

Corso di aggiornamento

Elementi strutturali e collegamenti in acciaio

7 - Profili sottili formati a freddo

Villa Redenta, Spoleto

2-4 marzo 2017

Aurelio Ghersi

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

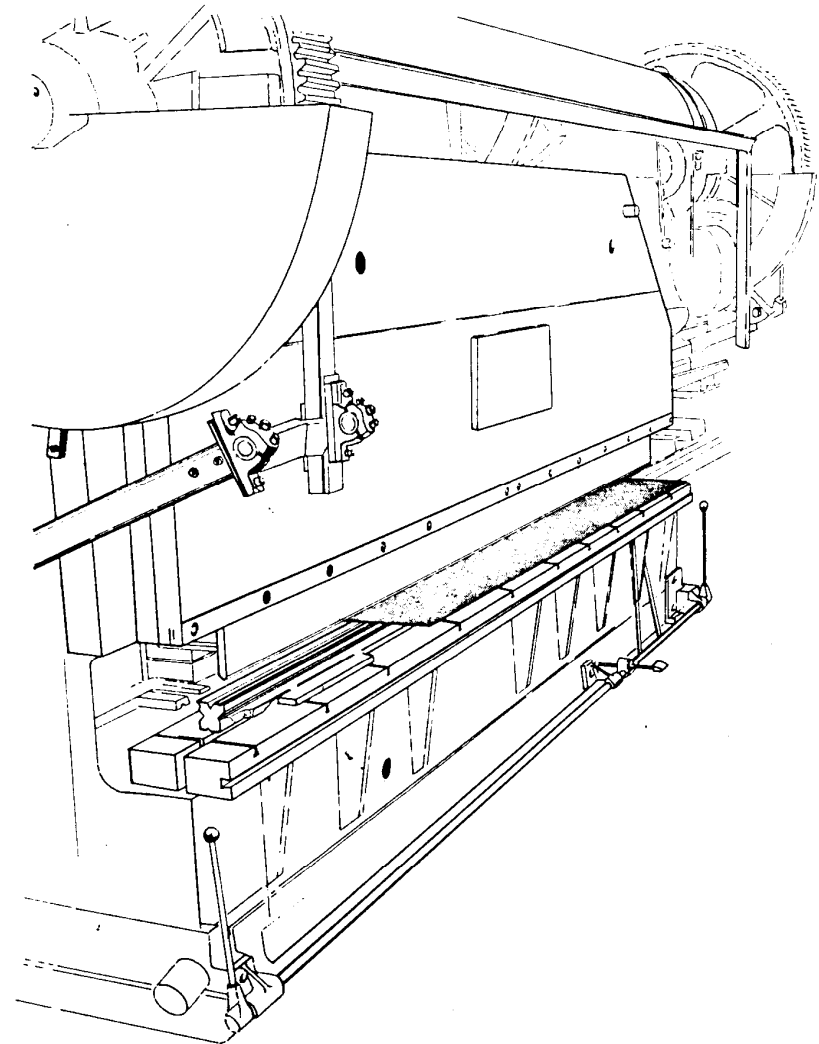
Procedimenti per ottenerli:

1. Stampaggio alla pressa
2. Laminazione a freddo

Come si realizzano

1. Stampaggio alla pressa

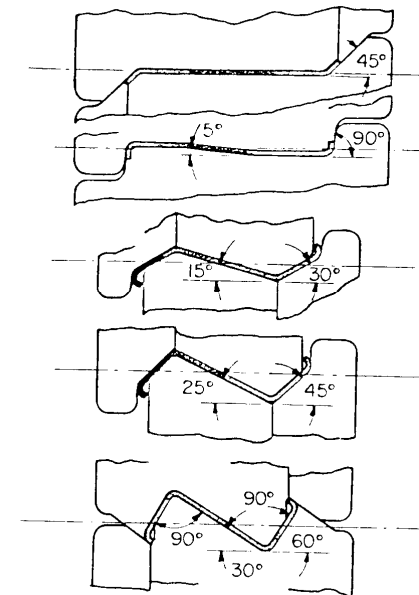
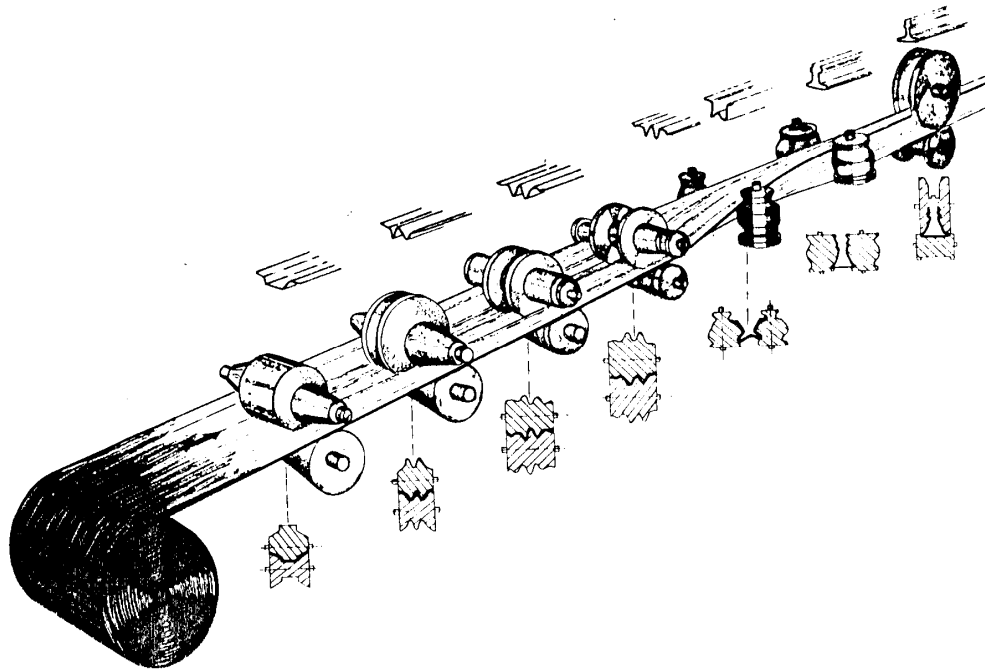
- Il nastro d'acciaio viene pressato, a singoli tratti, su uno stampo



Come si realizzano

2. Laminazione a freddo

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



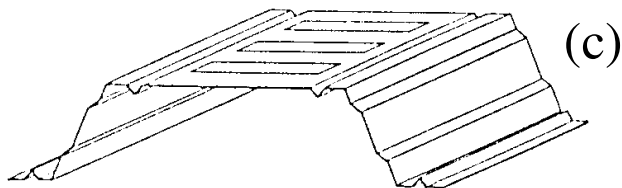
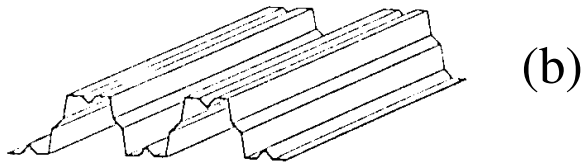
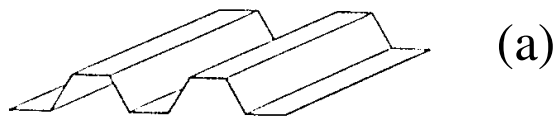
Come si realizzano

