
4. Assemblages soudés

Le soudage est un procédé particulier d'assemblage assurant les liaisons par continuité de la matière (adhérence entre les atomes). Ce type d'assemblage a des avantages et des inconvénients.

*** Avantages**

- continuité de la matière (assemblage monolithe) assure une bonne transmission des sollicitations;
- Etanchéité;
- Procédé simple et rapide, (dispense des pièces secondaires, goussets...etc)
- Une bonne productivité;
- Moins encombrant et plus esthétique que le boulonnage ou le rivetage;

*** Inconvénients**

- Déformation de retrait des soudures
- Contraintes résiduelles de soudure qui compliquent l'état de contrainte de l'assemblage (rupture par fatigue);
- Plus onéreux (main-d'oeuvre qualifiée, matériel spécifique, contrôle des soudures)

4.1 Procédés de soudage.

On regroupe les procédés de soudage en quatre types principaux en fonction de l'énergie utilisée:

- 1) Energie électrothermique: arc électrique;
- 2) Energie thermochimique: Acétylène + oxygène;
- 3) Energie mécanique: Percussion - explosion;
- 4) Energie de radiation: Laser;

Le procédé le plus courant utilisé en charpente métallique étant le soudage à l'arc électrique avec apport de métal par électrode. Il peut être:

- Soit manuel MMA (électrode enrobée);
- Soit semi automatique (Electrode nue + flux de poudre ou gaz protecteur procédé MAG)
- Soit automatique (Electrode nue + flux de poudre procédé SAW))

4.1.1 Soudure à l'arc électrique avec électrode enrobée MMA

Cette méthode manuelle constitue l'un des méthodes opératoires de soudage à l'arc les plus répandus (voir figure 15). Elle nécessite une compétence considérable pour réaliser des soudures de bonne qualité. L'électrode est constituée d'un fil à cœur d'acier et d'un flux d'enrobage contenant des éléments alliés, comme par exemple le manganèse et la silice.

Un arc électrique est créé entre une électrode fusible (Cathode) et les pièces à souder (Anode), grâce à un générateur de courant, alternatif ou continu, de faible voltage, mais de fort ampérage. L'arc (Température au coeur de l'arc \cong 5500°C, 2700°C à la cathode et 3500°C à l'anode) fond le métal de l'électrode et une partie des pièces à assembler, ainsi que l'enrobage de l'électrode. Le métal fondu remplit les vides entre pièces et forme après refroidissement l'assemblage.

Lors de la fusion l'enrobage de l'électrode donne naissance à un laitier, étant plus léger que le métal il se dépose à la surface du bain de fusion et forme une protection de la soudure.

La protection a pour rôle de:

- protéger le métal contre l'oxygène et l'azote de l'air (fragile);
- retarder le refroidissement de l'acier pour éviter le phénomène de trempe;

Les corps principaux de l'enrobage sont: SiO_2 , CaO , Mn , Fe_3O_4 ;

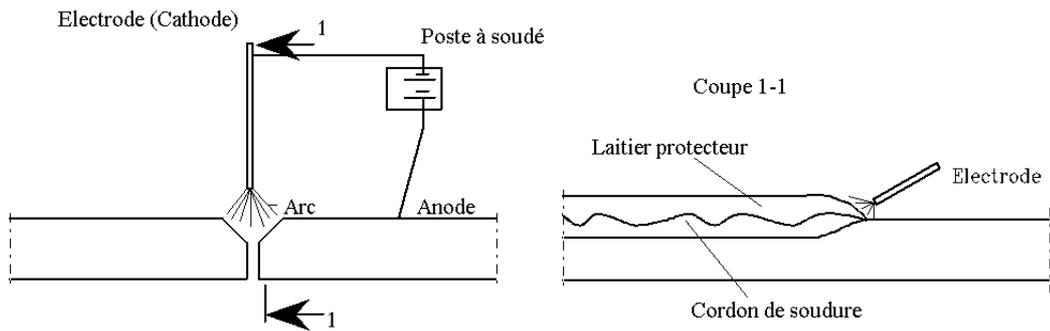


Figure 15: Soudure à l'arc électrique

4.2 Genre de soudure.

On distingue

- * Soudure d'angle
- * soudure en entaille
- * Soudure en bout
- * soudure en bouchon

