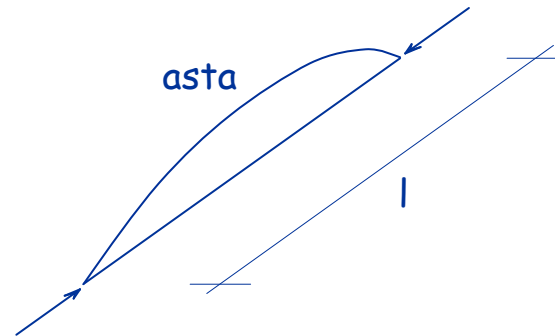
lastra elemento bidimensionale
vincolata lungo i bordi in modo da consentire
spostamenti solo nella direzione del carico



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

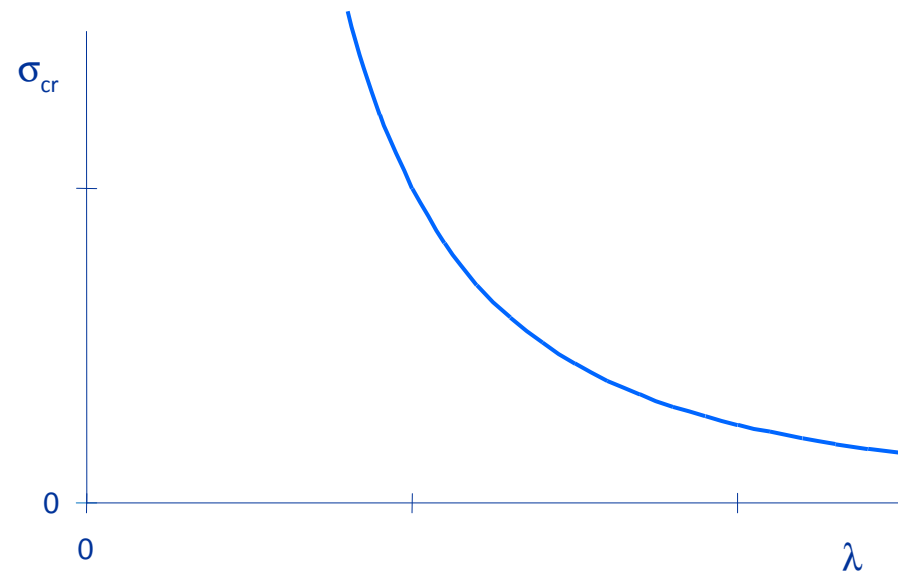
asta ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

La teoria, sviluppata da Eulero, fornisce

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

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

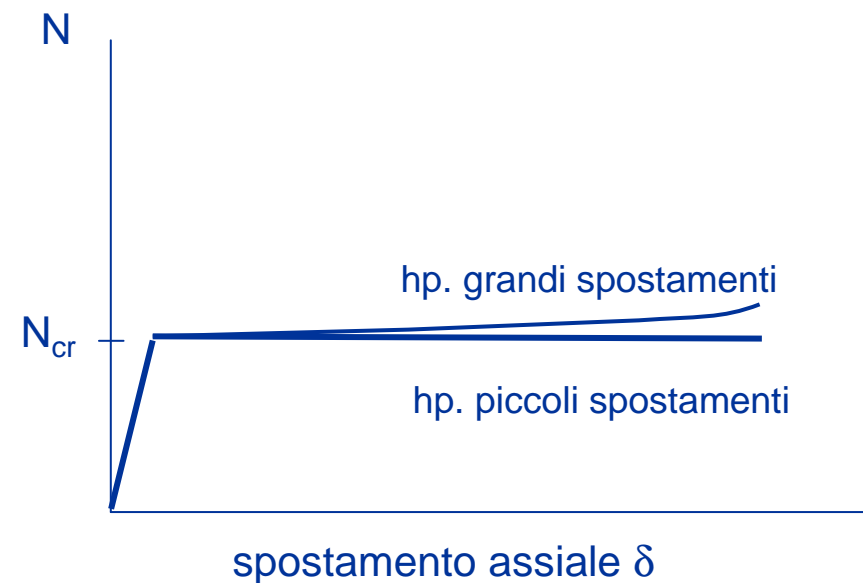
$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \lambda = \frac{l}{i}$$



Comportamento post-critico di un'asta compressa

asta ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

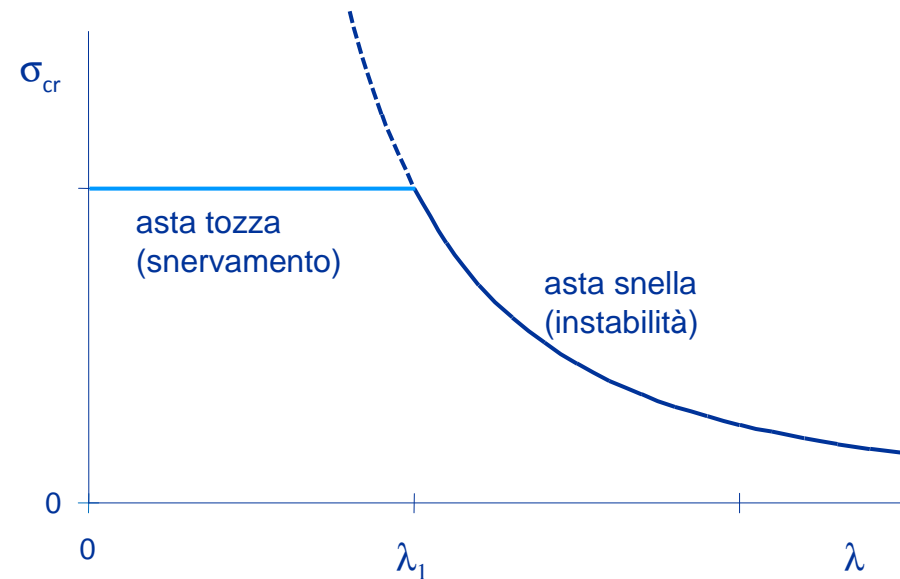
- quando si raggiunge il carico critico si hanno spostamenti trasversali molto grandi per piccolissimi incrementi di carico
- in pratica il carico non può aumentare ulteriormente e la rigidezza assiale si può considerare nulla



Carico critico di un'asta compressa

asta perfetta ma di materiale elastico-
perfettamente plastico

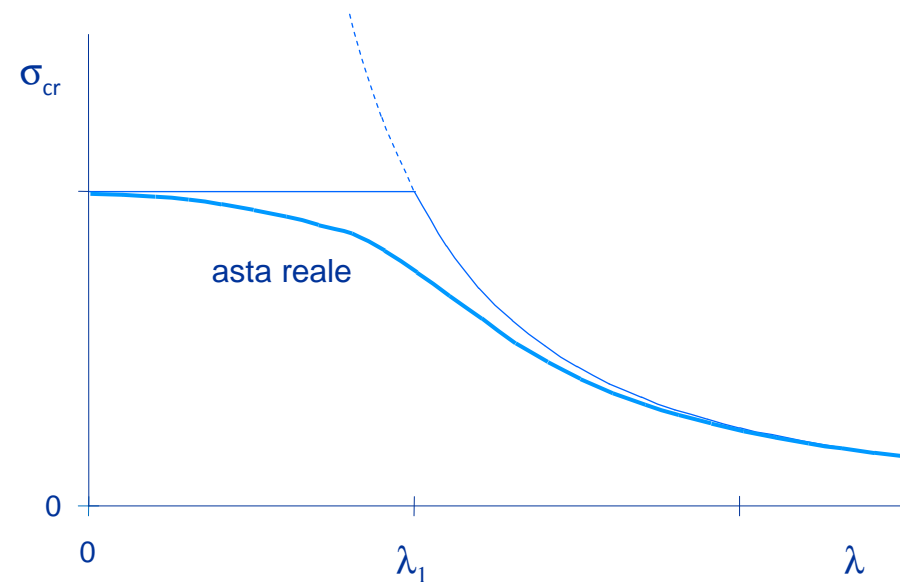
- la tensione critica non può superare la tensione di snervamento
- **aste tozze**: si snervano prima di instabilizzarsi
aste snelle: si instabilizzano in campo elastico
- il limite è costituito dalla snellezza λ_1 che corrisponde alla tensione di snervamento $\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$