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 $0.5 \leq t \leq 4.0 \text{ mm}$

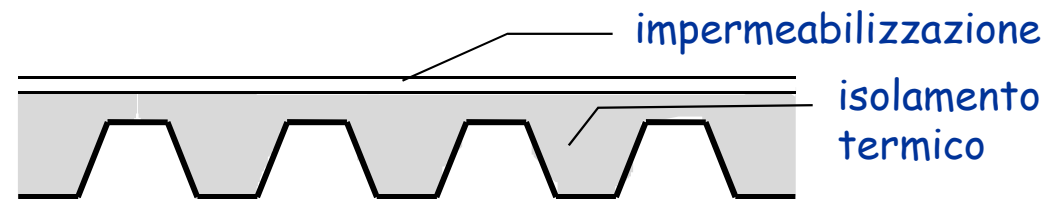


- massima luce per le tipologie usuali:
da 1.50 m a 3.00 m
- richiedono quindi travi secondarie (arcarecci)
- dimensioni della greca molto maggiori consentono di evitare le travi secondarie

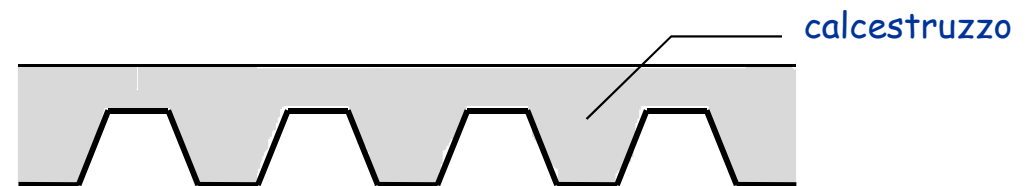
Elementi prodotti mediante formatura a freddo

- 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)

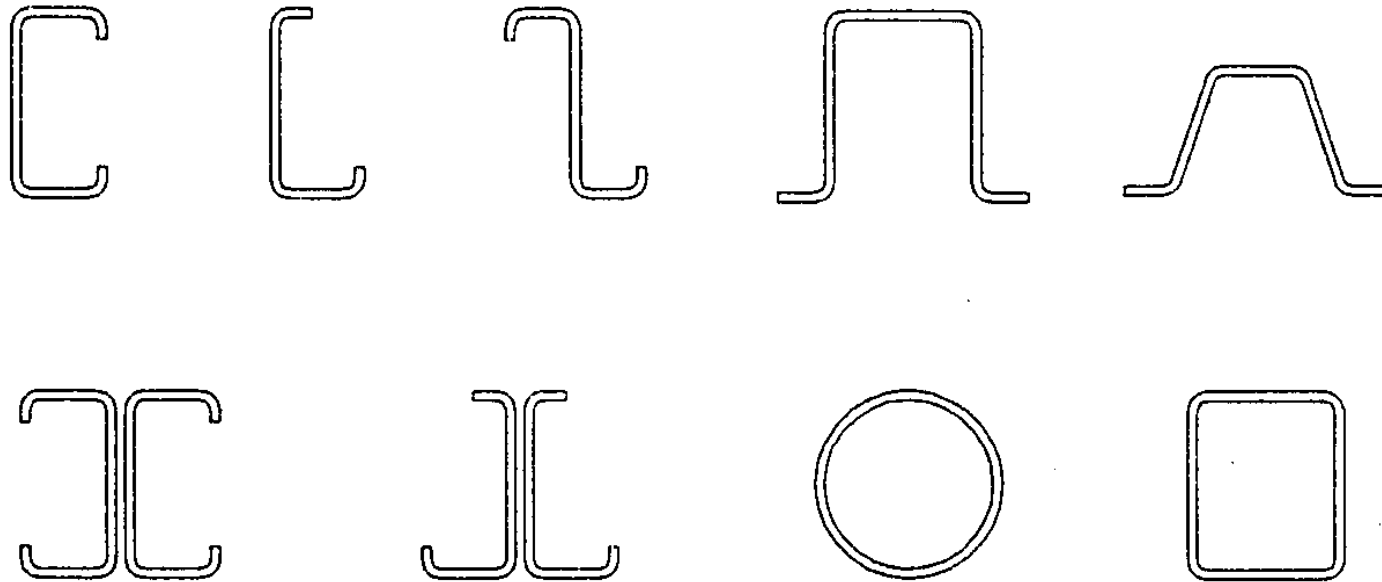


- oppure per solai praticabili (in genere con soletta in calcestruzzo, eventualmente armata con una rete)



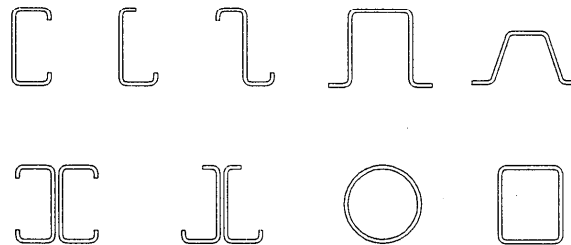
Elementi prodotti mediante formatura a freddo

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



Elementi prodotti mediante formatura a freddo

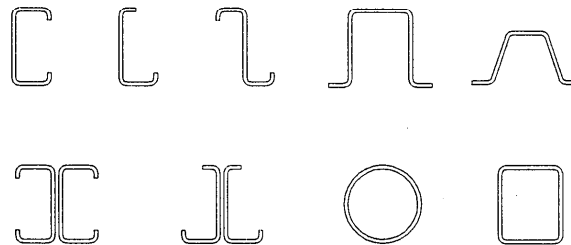
- Elementi strutturali spessore t $1.0 \leq t \leq 8.0$ mm



