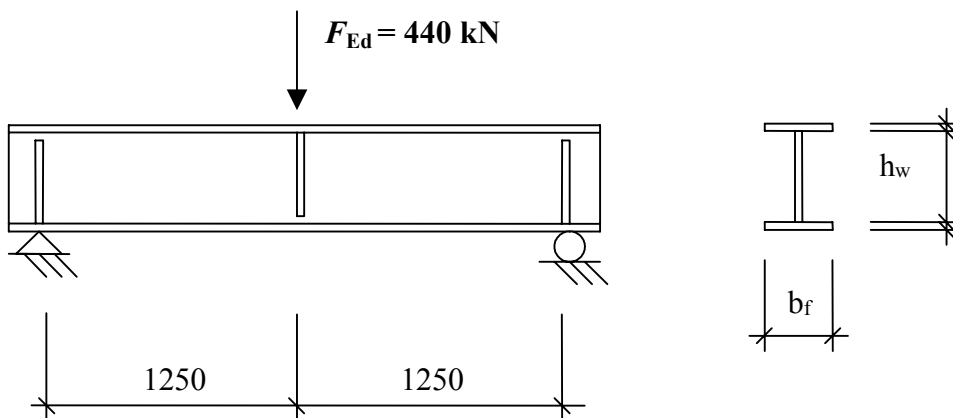


Affaire n°	Page	1 sur 6	Rév	B
Nom Affaire	Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox			
Sujet	Exemple 7 – Résistance au cisaillement d'une poutre en I reconstituée soudée			
Client CECA	Rédigé par	AO	Date	Juin 2002
	Vérifié par	AT	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006

EXEMPLE DE CALCUL N°7 – RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT D'UNE POUTRE EN I RECONSTITUÉE SOUDÉE

Dimensionner une poutre à âme pleine vis-à-vis de sa résistance au cisaillement. Cette poutre à section transversale en I est simplement appuyée. Sa portée est représentée sur la figure ci-dessous. La semelle supérieure est maintenue au déversement.



La poutre est réalisée avec un acier inoxydable de nuance 1.4462 laminé à chaud.

$$f_y = 460 \text{ MPa}$$

$$E = 200\,000 \text{ MPa}$$

Prenons la section transversale suivante :

Semelles :	$12 \times 200 \text{ mm}^2$
Âme :	$4 \times 500 \text{ mm}^2$
Raidisseurs :	$12 \times 98 \text{ mm}^2$
Épaisseur de la gorge de soudure:	4 mm

Analyse structurale

Valeurs maximales de l'effort tranchant et du moment fléchissant :

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{440}{2} = 220 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed} L}{4} = \frac{440 \times 2,5}{4} = 275 \text{ kN.m}$$


Coefficients partiels

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Tableau 3.1
§ 3.2.4

Tableau 2.1

 Department of Civil and Mining Engineering Division of Steel Structures, University Campus, SE-971 87 Luleå, Sweden Tel: +46 920 91 000 Fax: +46 920 91 913 FEUILLE DE CALCUL	Affaire n°	Page	2 sur 6	Rév	B
	Nom Affaire Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
	Sujet Exemple 7 – Résistance au cisaillement d'une poutre en I reconstituée soudée				
	Client	Rédigé par	AO	Date	Juin 2002
CECA	Vérfié par	AT	Date	Oct. 2002	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

Classification de la section transversale

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{460 \cdot 210}} = 0,698$$

Âme fléchie

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,698} = 175 > 74,8, \text{ par conséquent l'âme est de Classe 4.}$$

Semelle comprimée

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,698} = 11,0 \leq 11,0, \text{ la semelle comprimée est donc de Classe 3.}$$

Par conséquent, la section transversale est de Classe 4.

Résistance au cisaillement

La vérification de la résistance au voilement par cisaillement est requise lorsque

$$h_w / t_w \geq \frac{23}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \text{ pour les âmes raidies transversalement.}$$

$$a/h_w = 1250/500 > 1, \text{ donc}$$

$$k_\tau = 5,34 + 4 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4 \left(\frac{500}{1250} \right)^2 = 5,98$$

L'EN 1993-1-4 recommande la valeur $\eta = 1,2$

$$h_w/t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{23}{1,2} 0,698 \sqrt{5,98} = 32,7$$

La résistance au voilement par cisaillement doit donc être vérifiée. Elle est obtenue par :

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \times 460 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} = 579,47 \text{ kN}$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\chi_w = \eta = 1,2 \quad \text{pour } \bar{\lambda}_w \leq 0,60/\eta = 0,5$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{pour } \bar{\lambda}_w > 0,60/\eta = 0,5$$

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right)$$

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{500}{37,4 \times 4 \times 0,698 \times \sqrt{5,98}} \right) = 1,958 > 0,60/\eta = 0,5$$