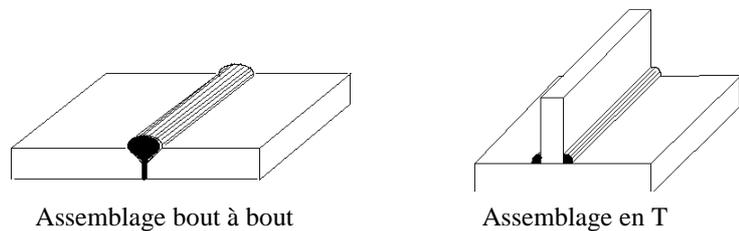


Figure 16 : Exemple d'assemblage de deux pièces par soudure

Les différents types d'assemblage traités dans l'EC3 sont donnés dans le tableau 7

4.2.1 Soudure d'angle

Les soudures d'angle peuvent être utilisées pour assembler des éléments dont les faces à assembler par fusion forment un angle compris entre 60° et 120° .

Des angles inférieurs à 60° sont également admis. Toutefois, dans ces cas, la soudure doit être considérée comme une soudure en bout à pénétration partielle.

4.2.2 Soudure en entaille

Les soudures en entaille, constituées de soudure d'angles réalisées dans des trous circulaires ou allongés, ne peuvent être utilisées que pour transmettre des efforts de cisaillement pour éviter le voilement ou la séparation de parties qui se recouvrent, il faut que le diamètre du trou soit inférieur à 4 fois l'épaisseur de l'élément perforé.



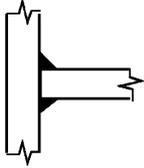
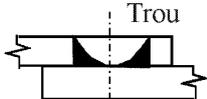
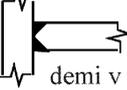
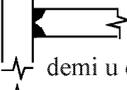
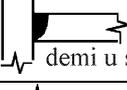
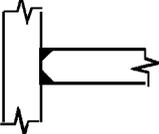
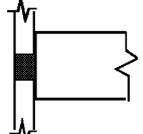
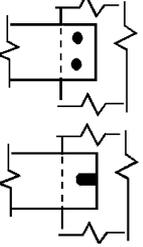
Figure 17 : Soudure en entaille

4.2.3 Soudures en bout

Il y a deux types de soudures en bout à savoir :

- soudure en bout à pleine pénétration
- soudure en bout à pénétration partielle

Tableau : Types d'assemblages soudés

Type de soudure	Type d'assemblage		
	Assemblage bout à -bout	Assemblage en T	Assemblage en clin
Soudure d'angle			
Soudure en entaille			
Soudure en bout à pleine pénétration (*)	 v simple  v double  u simple  u double	 demi v simple  demi v double  demi u double  demi u simple	
Soudure en bout à pénétration partielle (*)	 v double  u double		
Soudure en bouchon			

(*) Les soudures en bout peuvent quelquefois être réalisées sans chanfreinage

4.2.4 Soudures en bouchon

Les soudure en bouchon sont réalisées dans des trous circulaire ou oblongs comme le montre la figure17 ce genre de soudure on le réalise que pour transmettre que un effort de cisaillement



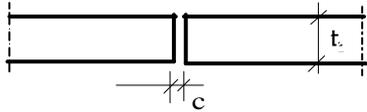
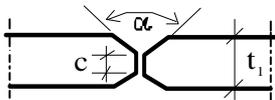
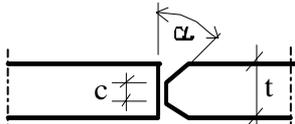
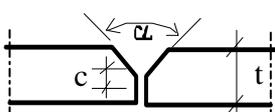
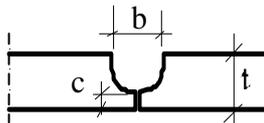
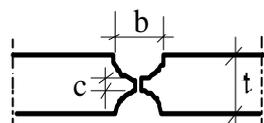
Figure 17 : Soudure en bouchon

4.3 Préparation des bords des pièces à souder.

Cette opération consiste à diminuer l'épaisseur au bord des pièces à souder pour faciliter la pénétration de la soudure. Cette opération s'appelle chanfrein, les différents types de chanfreins utilisés en charpente métallique sont donnés dans les tableaux 9 et 10.