- 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

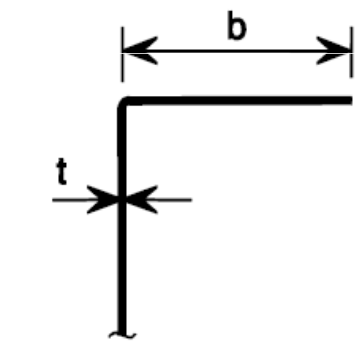
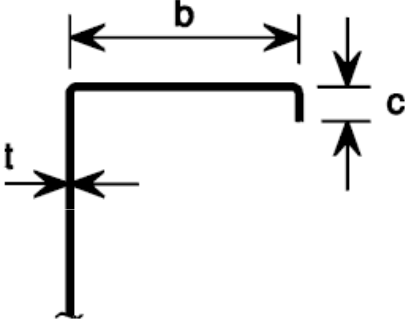
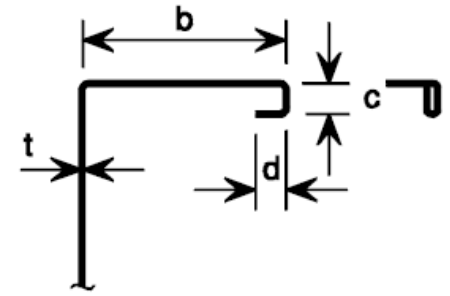
- Elementi strutturali spessore t $1.0 \leq t \leq 8.0$ mm



- 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

$k=0.35$

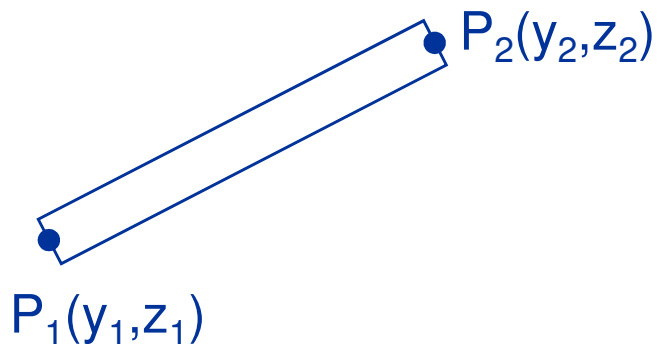
$$t_{rid} = \left(\frac{6.0 + 0.35 \times 4.0}{6.0 + 0.5 \times 4.0} \right) \times 4.0 = 3.7 \text{ mm}$$

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

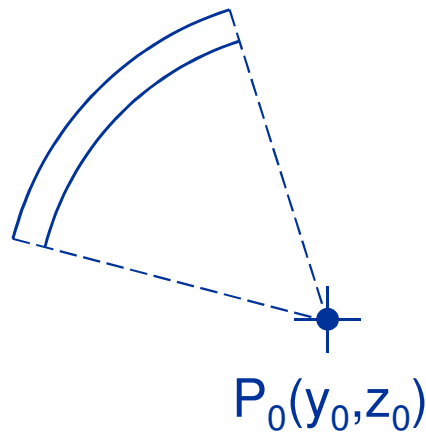
$$l = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

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

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

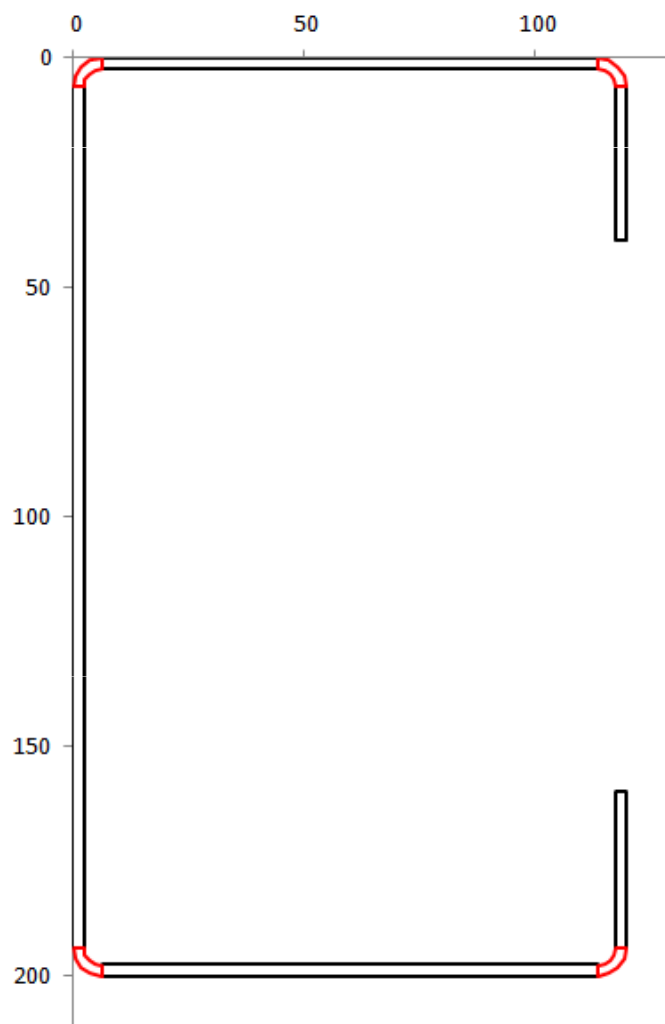
$$y_G = (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \left(r_m^2 + \frac{t^2}{12} \right) \frac{t}{A} + y_0$$

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

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

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

Esempio - sezione C 200x120x2.5



Vedi file Instabilità locale, foglio Sezione

Esempio - sezione C 200x120x2.5

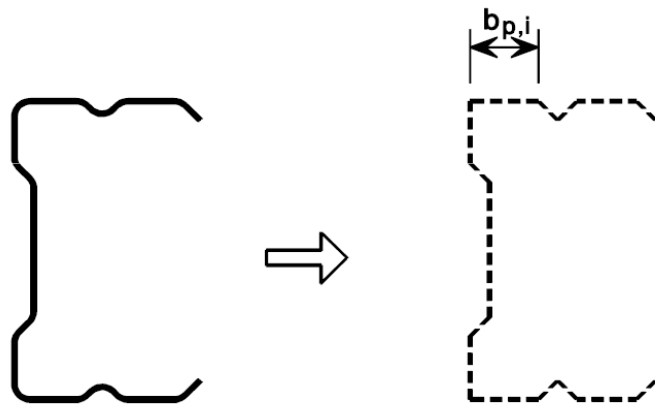
Caratteristiche geometriche di una sezione costituita da rettangoli e raccordi												
				yG	45.9	mm	A	Sy	Sz		lyG	lzG
				zG	100.0	mm	1247.6	124765	57234		8311935	2705494
							mm2	mm3	mm3		mm4	mm4
Rettangoli		Dati		Area, momenti del primo e secondo ordine								
elemento	y1	y2	t	yG	l	A	Sy	Sz	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

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

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)