§ 4.3

Tableau 4.2

Tableau 4.2

Tableau 4.2

§ 5.4.3

Éq. 5.16a

§ 5.4.3


Éq. 5.12a

Éq. 5.12b

Éq. 5.13a

Éq. 5.13b

Éq. 5.15

 Department of Civil and Mining Engineering Division of Steel Structures, University Campus, SE-971 87 Luleå, Sweden Tel: +46 920 91 000 Fax: +46 920 91 913 FEUILLE DE CALCUL	Affaire n°	Page	3 sur 6	Rév	B
	Nom Affaire Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
	Sujet Exemple 7 – Résistance au cisaillement d'une poutre en I reconstituée soudée				
	Client	Rédigé par	AO	Date	Juin 2002
CECA	Véifié par	AT	Date	Oct. 2002	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

La contribution de l'âme est donc obtenue par :

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{1,958} - \frac{0,05}{1,958^2} = 0,424$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,424 \times 460 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} = 204,74 \text{ kN}$$

On peut prendre en compte la contribution des semelles si celles-ci ne sont pas entièrement mobilisées pour équilibrer le moment fléchissant. Le moment résistant d'une section transversale ramenée aux semelles seules est obtenue par :

$$M_{f,Rd} = 12 \times 200 \times \frac{460}{1,1} \times (500 + 12) = 513,86 \text{ kN.m}$$

$M_{f,Rd} > M_{Ed} = 275 \text{ kN.m}$, les semelles peuvent donc contribuer à la résistance au voilement par cisaillement.

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left[\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right]^2 \right]$$

$$c = a \left[0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right] \text{ mais } \frac{c}{a} \leq 0,65$$

$$= 1250 \times \left[0,17 + \frac{3,5 \times 200 \times 12^2 \times 460}{4 \times 500^2 \times 460} \right] = 338 \text{ mm} < 0,65 \times 1250 = 812 \text{ mm}$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{200 \times 12^2 \times 460}{338 \times 1,1} \times \left[1 - \left[\frac{275}{513,86} \right]^2 \right] = 25,43 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 230,17 \text{ kN} \leq 579,47 \text{ kN}$$

Raidisseurs transversaux

Les raidisseurs transversaux doivent être vérifiés vis-à-vis de l'écrasement et du flambement par flexion en utilisant $\alpha = 0,49$ et $\bar{\lambda}_0 = 0,2$. La section efficace est alors composée du raidisseur lui-même et d'une partie de l'âme. La partie d'âme incluse dans la section transversale possède une largeur égale à $1 \varepsilon t_w$. Par conséquent, la section du raidisseur transversal est de Classe 3.

$a/h_w = 1250/500 = 2,5 \geq \sqrt{2}$, le moment d'inertie du raidisseur intermédiaire doit donc satisfaire à la condition :

$$I_{st} \geq 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \times 500 \times 4^3 = 24000 \text{ mm}^4$$


§ 5.4.3

Éq. 5.17

§ 5.4.5

Éq. 5.37

Éq. 5.37

 <p>Department of Civil and Mining Engineering Division of Steel Structures, University Campus, SE-971 87 Luleå, Sweden Tel: +46 920 91 000 Fax: +46 920 91 913</p> <p>FEUILLE DE CALCUL</p>	Affaire n°	Page	4 sur 6	Rév B	
	Nom Affaire Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox				
	Sujet Exemple 7 – Résistance au cisaillement d'une poutre en I reconstituée soudée				
	Client CECA	Rédigé par	AO	Date	Juin 2002
		Vérfié par	AT	Date	Oct. 2002
Révisé par		MEB	Date	Avril 2006	

$I_{st} = 2 \times \frac{(11 \times 0,698 \times 4) \times 4^3}{12} + \frac{12 \times 200^3}{12} = 8,00 \times 10^6 \text{ mm}^4$, la condition est donc satisfaite.

La résistance à l'écrasement est obtenue par :

$$N_{c,Rd} = A_s f_y / \gamma_{M0}$$

$$A_s = (12 \times 200 + 11 \times 0,698 \times 4 \times 2) = 2461,42 \text{ mm}^2$$

$$N_{c,Rd} = 2461,42 \times 460 / 1,1 = 1029,32 \text{ kN}$$

La résistance au flambement par flexion est obtenue par :

$$N_{b,Rd} = \chi A_s f_y / \gamma_{M1}$$

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\varphi = 0,5 (1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}}$$

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \times 500 = 375 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{375}{\sqrt{\frac{8 \times 10^6}{2461,42}}} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{460 \times 1}{200000}} = 0,100$$

$$\varphi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,100 - 0,2) + 0,100^2) = 0,481$$

$$\chi = \frac{1}{0,481 + [0,481^2 - 0,100^2]^{0,5}} = 1,05 > 1 \Rightarrow \chi = 1,0$$

Puisque $N_{b,Rd} = N_{c,Rd} > N_{Ed}$, le dimensionnement des raidisseurs transversaux est satisfaisant.