Carico critico di un'asta compressa

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

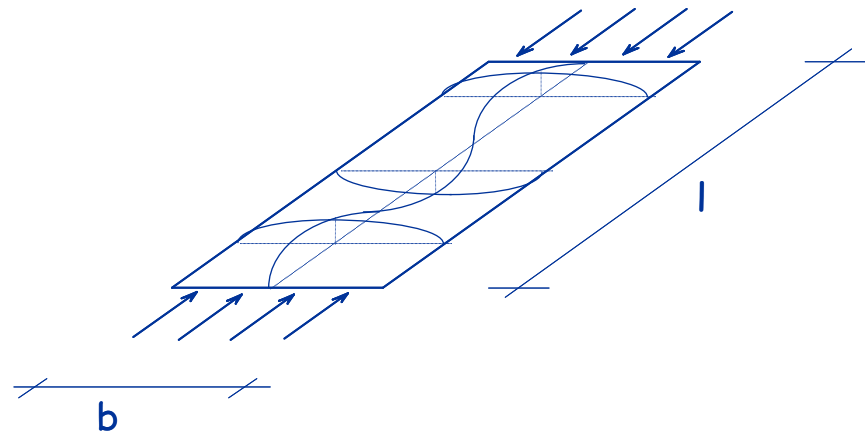
- la tensione critica è minore di quella che si avrebbe nel caso di asta perfetta
- il comportamento post-critico è comunque analogo a quello dell'asta perfetta



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

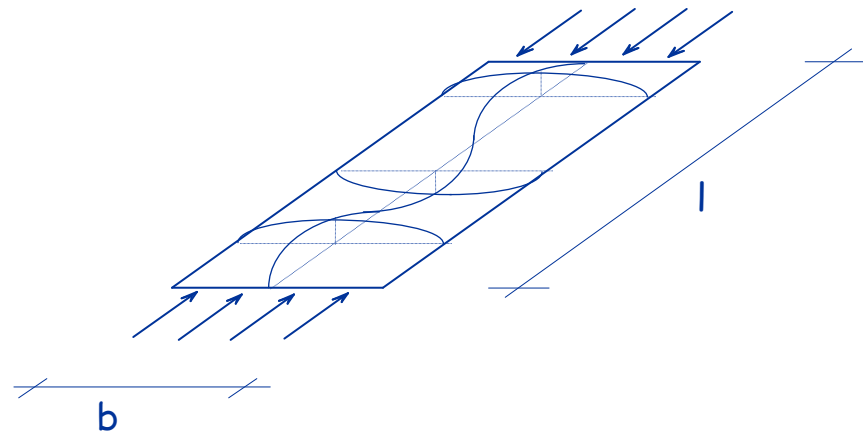
$$N_{cr} = \frac{k \pi^2 E I}{(1 - \nu^2) b^2} = \frac{k \pi^2 E t^3}{12 (1 - \nu^2) b}$$

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

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

m = numero di
semi-onde

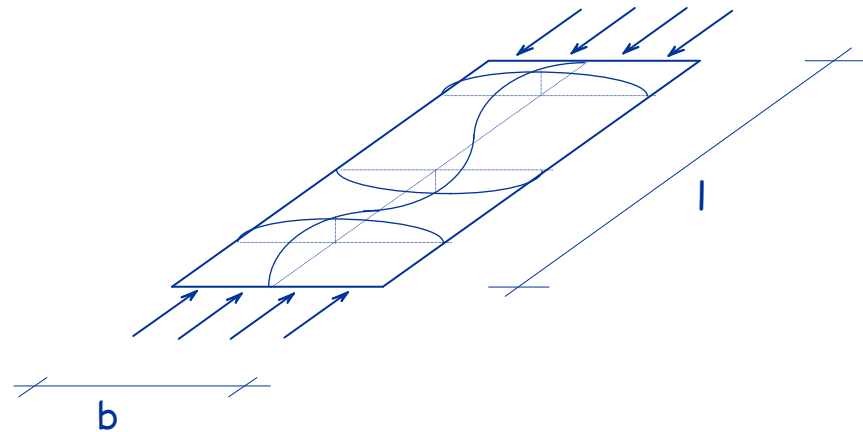
per $l > 4 b$ $k \rightarrow 4$



Comportamento post-critico di una lastra compressa

lastra ideale priva di imperfezioni e costituita da
materiale linearmente elastico

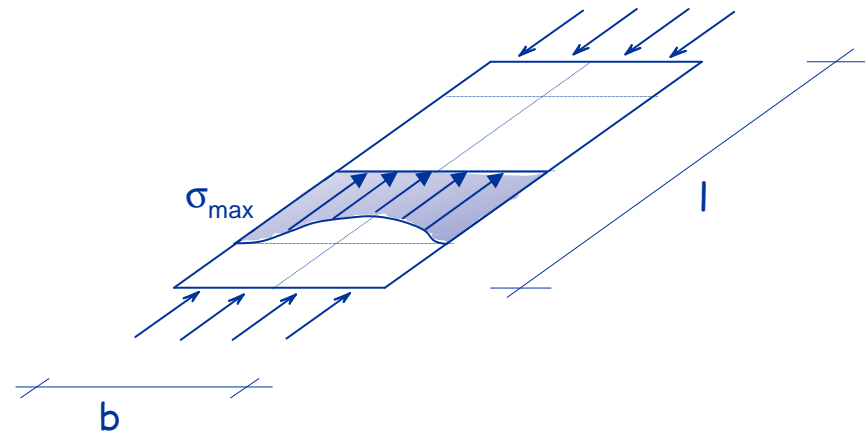
- quando si raggiunge il carico critico lo sbandamento fuori piano causa l'allungamento delle fibre trasversali, che tendono quindi a limitarlo grazie alla loro rigidezza estensionale
- per questo motivo:
 - è possibile aumentare ulteriormente il carico



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	

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

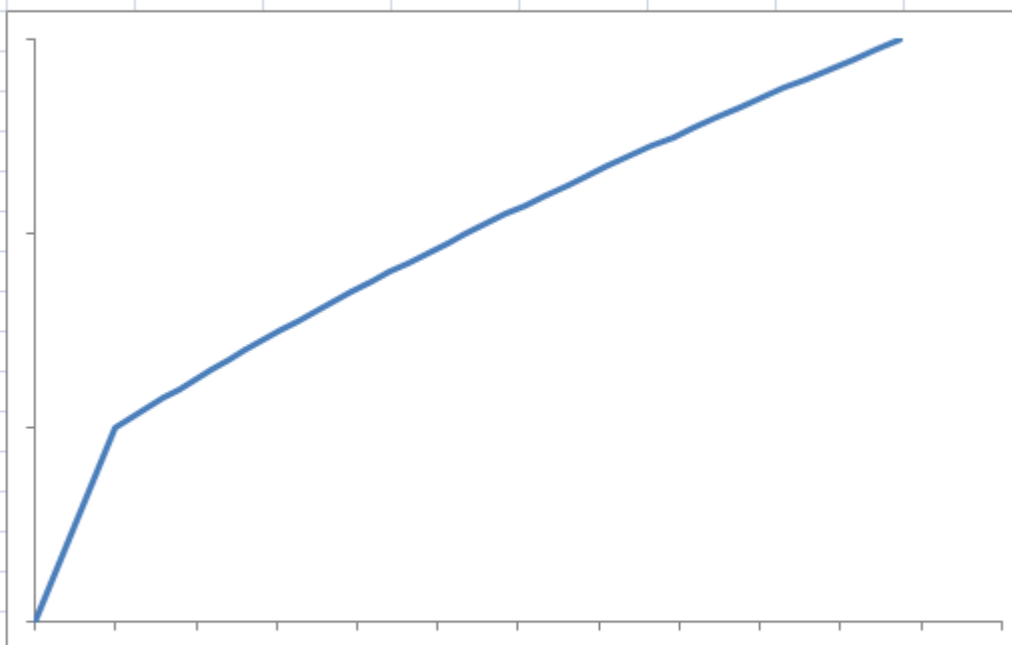


Diagramma di N/N_{cr} in funzione di σ_{max}/σ_{cr}

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)