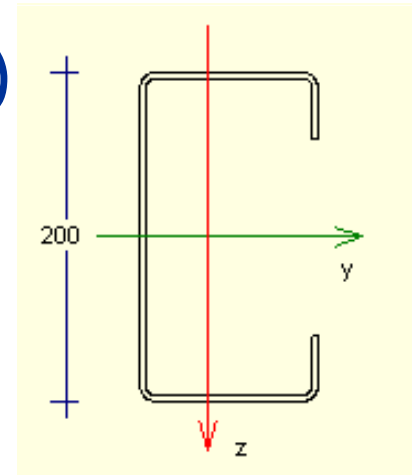
$k=5$

$n=4$

$t=2.5$ mm

$A_g=1247.6$ mm²

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

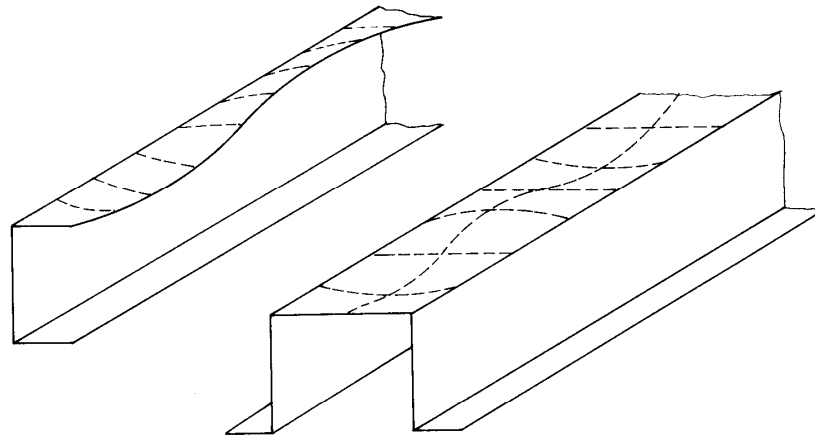
Problemi specifici dei profili sottili

- 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.)

Verifica dei profili sottili

Schematizzazione

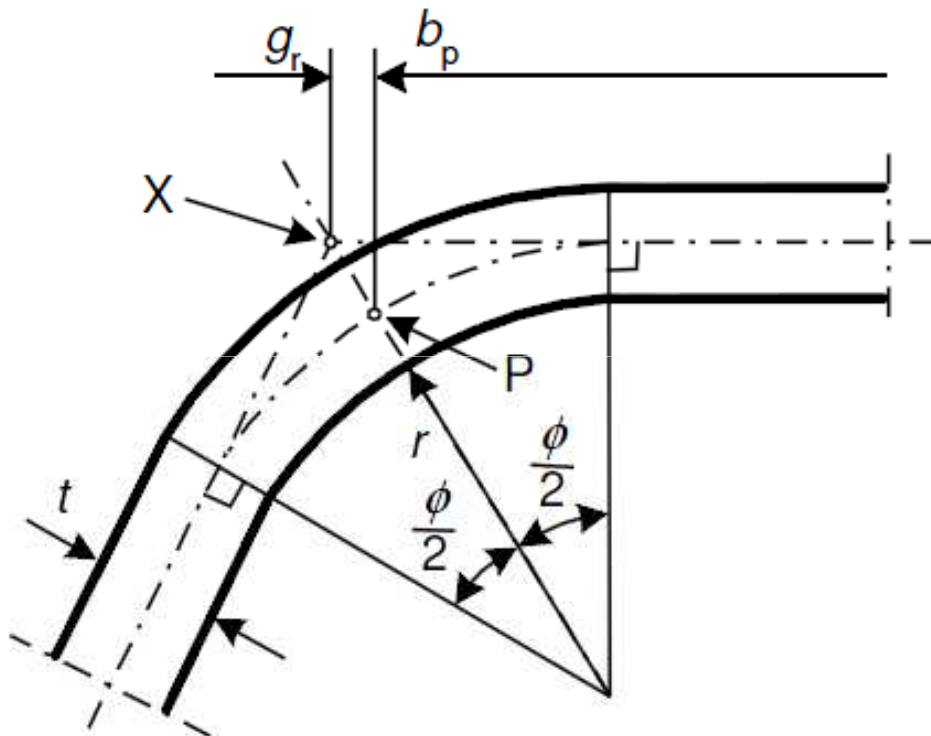
- per l'analisi dell'instabilità locale i profilati a freddo si considerano composti da un insieme di lastre piane mutuamente collegate lungo i bordi comuni