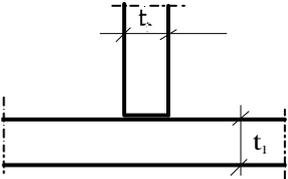
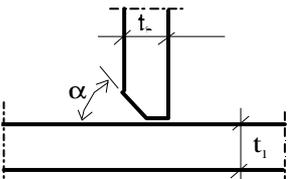
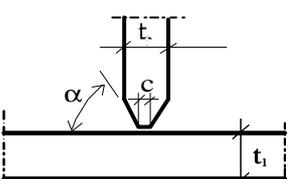
* Chanfreins des bords pour les soudures bout à bout

Tableau 9: Types de chanfreins pour les soudures bout à bout

Mode de chanfrein	Valeurs	Observation
Sans	 $t < 6\text{mm}$ $c = 1 \div 3\text{mm}$	
en X	 $t = 12 \div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 60^\circ$	Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes
en K	 $t = 12 \div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 50^\circ$	
en V	 $t \leq 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 60^\circ$	Permet de souder sans tourner les pièces, mais il y a un inconvénient.
en U	 $t = 10 \div 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $b = t/2$	Lors du refroidissement il y a des déformations angulaires
en double U	 $t = 10 \div 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$	Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes

* Chanfreins des bords d'assemblage en T

Tableau 10 : Chanfreins des soudures d'angle

Mode de chanfrein	Valeurs	Observation
sans	 $t_2 \leq 12\text{mm}$	
en V	 $t_2 \leq 25\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t_2/5)$ $\alpha = 50^\circ$	
en K	 $t_2 > 25\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t_2/5)$ $\alpha = 60^\circ$	

4.4 Résistance des soudures.

4.4.1 Soudure d'angle

Définitions:

* Épaisseur utile "a": L'épaisseur utile ou gorge "a" d'une soudure d'angle sera prise égale à la hauteur du plus grand triangle pouvant être inscrit entre les faces de fusion et la surface du cordon mesurée perpendiculairement à son côté extérieur (figure 18).

* Longueur utile du cordon "l": longueur utile d'un cordon de soudure et égale à sa longueur réelle diminuée de la longueur des cratères d'extrémité lorsque aucune disposition n'est prise pour les éliminer.

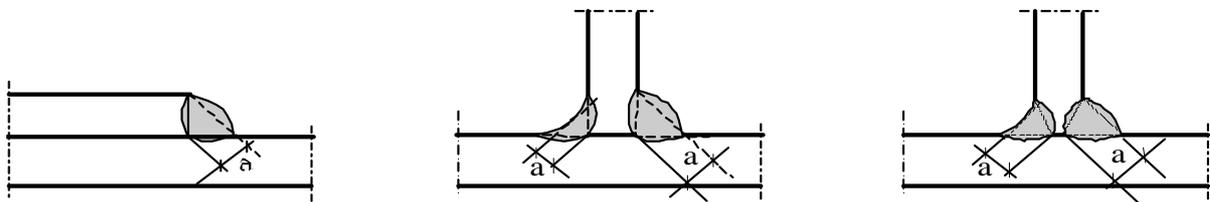


Figure 18: Exemples d'épaisseurs "a" de quelques cordons de soudures.

Les formules de vérification sont:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

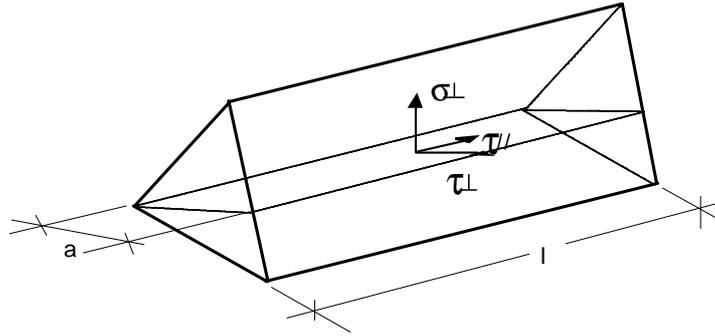


Figure 17: Représentation d'un cordon de soudure

Avec

- σ_{\perp} : Composante perpendiculaire à la section;
 - τ_{\perp} : Composante dans le plan de la section perpendiculaire à l'axe longitudinal du cordon;
 - $\tau_{//}$: Composante dans le plan de la section parallèle à l'axe longitudinal du cordon;
 - f_u : limite ultime du métal de base;
 - β_w facteur de corrélation qui dépend de l'acier utilisé donné par le tableau suivant :
 - $\beta_w = 0,8$ pour l'acier S235 ($f_u = 360$)
 - $\beta_w = 0,85$ pour l'acier S275 ($f_u = 430$)
 - $\beta_w = 0,9$ pour l'acier S355 ($f_u = 510$)
 - γ_{Mw} Coefficients partiels de sécurité ils varient en fonction des caractéristiques des aciers
 - $\gamma_{Mw} = 1,25$ pour l'acier de limite élastique S235
 - $\gamma_{Mw} = 1,30$ pour les aciers de limite élastique S275
 - $\gamma_{Mw} = 1,35$ pour les aciers de limite élastique S355
- L'indice w signifie soudure (welding en anglais)