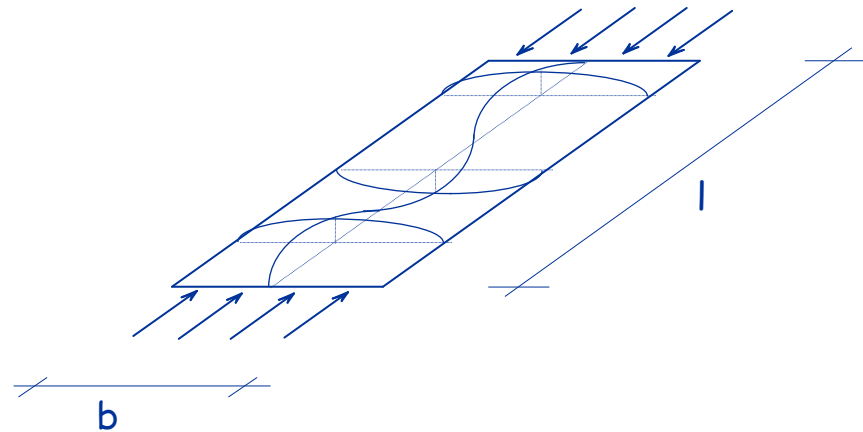
la pendenza (rigidezza) post-critica è qui circa il 20% di quella elastica

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

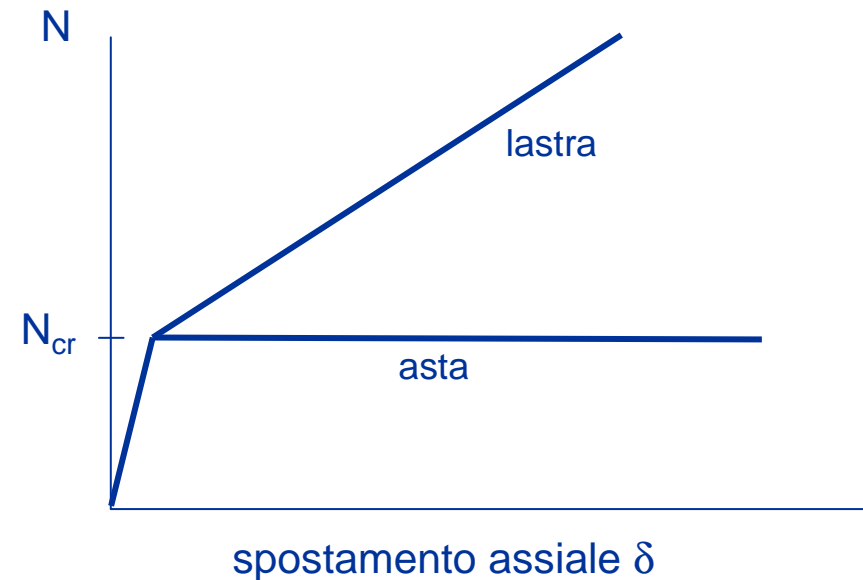
- quando si raggiunge il carico critico lo sbandamento fuori piano causa l'allungamento delle fibre trasversali, che tendono quindi a limitarlo grazie alla loro rigidità estensionale
- per questo motivo:
 - è possibile aumentare ulteriormente il carico
 - la rigidità assiale della lastra si riduce (fino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

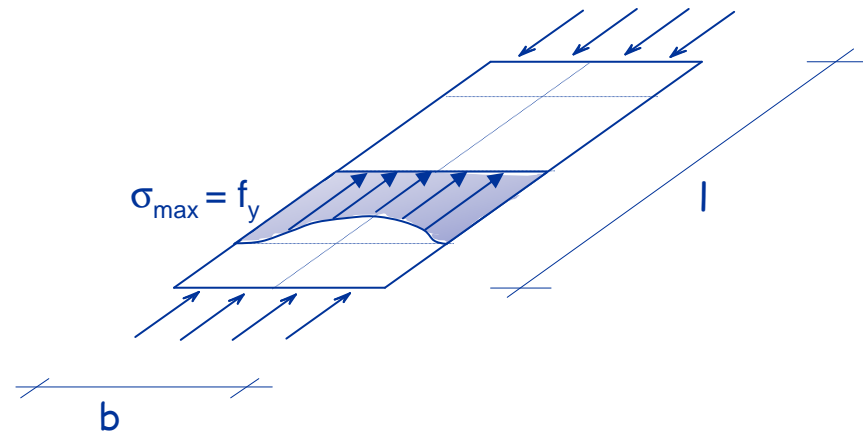
lastra perfetta ma di materiale elastico-
perfettamente plastico