- 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



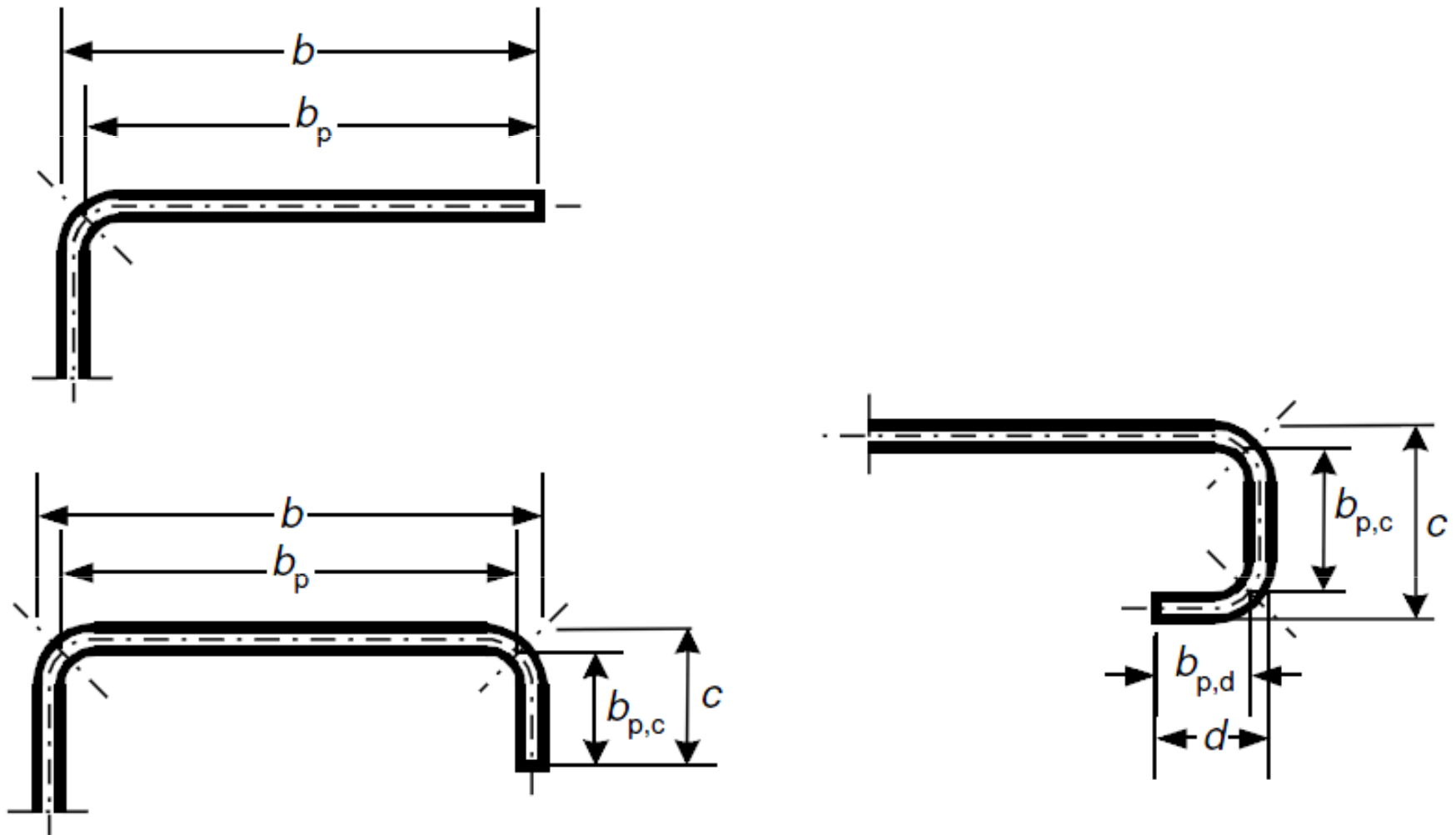
X intersezione delle linee medie

P punto medio del raccordo

$$r_m = r + t/2$$

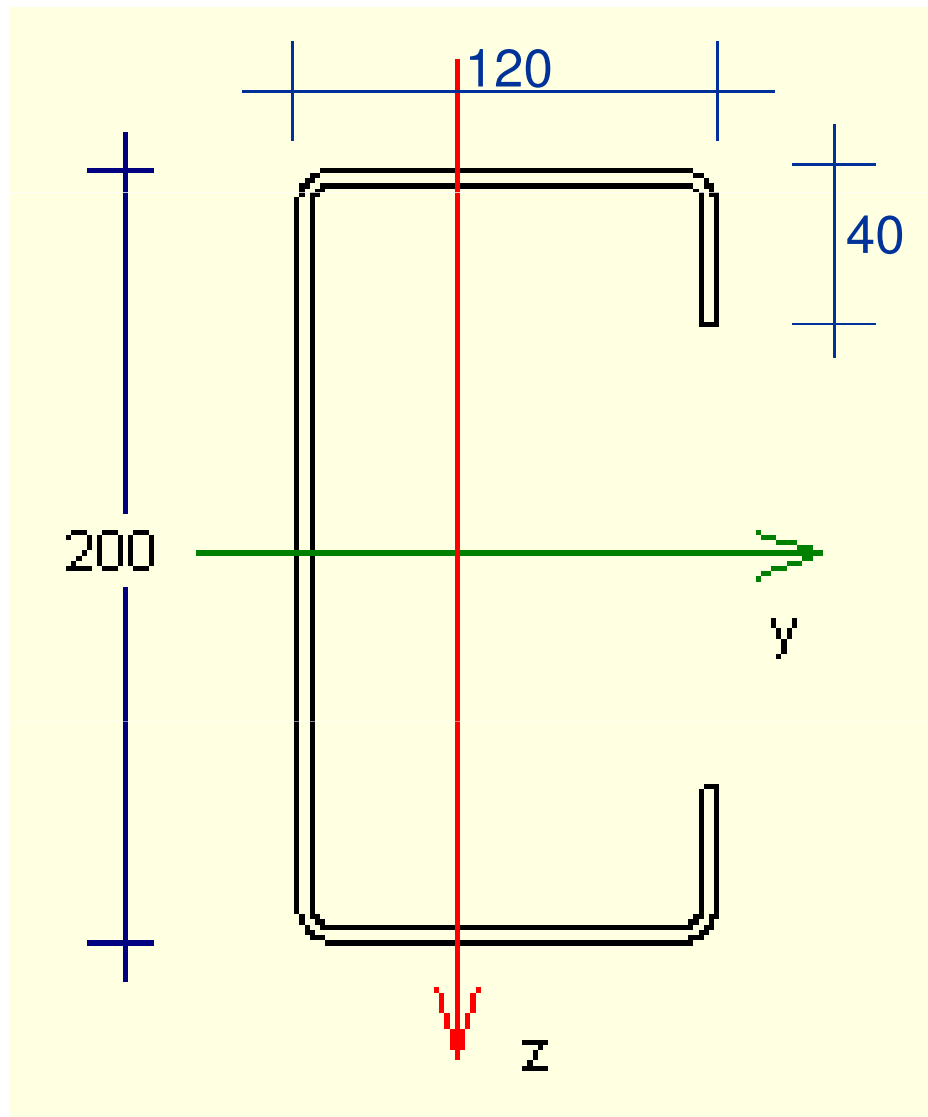
$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)$$