On peut calculer la résistance de calcul par unité de longueur d'une soudure d'angle à l'aide de la formule simplifiée suivante :

$$F_{w.Rd} = \frac{a \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}}$$

4.4.3.1 Application de la formule fondamentale

Cordons isolés symétriques soumis à un effort normal F

a) Cordons frontaux

$$\sigma_{\perp} = \frac{F \cdot \cos 45}{2a l_1} = \frac{F \cdot \sqrt{2}}{2 \sum a l_1} = \frac{F}{\sum a l_1 \cdot \sqrt{2}}; \quad \tau_{\perp} = \frac{F \cdot \sin 45}{2a l_1} = \frac{F}{\sqrt{2} \cdot \sum a l_1} \quad \text{et} \quad \tau_{//} = 0$$

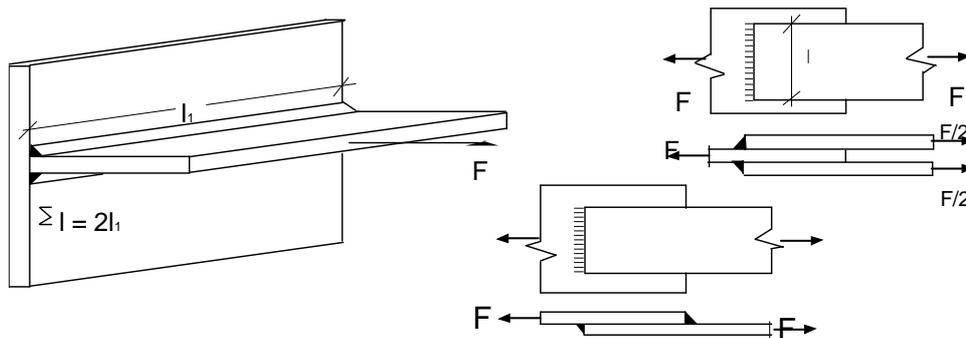
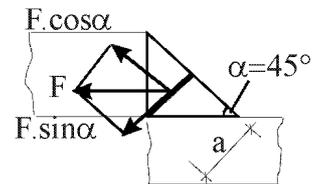


Figure 18: Cordons frontaux

La formule fondamentale s'écrit:

$$\sqrt{\left(\frac{F}{\sqrt{2} \cdot \Sigma a l_1}\right)^2 + 3\left(\frac{F}{\sqrt{2} \cdot \Sigma a l_1}\right)^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

On obtient:

$$\frac{F\sqrt{2}}{\Sigma a l_1} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \rightarrow \text{par unité de longueur } \frac{F}{\Sigma l_1} \leq \frac{a \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{2}} = F_{w.Rd}$$

b) Cordons latéraux

$$\sigma_{\perp} = 0 \quad \tau_{\perp} = 0 \quad \tau_{//} = F / \Sigma a l_1$$

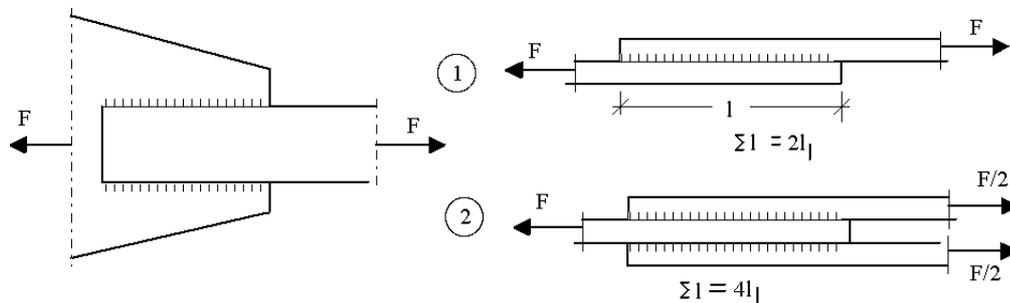


Figure 19: Représentation des cordons de soudure latéraux

$$\sqrt{0 + 3\left(\frac{F}{\Sigma a l_1}\right)^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

On obtient:

$$\frac{F\sqrt{3}}{\Sigma a l_1} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \rightarrow \text{par unité de longueur } \frac{F}{\Sigma l_1} \leq \frac{a \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} = F_{w.Rd}$$

4.4.2 Résistance des soudures en bout.

Pour une soudure en bout à pleine pénétration, si le métal d'apport l'autorise, la résistance de calcul sera celle de la plus faible des parties assemblées.

