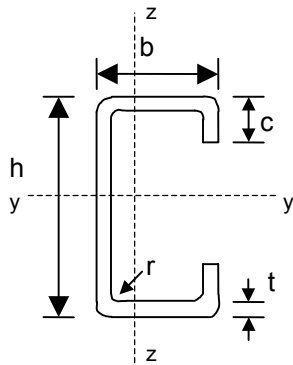
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA Dept. Ingeniería de la Construcción Módulo C1 Campus Norte C/Jordi Girona, 1-3 08034, Barcelona, Spain Tel: +34 93 401 6516 Fax: +34 93 405 4135 FOGLIO DI CALCOLO	Commessa N.	Foglio	1 di 7	Rev	A	
	Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project					
	Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna					
	Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006	
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006		
<p>ESEMPIO DI PROGETTO 12 – TRAVE A C FORMATA A FREDDO PER UNA PAVIMENTAZIONE ESTERNA</p> <p>Il tipo di acciaio inossidabile scelto è 1.4401 CP500, i.e. laminato a freddo fino a raggiungere una resistenza allo snervamento 500 N/mm². Lo schema statico è di trave semplicemente appoggiata con luce l pari a 4 m. L'interasse tra due travi della pavimentazione è pari a 1 m.</p> <p>Poiché il carico equivalente applicato sulla trave non passa per il centro di taglio della sezione a C è necessario verificare sia la resistenza a torsione della sezione che l'instabilità laterale-torsionale della membratura.</p> <p>In questo esempio si verifica solamente la resistenza all'instabilità laterale-torsionale della membratura.</p> <p>Coefficienti parziali di sicurezza</p> <p>Coefficienti divisori della resistenza $\gamma_{M0} = 1,1$ e $\gamma_{M1} = 1,1$</p> <p>Coefficienti moltiplicatori dei carichi $\gamma_G = 1,35$ (carico permanente) e $\gamma_Q = 1,5$ (carico accidentale)</p> <p>Azioni</p> <p>Carichi permanenti (G): 2 kN/m² Carichi accidentali (Q): 3 kN/m²</p> <p>Combinazione dei carichi per lo Stato Limite Ultimo:</p> $q^* = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7,2 \text{ kN/m}$ <p>Analisi strutturale</p> <p>Reazioni agli appoggi (taglio di progetto)</p> $V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN}$ <p>Momento flettente di progetto</p> $M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}$ <p>Proprietà del materiale</p> <p>Snervamento caratteristico $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$</p> <p>Modulo di elasticità $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$</p> <p>Modulo di taglio $G = 76900 \text{ N/mm}^2$</p> <p>Proprietà della sezione trasversale</p> <p>L'influenza degli angoli piegati sulla resistenza della sezione può essere trascurata se l'angolo interno r di niega è $r < 5t$ e $r < 0,10b$. In tal caso la sezione trasversale si</p>						<p>Tabella 2.1 Par. 2.3.2</p> <p>Eq. 2.3</p> <p>Tabella 3.5 Par. 3.2.4 Par. 3.2.4</p> <p>Par. 4.6.2</p>



Commessa N.	Foglio	2 di 7	Rev	A
Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna				
Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006

considera composta da elementi piani collegati a spigolo vivo. Per le proprietà di rigidezza della sezione l'influenza dei bordi piegati deve essere sempre tenuta in conto.



$$\begin{aligned} h &= 160 \text{ mm} \\ b &= 125 \text{ mm} \\ c &= 30 \text{ mm} \\ t &= 5 \text{ mm} \\ r &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\phi/2) - \sin(\phi/2)] = 2,2 \text{ mm}$$

$$r_m = r + t/2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 25 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 11,56 \text{ mm}$$

L'influenza dei bordi piegati sulle proprietà della sezione può essere valutata con sufficiente accuratezza riducendo le proprietà calcolate per una sezione simile ma a spigoli vivi come segue:

Larghezza teorica della parte piana di flangia $b_{p,f} = b - t - 2g_r = 115,61 \text{ mm}$