Larghezza



Esempio

profilo a C 200 x 120 x 2.5

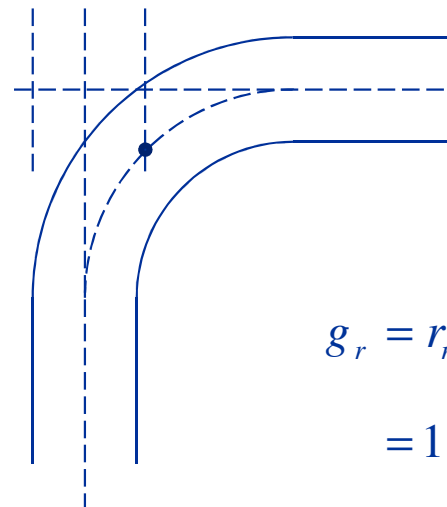


raggio interno di curvatura
 $r = 1.5 t = 3.75 \text{ mm}$

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

angolo
 $\phi = 90^\circ$

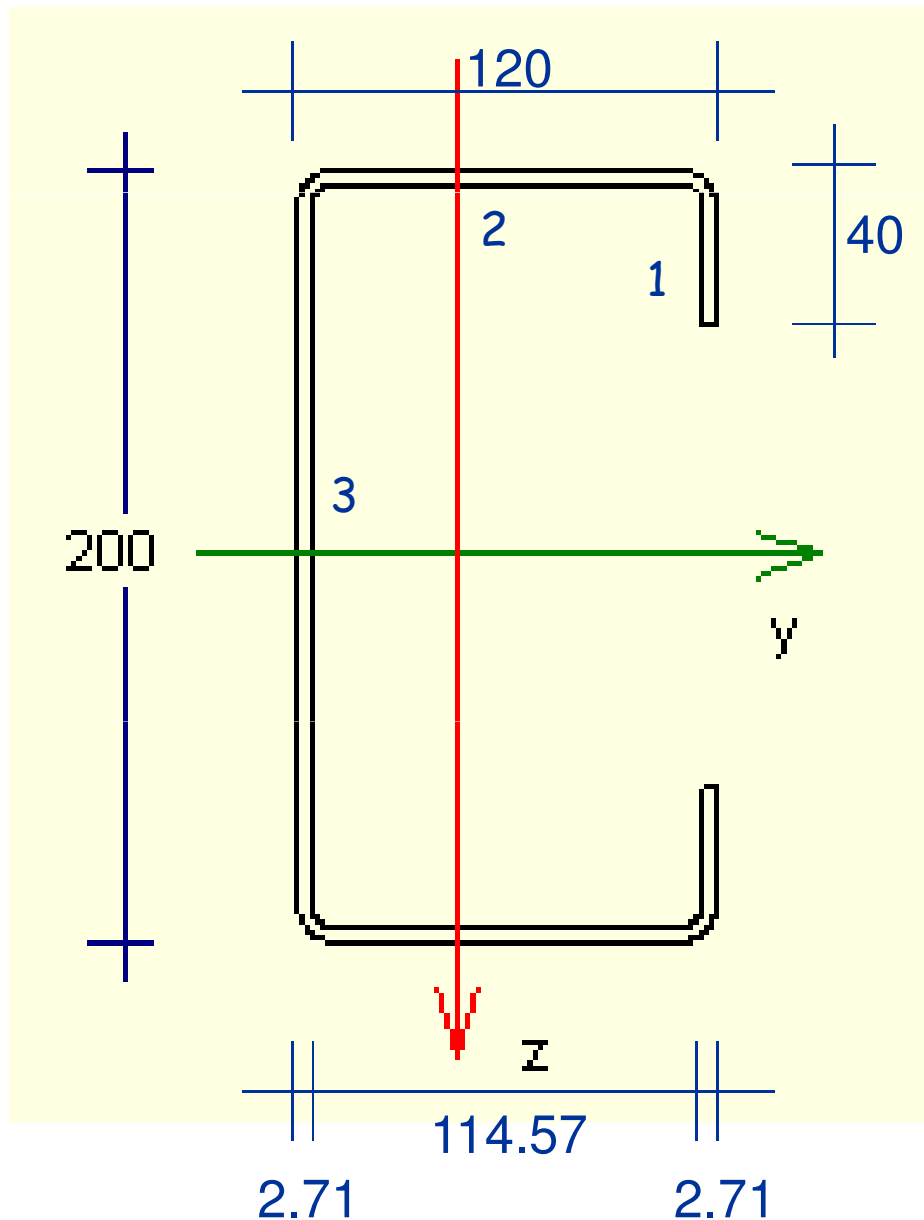
$t/2$ g_r



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

Esempio

profilo a C 200 x 120 x 2.5



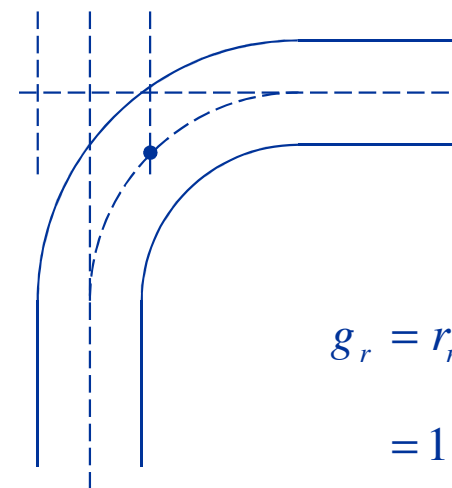
Elemento

1 $b_p = 37.29 \text{ mm}$

2 $b_p = 114.57 \text{ mm}$

3 $b_p = 194.57 \text{ mm}$

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

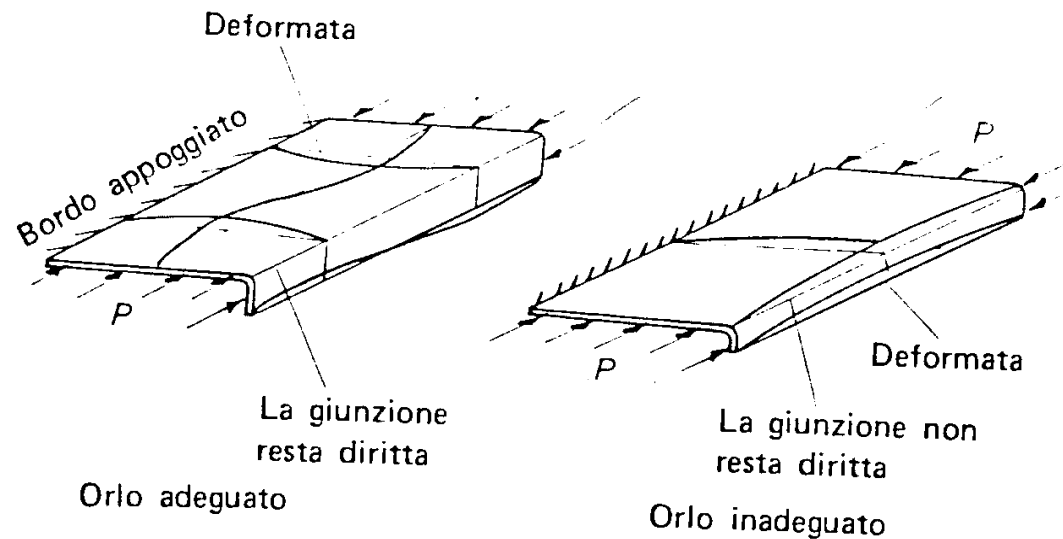


$$g_r = r_m \left(\tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right) = 1.464 \text{ mm}$$

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

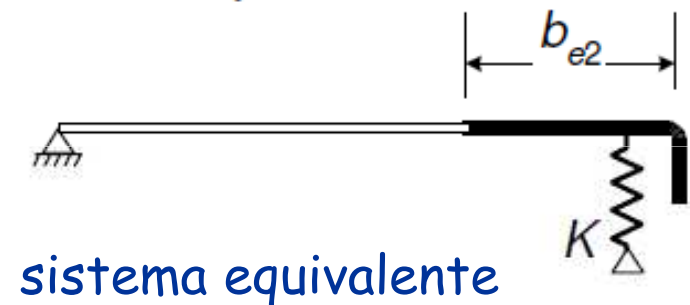
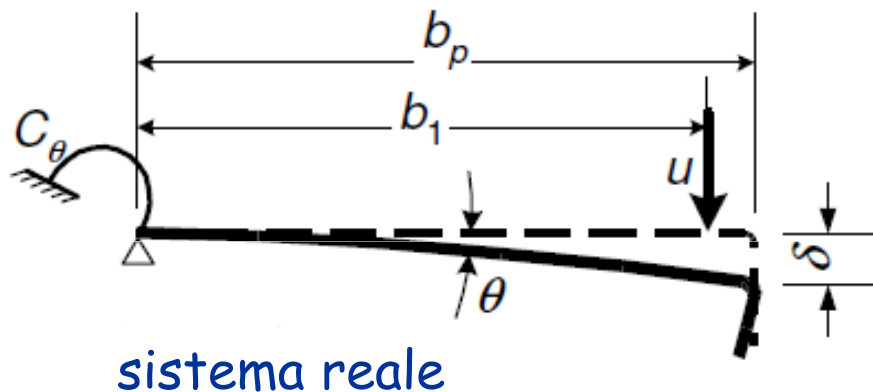