Pour une soudure en bout à pénétration partielle, le calcul se fait comme pour les soudures d'angles. La gorge est prise égale à la profondeur de pénétration effectivement réalisée. Si la préparation de la soudure se fait par un chanfrein, la gorge est prise égale à la profondeur de préparation moins 2 mm.

4.4.3 Résistance des soudures en entaille.

4.4.3 Résistance des soudures en bouchon.

La résistance de calcul d'une soudure en bouchon doit être prise égale à :

$$F_{w.Rd} = \frac{A_w \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}}$$

Avec : A_w l'aire efficace d'une soudure en bouchon doit être prise égale à l'aire du trou.

4.5 Combinaisons de cordons de soudure.

* Cas ou on a plusieurs cordons de soudure, soumis à un effort:

On détermine un ensemble d'efforts appliqués au milieu de chaque cordon capable d'équilibrer les sollicitations exercées sur l'assemblage et on vérifie au moyen de la formule précédente que chaque cordon peut supporter l'effort qui lui revient.

* Cas d'assemblage est soumis à une charge excentrée.

On peut être conduit à envisager des efforts de direction différente sur les cordons parallèles et on vérifie au moyen de la formule simplifier précédente.

* Cas complexe on applique la formule fondamentale.

4.6 Applications.

4.6.1 Exercice N° 1

Etudier l'assemblage de deux cornières (150x150x12 Acier S235) à un gousset comme le montre la figure suivante:

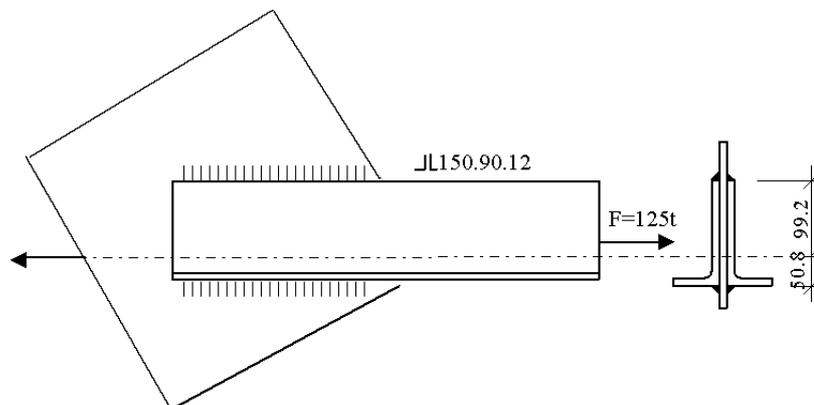


Figure 20 : Assemblage de deux cornières sur un gousset

Solution

On adopte l'épaisseur des cordons côté talon de la cornière (a_t) de 8 mm.

On adopte l'épaisseur des cordons coté bord de la cornière (a_b) de 4 mm.

Il y a quatre cordons de soudure latéraux, par ailleurs, il faut vérifier que:

$$\frac{a \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} = F_{w.Rd}$$

Cordon l₁.

a_b = 4 mm ; Effort sur les deux cordons F₁ = F.d₂ / d = 42,3 t

$$\frac{F_1}{2 \times l_b} \leq F_{w.Rd} = \frac{a_b \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} = \frac{4 \times 360}{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{3}} = 831,4 \text{ N / mm} \rightarrow l_b \geq 254,4 \text{ mm}$$

Cordon l₂.

a_t = 8 mm ; Effort sur les deux cordons F₂ = F.d₁ / d = 82,6 t

$$\frac{F_2}{2 \times l_b} \leq F_{w.Rd} = \frac{a_t \cdot f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} = \frac{8 \times 360}{0,8 \times 1,25 \times \sqrt{3}} = 1662,8 \text{ N / mm} \rightarrow l_b \geq 248,4 \text{ mm}$$

Longueur réelle des cordons de soudures = Longueur utile + 2a

$$L_{bR} = 254,4 + 2 \cdot 4 = 262,4 \text{ mm}$$

$$L_{tR} = 248,4 + 2 \cdot 8 = 264,4 \text{ mm}$$

A partir de l_{tR} et l_{bR} on détermine la forme et les dimensions du gousset.