- 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

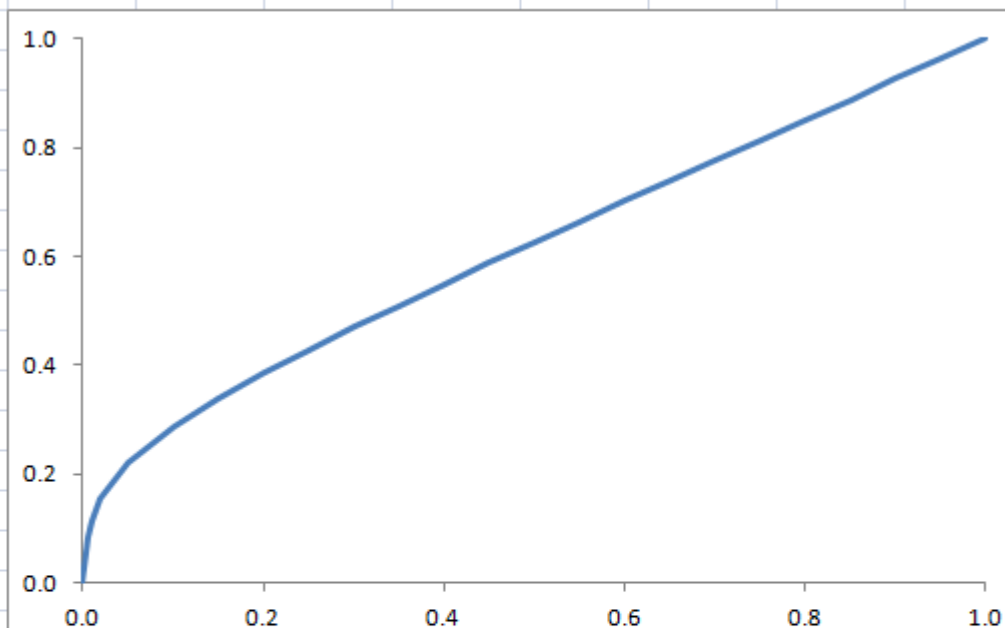


Diagramma di Nult/Ny in funzione di Ncr/Ny

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

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

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

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

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

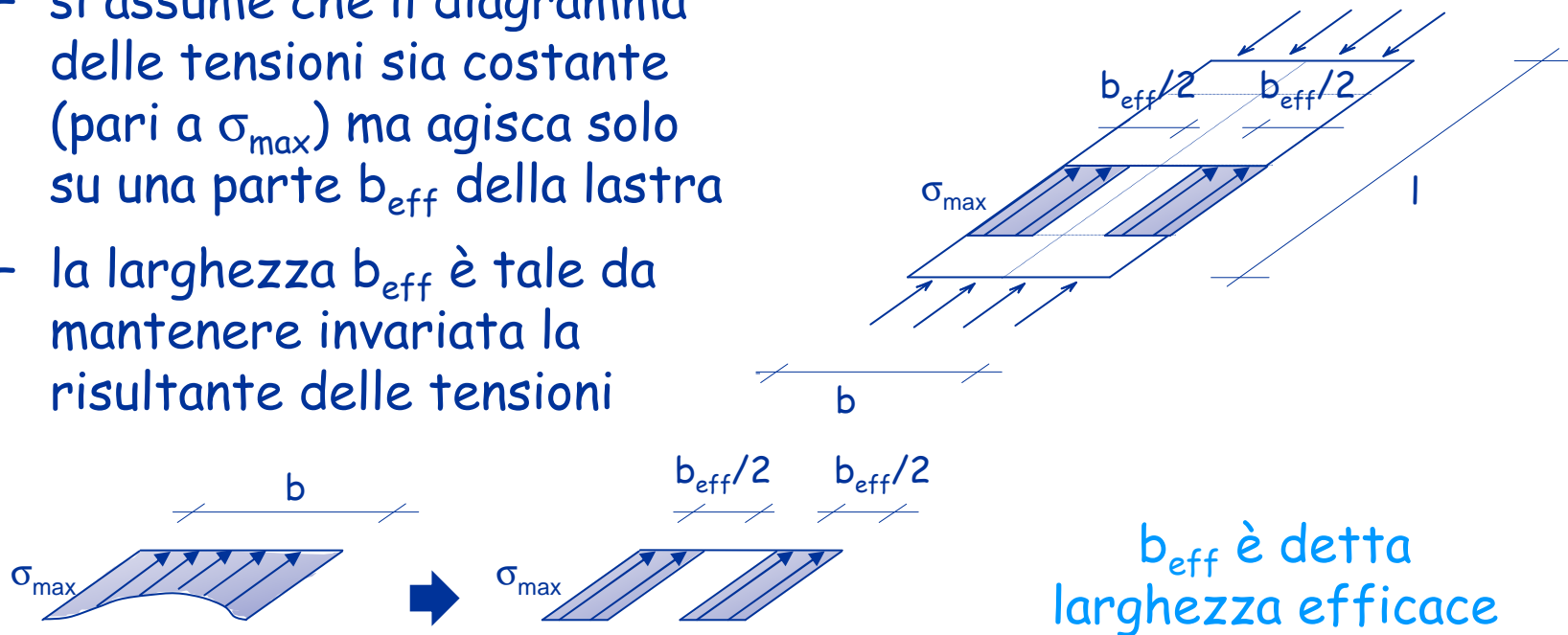
$$\frac{N_{ult}}{N_y} = \frac{N_{cr}}{N_y} \left[-2.683 + \sqrt{11.639 + \frac{1.923}{N_{cr}/N_y}} \right]$$

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



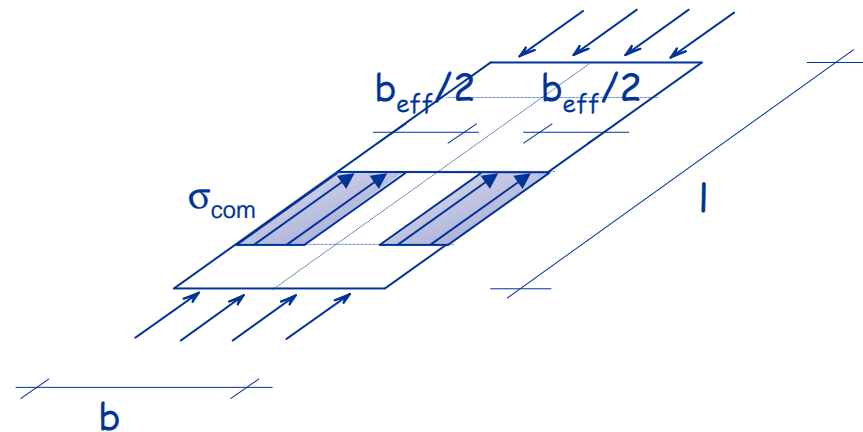
Comportamento post-critico di una lastra compressa

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

lastra reale, con imperfezioni:

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

– internal compression elements:

$$\rho = 1,0$$

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

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

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

– outstand compression elements:

$$\rho = 1,0$$

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

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

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

Eurocodice 3, parte 1-5, punto 4.4

Indicazioni di normativa

Eurocodice 3, parte 1-5, punto 4.4

Table 4.1: Internal compression elements

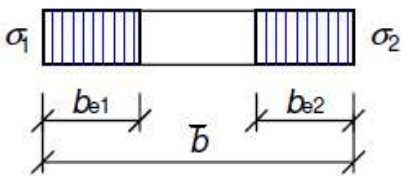
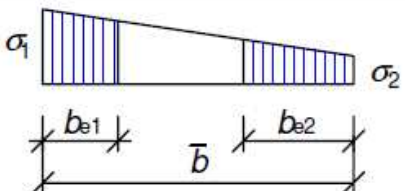
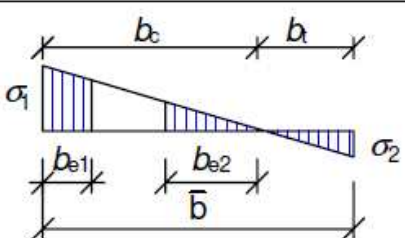
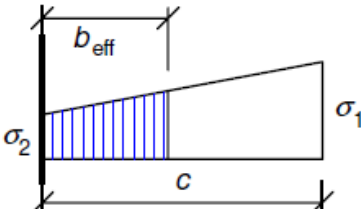
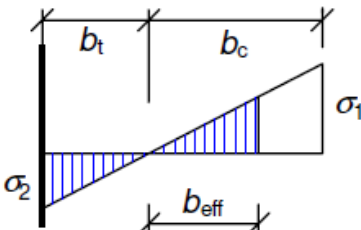
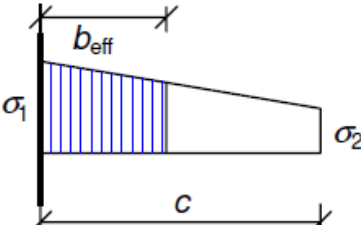
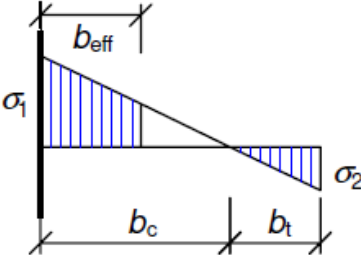
Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	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

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

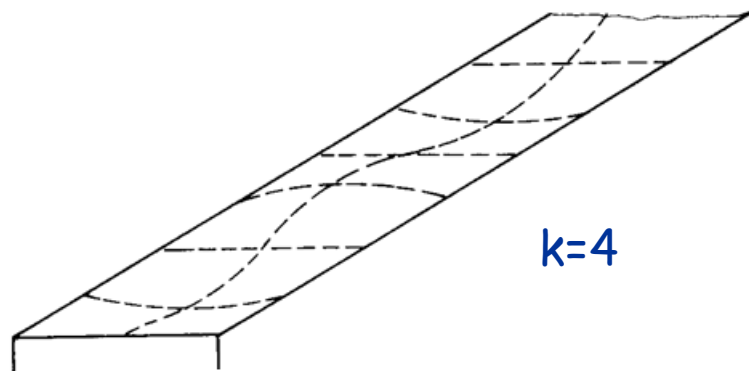
Comportamento post-critico di una lastra compressa