- dimensione c consigliata dell'irrigidimento di bordo affinché sia efficace:

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

Efficacia degli irrigidimenti di bordo

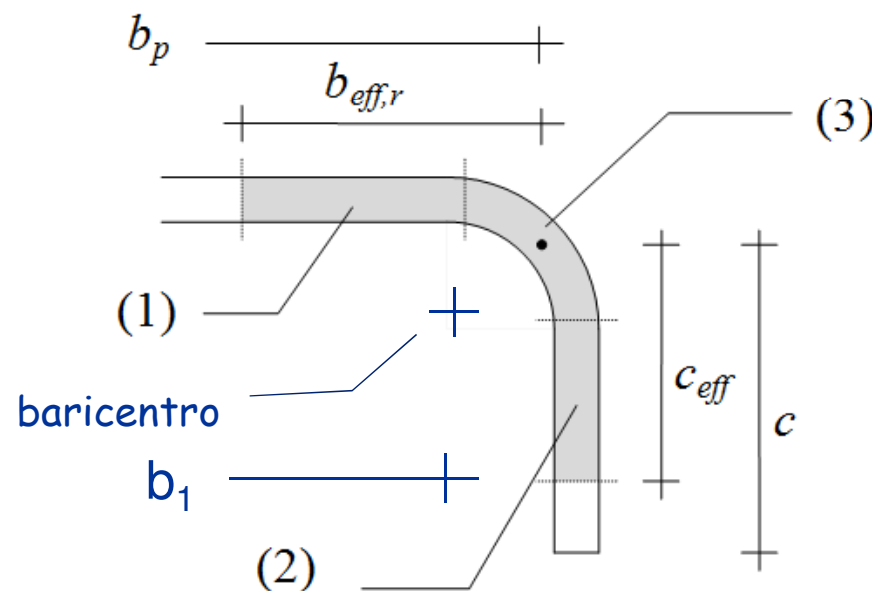
- L'irrigidimento può essere considerato come un'asta compressa, che potrebbe instabilizzarsi; essa è però vincolata elasticamente al resto del profilo (come se fosse quindi un'asta su suolo alla Winkler) e ciò riduce il rischio di instabilità



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

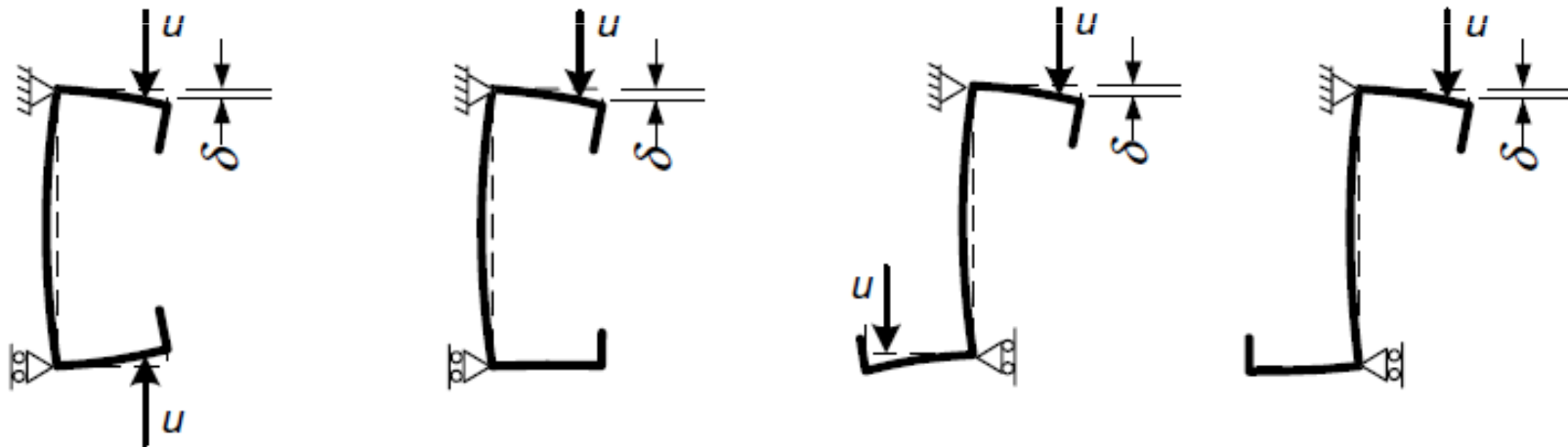
Sezione dell'irrigidimento di bordo

- 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:



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

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



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

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:

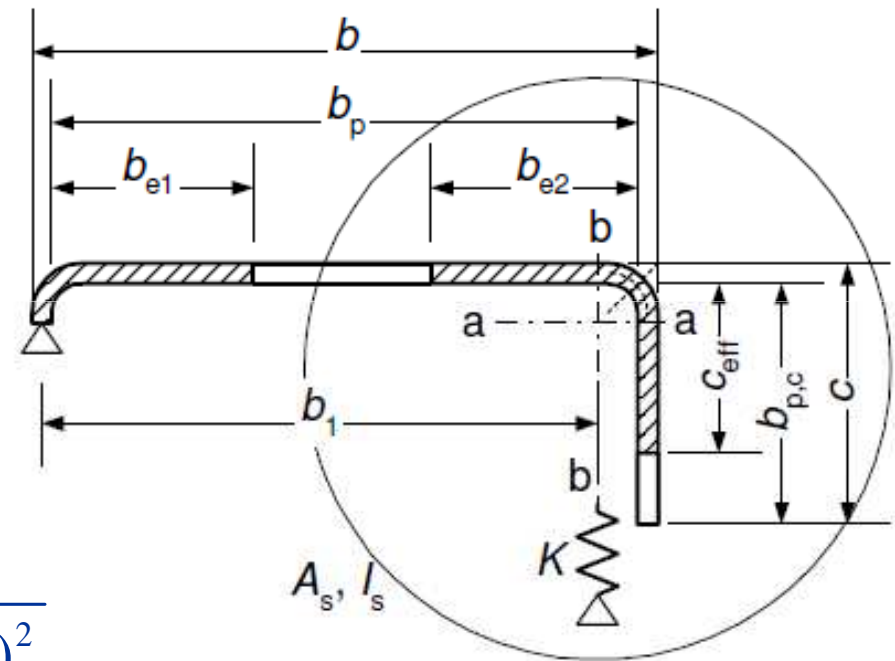
$$N_{cr} = 2 \sqrt{K E I_s} \qquad \sigma_{cr} = \frac{2 \sqrt{K E I_s}}{A_s}$$