4.6.2 Exercice N° 2

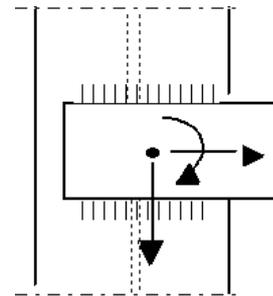
Attache d'un plat avec deux cordons de soudures sur un IPN.

Un plat de 100×10 mm est attaché par deux cordons de soudures de 6 mm d'épaisseur et de longueur utile est de 70 mm. Les efforts ramenés au centre de gravité des cordons de soudure sont:

$$N = 30,0 \text{ kN};$$

$$V = 10 \text{ kN}.$$

$$M = 6,5 \text{ kN.m}$$



Vérifier la résistance de la soudure?

Solution.

Contrainte résultante dû à V :

$$\tau_1 = V / 2a.l = 10 \times 10^3 / 2 \times 6 \times 70 = 11,9 \text{ N / mm}^2$$

Contrainte résultante dû à N:

$$\tau_2 = N / 2a.l = 30 \times 10^3 / 2 \times 6 \times 70 = 35,7 \text{ KN / mm}^2$$

Contrainte due à M (dans la section la plus sollicitée au point B):

$$\tau = M.p / I_p = 650 \times 6,35 / 270,2 = 15,28 \text{ kN / cm}^2 = 152,8 \text{ N / mm}^2;$$

Avec :

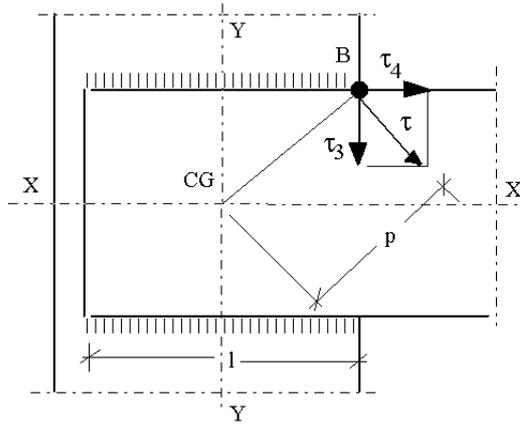
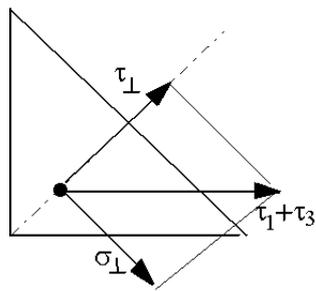
$$I_p = I_{XX} + I_{YY} = (2,0,6,7^3 / 12) + (2,0,6,7,5,3^2) = 270,2 \text{ cm}^4$$

$$p = (35^2 + 53^2)^{1/2} = 63,5 \text{ mm}$$

I_{XX}: Moment d'inertie des cordons de soudures par rapport à l'axe XX'

I_{YY}: Moment d'inertie des cordons de soudures par rapport à l'axe YY'

I_p: Moment d'inertie polaire des deux cordons de soudures;



$$\text{tg} = 53/35 = 0,7 \rightarrow \alpha = 56,6^\circ$$

$$\tau_3 = \tau \cdot \sin \alpha = 127,5 \text{ N/mm}^2; \quad \tau_4 = \tau \cdot \cos \alpha = 84,1 \text{ N/mm}^2;$$

Bilan des contraintes au point B

$$\tau_{//} = \tau_2 + \tau_4 = 35,7 + 84,1 = 119,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = (\tau_1 + \tau_3) / \sqrt{2} = (11,9 + 127,5) / \sqrt{2} = 98,6 \text{ N/mm}^2$$

Vérification de l'équation fondamentale conduit à:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} = \sqrt{98,6^2 + 3(98,6^2 + 119,8^2)} = 286,3 \text{ N/mm}^2 \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{360}{0,8 \times 1,25} = 360 \text{ N/mm}^2$$

et

$$\sigma_{\perp} = 98,6 \text{ N/mm}^2 \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ N/mm}^2$$