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

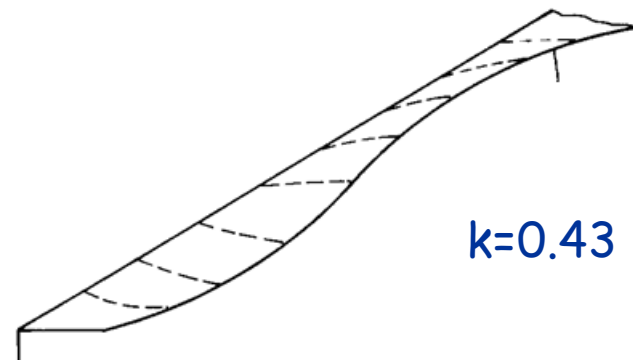
Lastra con un bordo longitudinale libero

- 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

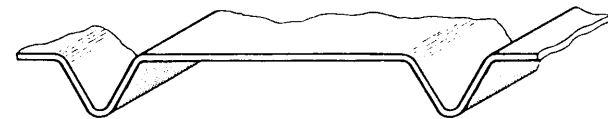
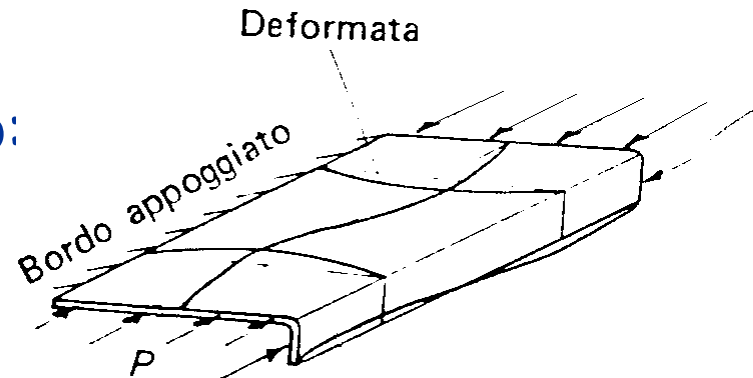
Esempio

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						
fy	235	MPa				fy	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

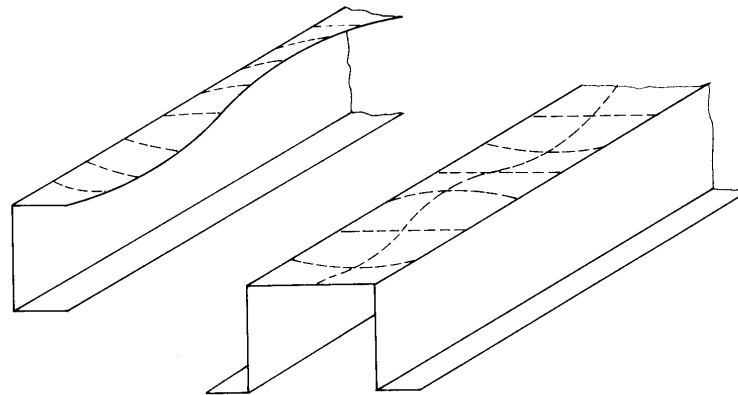


occorre verificare l'efficacia degli irrigidimenti
(controllare che non vadano in carico critico)

Profili sottili

Schematizzazione

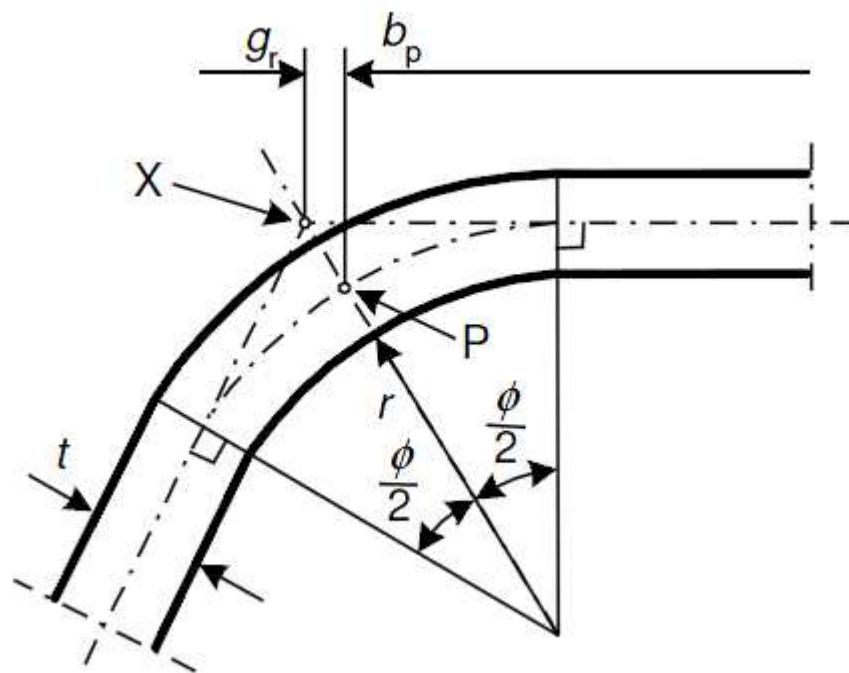
- per l'analisi dell'instabilità locale i profilati a freddo si considerano composti da un insieme di lastre piane mutuamente collegate lungo i bordi comuni