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

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

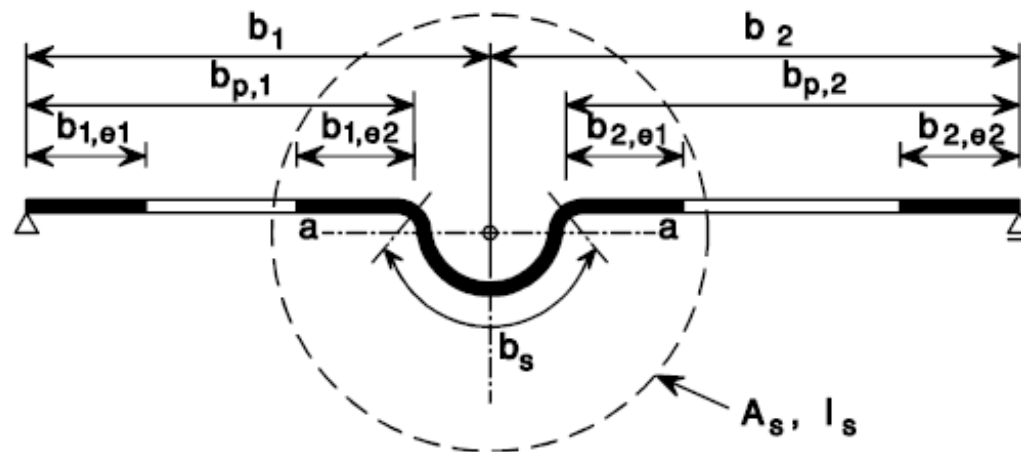
si può assumere che il momento d'inerzia I_s vari nella stessa proporzione e che il baricentro della sezione rimanga inalterato; in pratica si assume che si abbia una riduzione di spessore dell'irrigidimento, cioè $t_{red} = t A_{s,red} / A_s$

- È opportuno iterare il procedimento considerando una nuova tensione massima

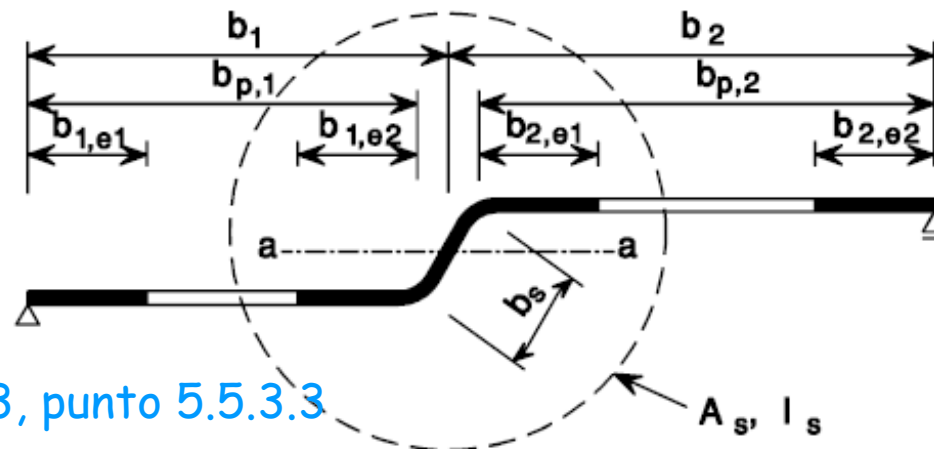
$$\sigma_{com,Ed} = \chi_d f_y / \gamma_{M0}$$

Efficacia degli irrigidimenti intermedi

- Si procede in maniera analoga anche per gli irrigidimenti intermedi



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



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	
Iy	8311935	mm ⁴		ε	1.000	
Iz	2705494	mm ⁴		fyb/γm0	223.8	
fyb	235	MPa		Resistenza a trazione		
fu	360	MPa		Nt,Rd	294.12	kN
fya	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+)		

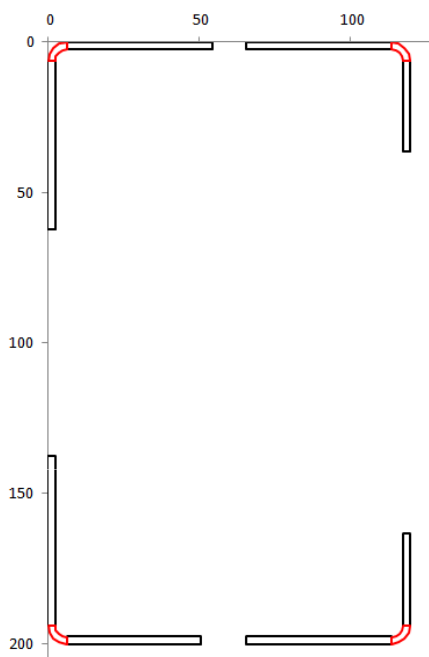
Si determina per ogni elemento la larghezza efficace

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: $\lambda = 0,8978$ $\chi = 0,7974$ $\chi_R = 0,8373$

Sezione
efficace

yG	52.3	mm	A	Sy	Sz			IyG	IzG
zG	99.1	mm	976.3	96762	51058			7518147	2184239
			mm2	mm3	mm3			mm4	mm4

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

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

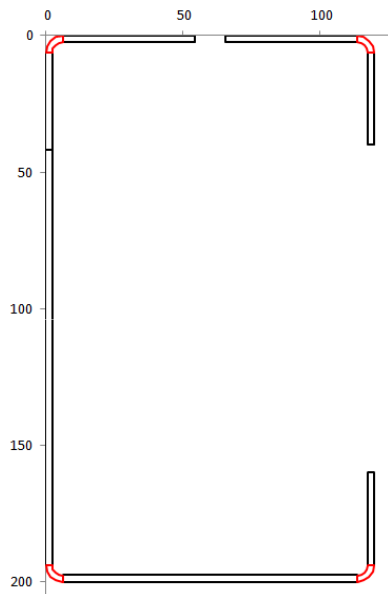
Flessione

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

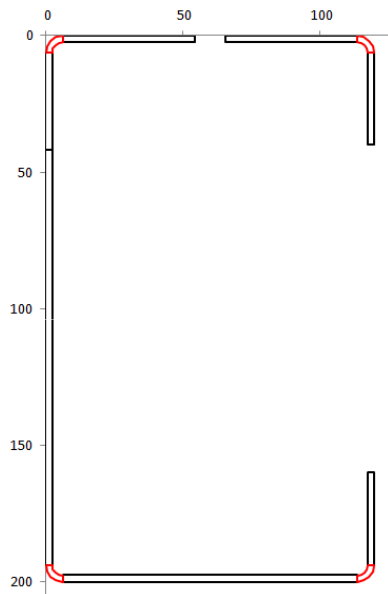
Flessione

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