Interaction flexion et cisaillement

Si la part d'utilisation de la résistance au cisaillement, exprimée par le facteur $\bar{\eta}_3$, dépasse 0,5, l'effet combiné de la flexion et du cisaillement doit être vérifié.

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{220}{204,74} = 1,075 > 0,5, \text{ l'interaction doit donc être considérée.}$$

Éq. 4.25

Éq. 5.2a

Éq. 5.3


Éq. 5.4

Éq. 5.5a

§ 5.4.5

§ 5.4.3

Éq. 5.23

 Department of Civil and Mining Engineering Division of Steel Structures, University Campus, SE-971 87 Luleå, Sweden Tel: +46 920 91 000 Fax: +46 920 91 913 FEUILLE DE CALCUL	Affaire n°	Page	5 sur 6	Rév B
	Nom Affaire Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox			
	Sujet Exemple 7 – Résistance au cisaillement d'une poutre en I reconstituée soudée			
	Client	Rédigé par	AO	Date
CECA	Vérfié par	AT	Date	Oct. 2002
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006

La condition est :

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \text{ for } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

Éq. 5.21

où :

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

Éq. 5.22

Calcul des propriétés de la section efficace.

Les semelles sont de Classe 3 et donc pleinement efficaces.

L'âme doit être réduite par le coefficient de réduction ρ , pour une âme soudée.

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$$

Éq. 4.1a

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{où } \bar{b} = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$$

Éq. 4.2

En supposant une distribution linéaire de contraintes sur la hauteur de l'âme et des valeurs opposées dans les fibres extrêmes,

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

$$\Rightarrow k_\sigma = 23,9$$

Tableau 4.3

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{23,9}} = 1,26$$

$$\rho = \frac{0,772}{1,26} - \frac{0,125}{1,26^2} = 0,534 \leq 1$$

$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi) = 0,534 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 130,48$$

Tableau 4.3

$$b_{e1} = 0,4b_{\text{eff}} = 0,4 \times 130,48 = 52,19 \text{ mm}$$

Tableau 4.3

$$b_{e2} = 0,6b_{\text{eff}} = 0,6 \times 130,48 = 78,29 \text{ mm}$$

Calcul du module de la section efficace en flexion.

e_i est compté positif vers le bas, à partir du centre de gravité de la semelle supérieure.

$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + b_{e1} t_w + b_{e2} t_w + (h_w / 2) t_w = 6321,92 \text{ mm}^2$$

$$e_{\text{eff}} = \frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f)] + [b_{e1} t_w (0,5(b_{e1} + t_f)) + b_{e2} t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2} / 2) + (h_w / 2) t_w (0,75h_w + 0,5t_f)] = 266,44 \text{ mm}$$

Affaire n°		Page	6 sur 6	Rév	B
Nom Affaire Projet de Valorisation CECA : Utilisation de l'Inox					
Sujet Exemple 7 – Résistance au cisaillement d'une poutre en I reconstruite soudée					
Client CECA	Rédigé par	AO	Date	Juin 2002	
	Véifié par	AT	Date	Oct. 2002	
	Révisé par	MEB	Date	Avril 2006	

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w b_{e1}^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w / 2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + b_{e1} t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(b_{e1} + t_f)]^2 + b_{e2} t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f + b_{e2})]^2 + (h_w / 2) t_w [e_{\text{eff}} - (0,75 h_w + 0,5 t_f)]^2$$

$$= 3,459 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{pl,Rd}}}$$

$$M_{\text{f,Rd}} = 513,86 \text{ kN.m (page 3)}$$

$M_{\text{pl,Rd}}$ est la résistance plastique de la section transversale.

$$M_{\text{pl,Rd}} = M_{\text{f,Rd}} + \frac{t_w h_w^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = 513,86 + \frac{4 \times 500^2 \times 460}{4 \times 1,1 \times 10^6} = 618,40 \text{ kN.m}$$

Vérifications des conditions à remplir

$$M_{\text{Ed}} = 275 \text{ kN.m, d'où :}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{275}{618,40} = 0,44 \leq 1,0 \text{ OK}$$

$\bar{\eta}_1$ remplit la condition.

Il reste maintenant à vérifier l'interaction.

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{\text{f,Rd}}}{M_{\text{pl,Rd}}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,44 + \left(1 - \frac{513,86}{618,40}\right) ((2 \times 1,075) - 1)^2 = 0,664 < 1,0$$

Il s'en suit donc que, pour les conditions données, la résistance de la poutre est satisfaite à la fois vis-à-vis du cisaillement, de la flexion et de l'interaction flexion-cisaillement.

Éq. 5.22