- 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

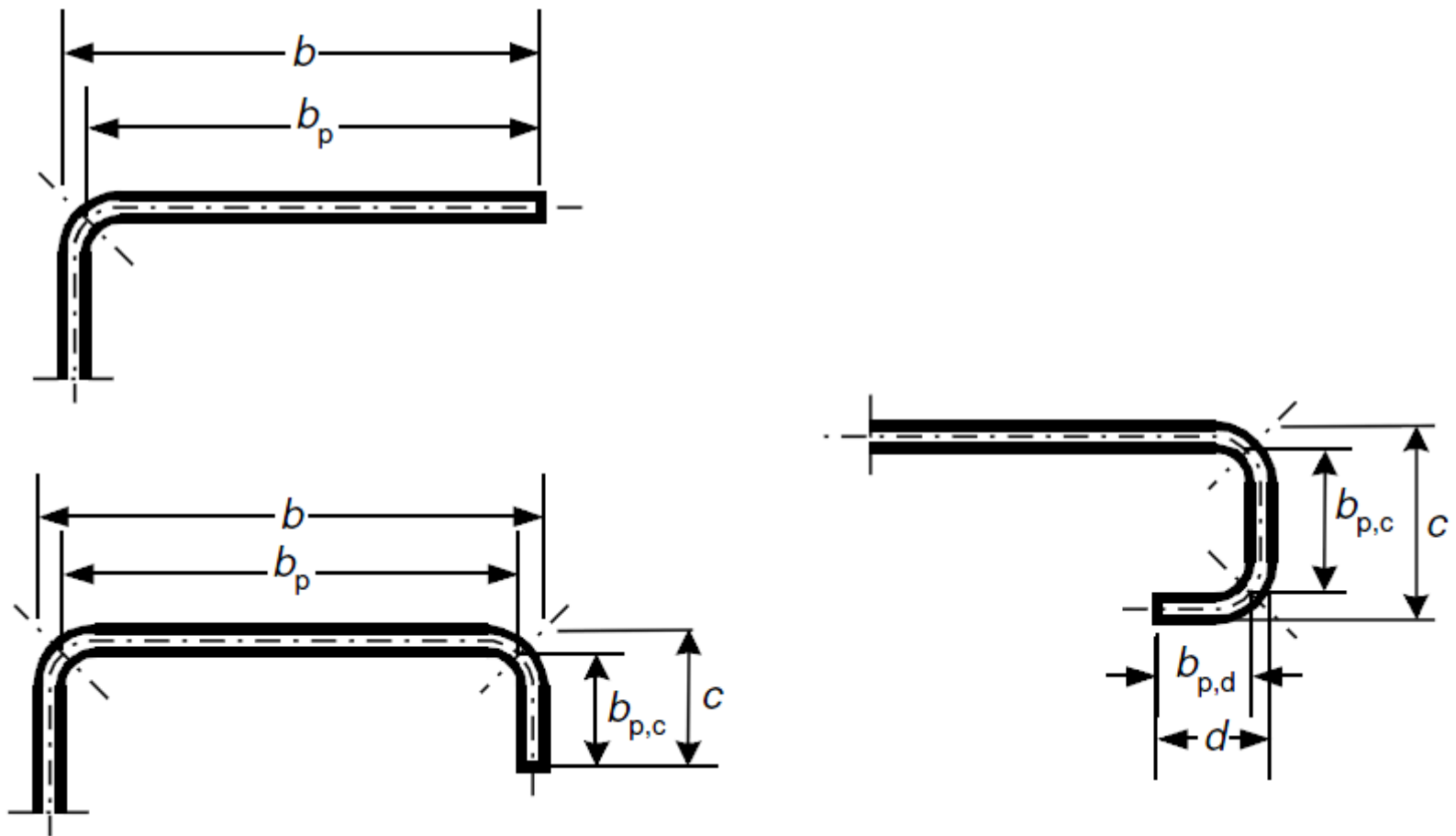
P punto medio del raccordo

$$r_m = r + t/2$$

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

Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.1

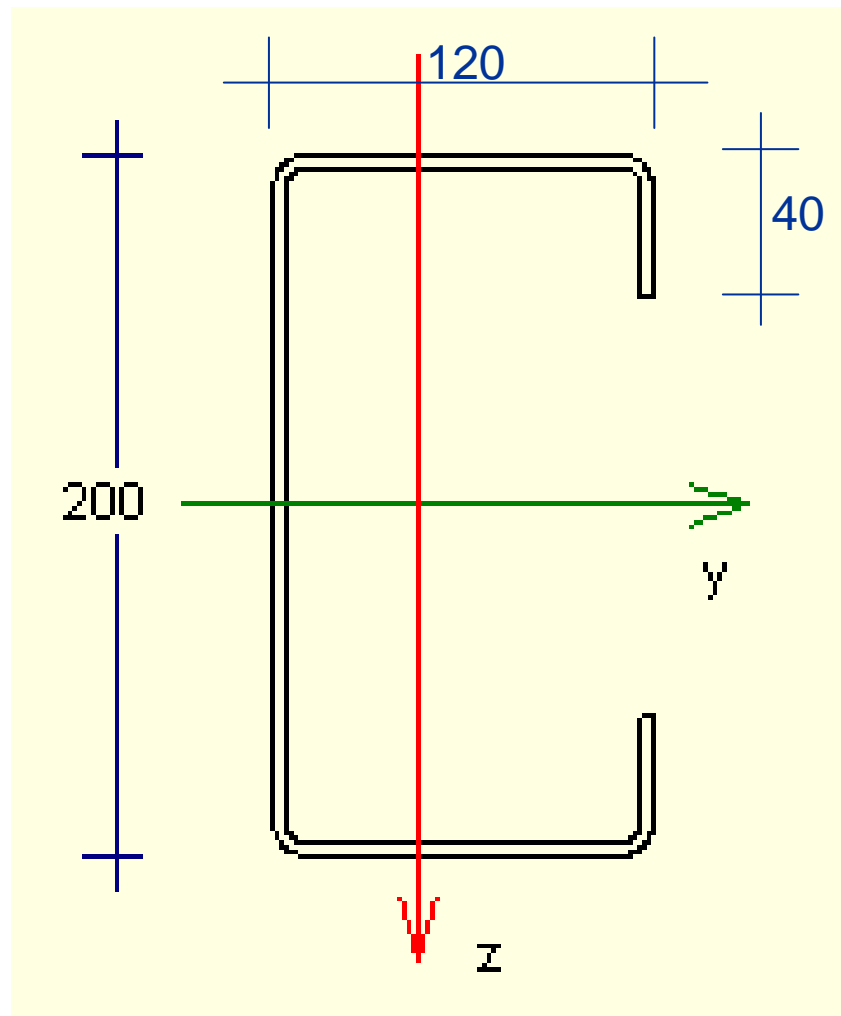
Larghezza



Eurocodice 3, parte 1-3, punto 5.1

Esempio

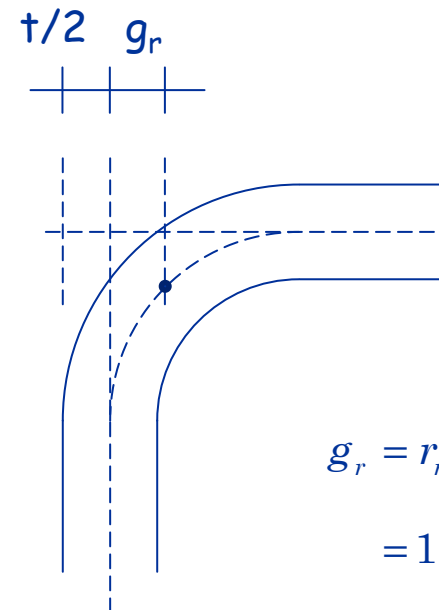
profilo a C 200 x 120 x 2.5



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

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

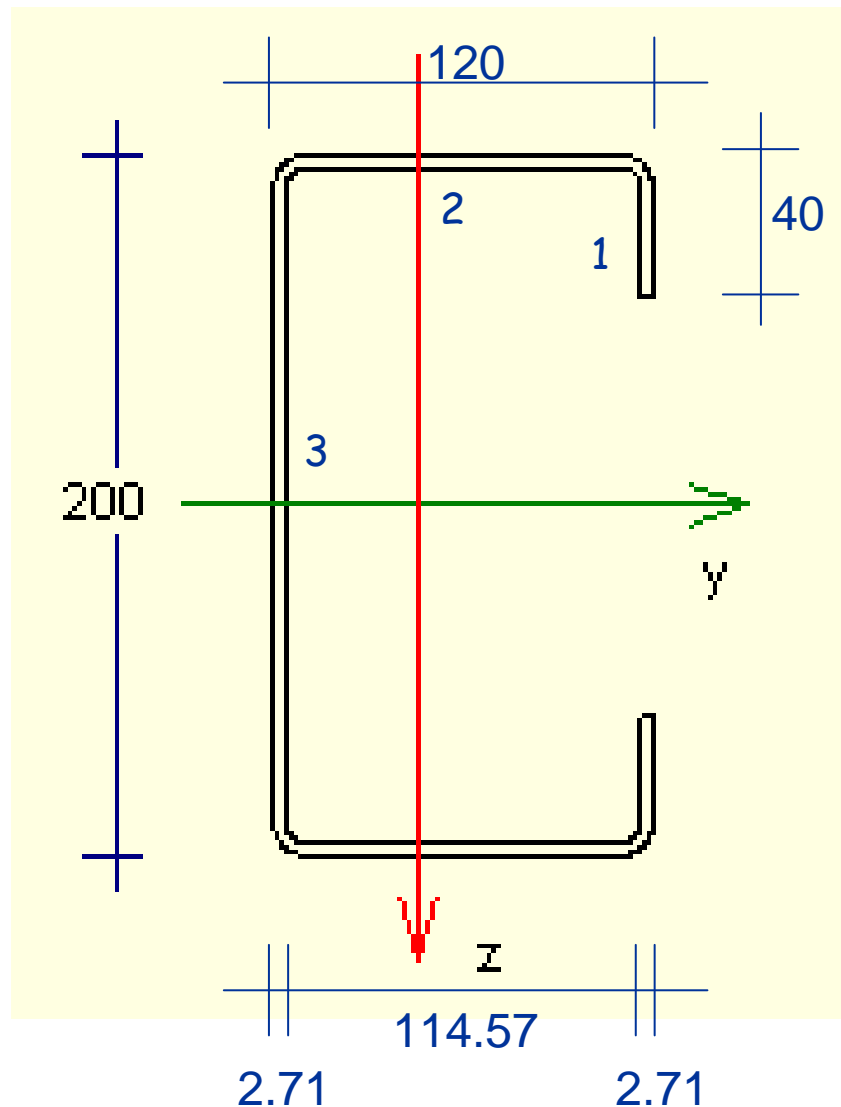
angolo
 $\phi = 90^\circ$



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

Esempio

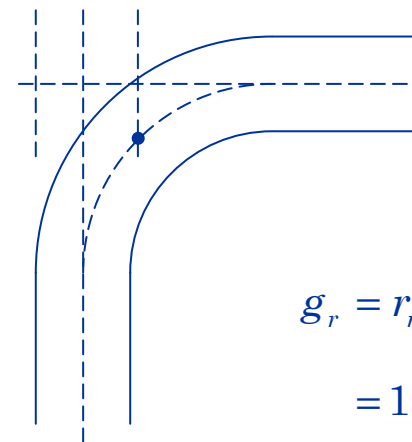
profilo a C 200 x 120 x 2.5



Elemento

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

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

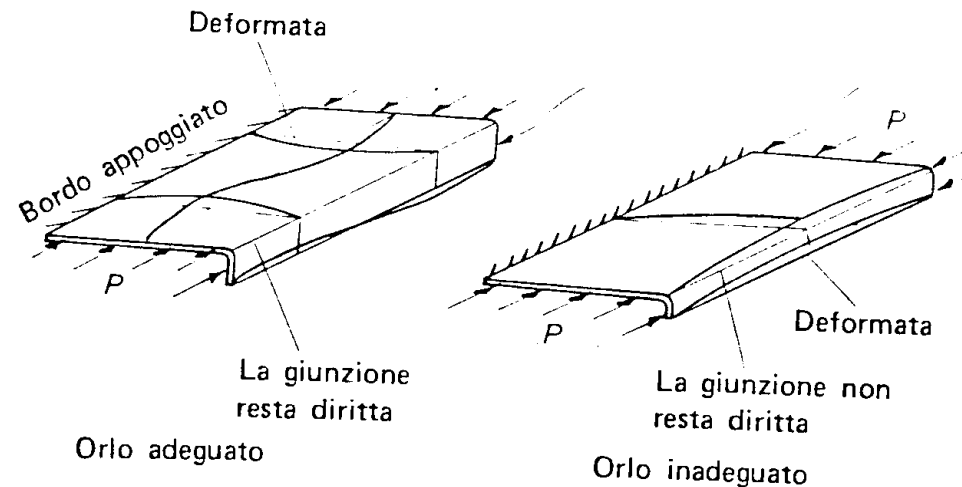


$$g_r = r_m \left(\tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right) = 1.464 \text{ mm}$$

Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

Efficacia degli irrigidimenti di bordo

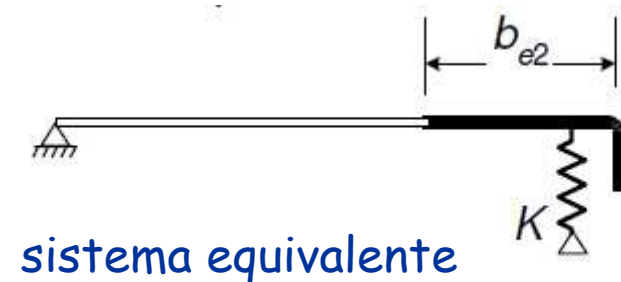
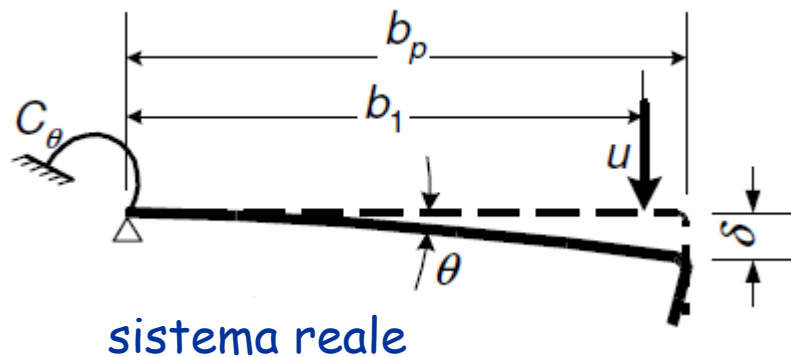
- Un elemento vincolato da un irrigidimento fornisce la stessa resistenza di un elemento con bordo fisso solo se l'irrigidimento si mantiene rettilineo



- dimensione c consigliata dell'irrigidimento di bordo affinché sia efficace:
 $c \geq b / 5$ e $c \leq 10 t$

Efficacia degli irrigidimenti di bordo

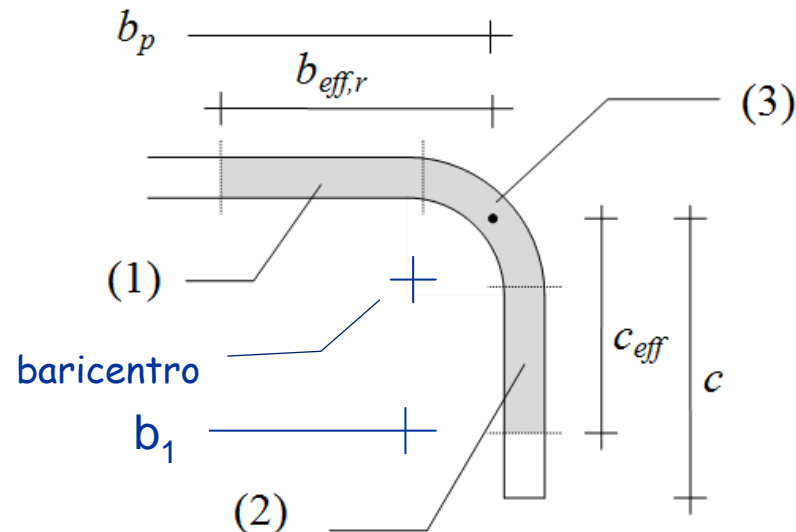
- L'irrigidimento può essere considerato come un'asta compressa, che potrebbe instabilizzarsi; essa è però vincolata elasticamente al resto del profilo (come se fosse quindi un'asta su suolo alla Winkler) e ciò riduce il rischio di instabilità



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

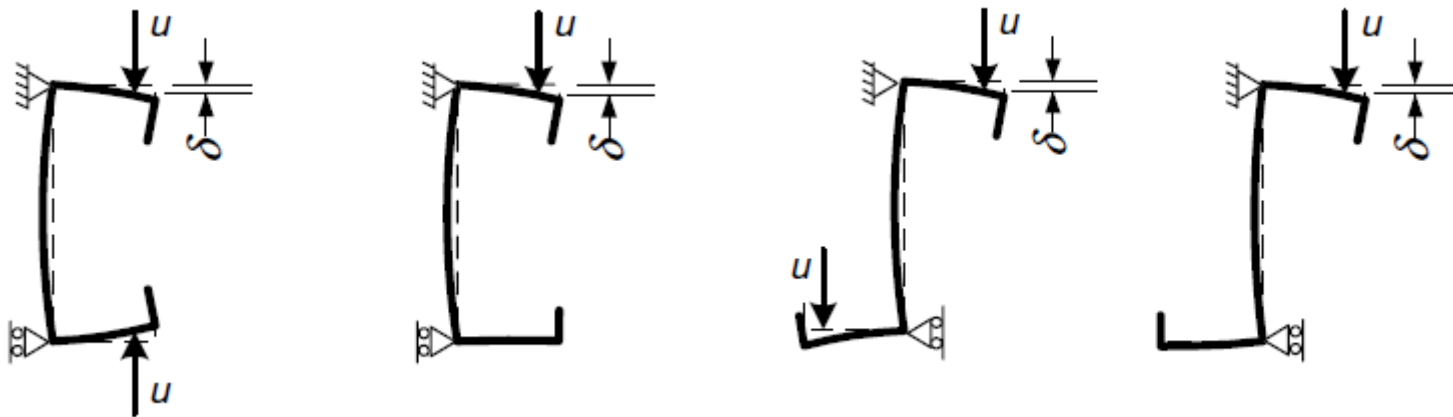
Sezione dell'irrigidimento di bordo

- 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:



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

$$\theta = u b_p / C_\theta$$



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

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)

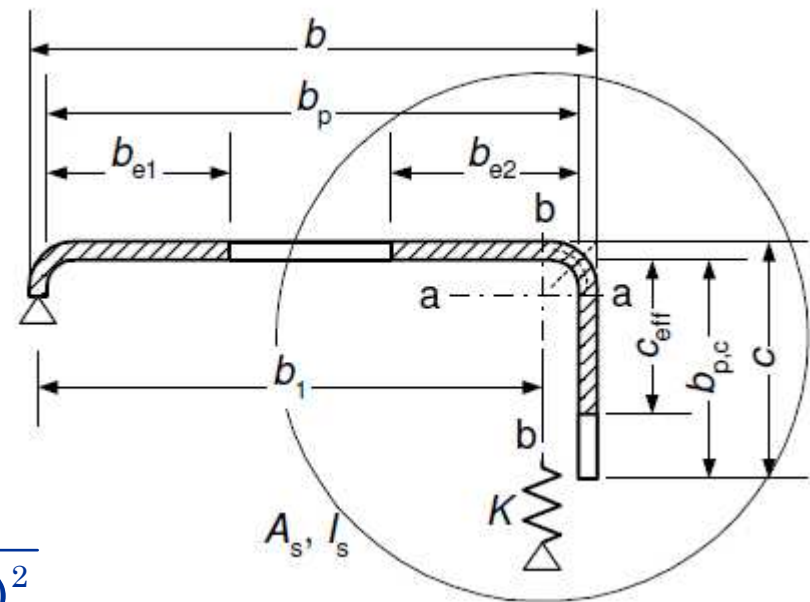
Procedimento

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

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

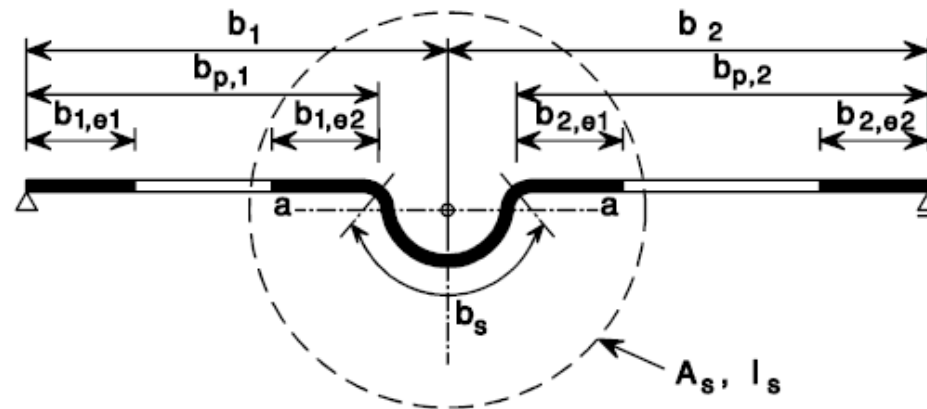
si può assumere che il momento d'inerzia I_s vari nella stessa proporzione e che il baricentro della sezione rimanga inalterato; in pratica si assume che si abbia una riduzione di spessore dell'irrigidimento, cioè $t_{red} = t A_{s,red} / A_s$

- È opportuno iterare il procedimento considerando una nuova tensione massima

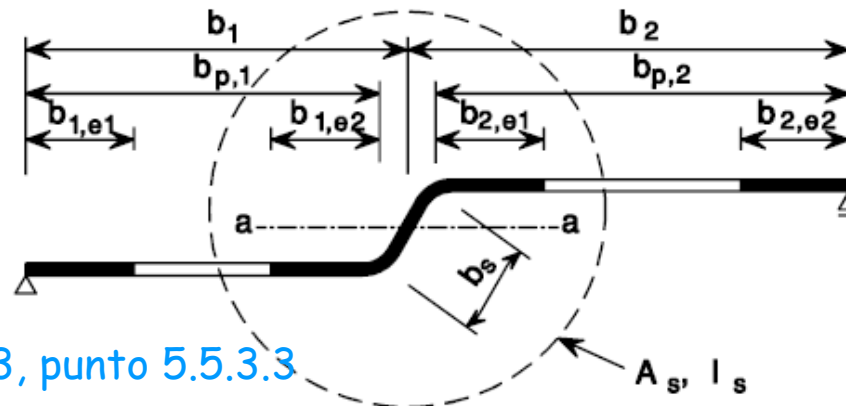
$$\sigma_{com,Ed} = \chi_d f_y / \gamma_{M0}$$

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

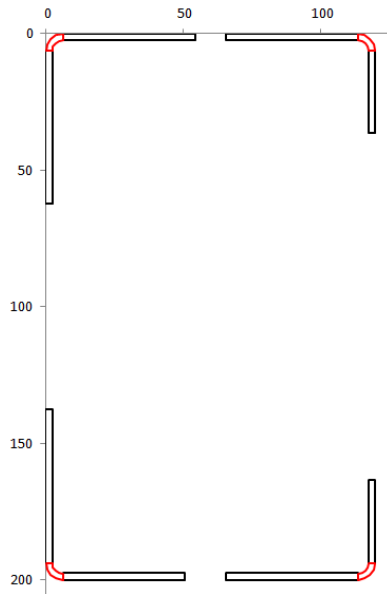
Vedi file Instabilità locale, foglio Profilo C irr

Compressione

in assenza di instabilità dell'asta - esempio

- Sezione C 200x120x2.5 con irrigidimento di bordo

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



Sezione
efficace

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 MPa

geometrical data: Ar = 218,0 mm² Ir = 28453 mm⁴

yGr = 102,56 mm zGr = 190,98 mm

buckling stress: sig cr,s = 291,52 MPa

reduction: lambda = 0,8978 chi = 0,7974 chiR = 0,8373

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

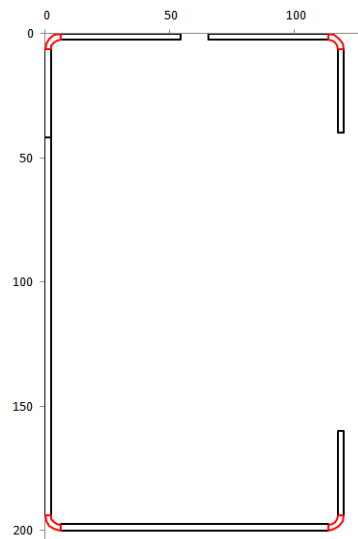
Flessione

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

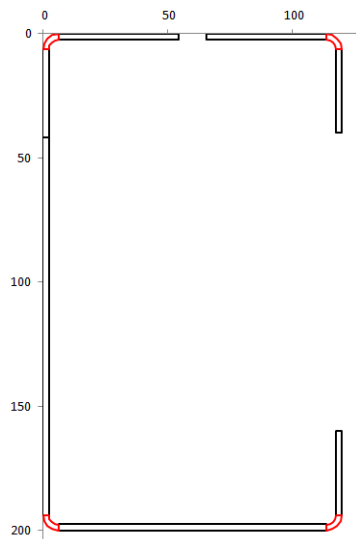
Caratteristica di sollecitazione		2	
(1=compressione, 2= flessione M+)			
posizione asse neutro		z	102.3 mm
ds/dz	2.215 MPa		

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