Altezza teorica della parte piana d'anima $b_{p,w} = h - t - 2g_r = 150,61 \text{ mm}$

Altezza teorica dei bordi piegati $b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$

$$A_{g,sh} = 2162 \text{ mm}^2$$

$$I_{y,g,sh} = 9,069 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 2119 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) = 8,708 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Classificazione della sezione trasversale

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 0,669$$

Flangia: elemento interno soggetto a compressione.

$$c = b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

Fig. 4.5

Eq. 4.21

Eq. 4.18

Eq. 4.19

Par. 4.3

Tabella 4.2



Commessa N.	Foglio	3 di 7	Rev	A
Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna				
Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006

$c/t=23,12 > 30,7 \epsilon$, allora le flange sono di Classe 4

Anima: elemento interno soggetto a flessione.

$$c=h-t-2g_r=150,6 \text{ mm}$$

$c/t=30,12 \leq 56 \epsilon$, allora l'anima è di Classe 1

Bordi piegati: elemento esterno soggetto a compressione,

$$c = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$$

$c/t=5,06 \leq 10 \epsilon$, allora i bordi piegati sono di Classe 1

Calcolo delle proprietà della sezione efficace

Larghezza efficace delle flange: elemento interno soggetto a compressione.

$$\bar{b} = b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

Assumendo una compressione uniforme sulla flangia:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \text{ e il fattore d'instabilità } k_\sigma=4$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,608$$

$$\text{Per elementi interni formati a freddo: } \rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,9311 < 1$$

$$b_{\text{eff}} = \rho \bar{b} = 107,64 \text{ mm}, \quad b_{e1} = 0,5b_{\text{eff}} = 53,82 \text{ mm}, \quad b_{e2} = 0,5b_{\text{eff}} = 53,82 \text{ mm}$$

Effetti dello sforzo di taglio

Il taglio nelle flange può essere trascurato quando $b_0 < L_e/50$, dove b_0 è la parte esterna della flangia o metà larghezza di una flangia interna e L_e è la distanza tra due punti a momento nullo lungo la trave.

$$\text{Per elementi interni: } b_0=(b-t)/2=60 \text{ mm}$$

La distanza tra due punti a momento nullo lungo la trave è: $L_e=4000 \text{ mm}$, $L_e/50=80 \text{ mm}$

Allora il taglio nelle flange può essere trascurato

Accartocciamento delle flange

$$u = 2 \frac{\sigma_a^2}{E^2} \frac{b_s^4}{t^2 z} = 2,55 \text{ mm}$$

$b_s=141 \text{ mm}$ è la larghezza della parte di flangia a sbalzo dell'anima, comprensiva di bordi piegati

$$t=5 \text{ mm}$$

$z=77,5 \text{ mm}$ è la distanza dall'asse neutro della flangia considerata

σ_a è lo sforzo medio nella flangia, calcolato sulla sezione lorda (si assume $f_y=500 \text{ N/mm}^2$)

Par. 4.4.1

Tabella 4.3

Eq. 4.2

Par. 4.4.2

Par. 4.4.3

EN 1993-1-3,
par. 5.4

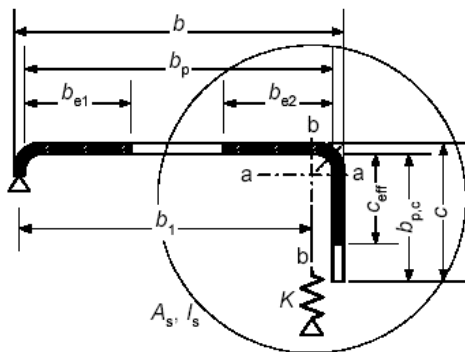


Commessa N.	Foglio	4 di 7	Rev	A
Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna				
Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006

L'accartocciamento delle flange può essere trascurato se è minore del 5% dell'altezza della sezione:

$u = 2,55 \text{ mm} < 0,05h = 8 \text{ mm}$, dunque può essere trascurato.

Elementi irrigiditi: instabilità locale distorcente



$b/t \leq 60$
a) single edge fold

Step 1: Sezione efficace dell'irrigidimento, prima approssimazione

Per le flange (come calcolato prima)

$b = 125 \text{ mm}$
 $b_p = 115,61 \text{ mm}$
 $b_{eff} = 107,65 \text{ mm}$
 $b_{e1} = 0,5b_{eff} = 53,82 \text{ mm}$
 $b_{e2} = 0,5b_{eff} = 53,82 \text{ mm}$

Per i bordi piegati, la larghezza efficace c_{eff} deve essere calcolata utilizzando il corrispondente fattore d'instabilità k_σ , snellezza adimensionale $\bar{\lambda}_p$ e fattore di riduzione ρ come segue:

$b_{p,c} = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$

$b_p = 115,6 \text{ mm}$

$b_{p,c}/b_p = 0,22 < 0,35$ allora $k_\sigma = 0,5$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,45 \quad (\bar{b} = 30 \text{ mm})$$

Elementi esterni formati a freddo: $\rho = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} = 1,08 > 1$ allora $\rho = 1$

$c_{eff} = \rho b_{p,c} = 25,30 \text{ mm}$

Step 2: Fattore di riduzione per l'instabilità locale

Calcolo delle proprietà della sezione efficace dell'irrigidimento di bordo

$b_{e2} = 53,82 \text{ mm}$

$c_{eff} = 25,30 \text{ mm}$

Par. 4.5.1
e EN 1993-1-3, par. 5.5.3

EN 1993-1-3, par. 5.5.3.2

EN 1993-1-3, eq. 5.13b

Eq. 4.2

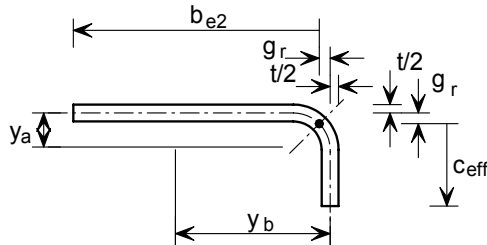
Eq. 4.1b

EN 1993-1-3, eq. 5.13a



Commessa N.	Foglio	5 di 7	Rev	A
Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna				
Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006

$$A_s = (b_{e2} + c_{eff})t = 395,64 \text{ mm}^2$$



$$y_a = 4,01 \text{ mm}$$

$$y_b = 18,27 \text{ mm}$$

$$I_s = 21211,8 \text{ mm}^4$$

Calcolo della rigidità della molla

$$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} = 2,487 \text{ N/mm}^2$$

$b_1 = b - y_b - t/2 = 104,23 \text{ mm}$ è la distanza dal punto d'incrocio anima/flangia del baricentro della sezione efficace dell'irrigidimento di bordo, compresa la parte efficace della flangia b_{e2}

$k_f = 0$ poichè la seconda flangia è in trazione

$h_w = 150 \text{ mm}$ è l'altezza dell'anima

La tensione critica d'instabilità elastica per la sezione efficace è

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 519,195 \text{ N/mm}^2$$

Calcolo del fattore di riduzione per instabilità locale χ_d

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} = 0,98$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \text{then} \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,76$$

Area e spessore ridotti dell'irrigidimento

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} = 300,88 \text{ mm}^2$$

$$t_{red} = t A_{s,red} / A_s = 3,8 \text{ mm}$$

Calcolo delle proprietà della sezione efficace per gli effetti distorsionali

$$A_{eff,sh} = 2028 \text{ mm}^2$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_{eff} = A_{eff,sh} (1 - \delta) = 1987 \text{ mm}^2$$

EN 1993-1-3,
fig. 5.9

EN 1993-1-3,
eq. 5.10b

EN 1993-1-3,
eq. 5.15

EN 1993-1-3,
eq. 5.12d

EN 1993-1-3,
eq. 5.17

Eq. 4.21

Eq. 4.18



Commessa N.	Foglio	6 di 7	Rev	A
Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna				
Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006

$z_G=68,98$ mm distanza della fibra inferiore dall'asse neutro

$$I_{y,eff,sh}=8,274 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,eff} = I_{y,eff,sh} (1 - 2\delta) = 7,943 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,eff, sup}=92,34 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff, inf}=115,2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Eq. 4.19

Resistenza della sezione trasversale

Momento flettente

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} f_y / \gamma_{M0} = 41,97 \text{ kNm per sezione di Classe 4}$$

Momento di progetto $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}$

La sezione è verificata a flessione.

Par. 4.7

Par. 4.7.4

Eq. 4.29

Taglio

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 209,95 \text{ kN}$$

$A_v=800 \text{ mm}^2$ è l'area di taglio

Taglio di progetto $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN}$

La sezione è verificata a taglio

Par. 4.7.5

Eq. 4.30

Combinazione di sollecitazioni

$$V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} > 0,5 V_{pl,Rd} = 104,97 \text{ kN}$$

Non c'è interazione tra momento e taglio.

Par. 4.7.6

Elementi inflessi:

instabilità laterale-torsionale

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,eff,sup} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{per sezioni di Classe 4}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_y}{M_{cr}}}$$

Par. 5.4

Par. 5.4.2

Eq. 5.8

Eq. 5.9

Eq. 5.10

Eq. 5.11

$\alpha_{LT}=0,34$ per elementi formati a freddo

Calcolo del momento critico d'instabilità elastica laterale-torsionale

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

Appendice B,
par. B.1



Commessa N.	Foglio	7 di 7	Rev	A
Titolo commessa RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Argomento Esempio di progetto 12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna				
Cliente	Redatto da	ER/EM	Data	Febbraio 2006
RFCS	Verificato da	HB	Data	Marzo 2006

Per travi semplicemente appoggiate con carico uniformemente distribuito: $C_1=1,12$, $C_2=0,45$ e $C_3=0,525$.

Assumendo condizioni di vincolo normali agli estremi: $k_z=k_w=1$

$z_j=0$ per flange uguali

$z_g = z_a - z_s = h/2 = 80$ mm

z_a punto di applicazione del carico

z_s centro di taglio

$y_G=45,34$ mm distanza dell'asse dell'anima dal baricentro

$I_{z,sh}=4,274 \times 10^6$ mm⁴

$I_{t,sh}=18,02 \times 10^3$ mm⁴

$I_{w,sh}=23,19 \times 10^9$ mm⁶

$I_z = I_{z,sh} (1 - 2\delta) = 4,103 \times 10^6$ mm⁴

$I_t = I_{t,sh} (1 - 2\delta) = 17,30 \times 10^3$ mm⁴

$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) = 21,33 \times 10^9$ mm⁶

Nota: l'espressione per calcolare la costante d'ingobbamento è tratta da Wei-Wen You, "Cold-Formed Steel Design", Appendix B-Torsion

$$\text{Allora, } M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g) \right) = 33,74 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff,sup} f_y}{M_{cr}}} = 1,17 \quad (W_{y,eff,sup} = 92,39 \times 10^3 \text{ mm}^3, \text{ flangia compressa})$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 1,315$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \left[\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0,5}} = 0,522$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,eff,sup} f_y / \gamma_{M1} = 21,91 \text{ kNm}$$

Il momento di progetto è $M_{Ed} = 14,4$ kNm, allora l'elemento è verificato all'instabilità laterale-torsionale

Nota: poiché il carico applicato non passa per il centro di taglio della sezione, è anche necessario verificare l'interazione tra torsione nella sezione instabilità laterale-torsionale nella trave.

Instabilità per taglio

L'instabilità per taglio deve essere verificata solo quando $h_w / t \geq 52\varepsilon / \eta$ per un'anima non irrigidita.

Il valore raccomandato per $\eta = 1,20$

$h_w / t = 28$, $52\varepsilon / \eta = 28,99$, dunque non sono necessarie ulteriori verifiche.

Par. 5.4.3

