

10.1 Resolvidos

Ex. 10.1.1 Ligação soldada tracionada Uma placa de aço de 12mm está sujeita à uma força de tração axial (do tipo carga variável decorrente de uso e ocupação) de 40kN. Ela está conectada a uma outra placa de 12mm formando um perfil T por meio de solda de filete. Dimensionar a solda usando eletrodo E60XX. Dados: aço A36 (MR250).

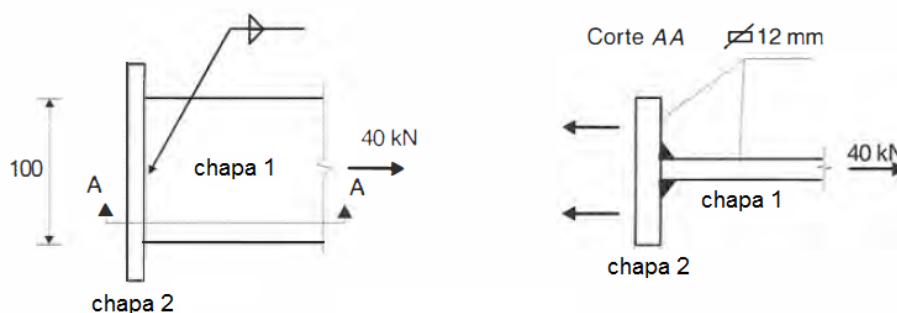


Figura 10.1: Ligação soldada tracionada.

Solução:

Primeiro é necessário determinar qual é o esforço solicitante de cálculo. Este pode ser calculado como:

$$N_{t,Sd} = \gamma_q N_k = 1,5 \times 40kN = 60kN$$

Tem-se então as seguintes disposições construtivas para a solda:

$$6,35mm < t_{min-MB} \leq 12,5mm \rightarrow w_{min} = 5mm$$

$$t_{min-MB} \geq 6,35mm \rightarrow w_{max} = t_{min-MB} - 1,5mm = 12mm - 1,5mm = 10,5mm$$

$$\therefore w = 5mm$$

$$l_w \geq 4w = 4 \times 5mm = 20mm$$

$$l_w \geq 40mm$$

$$\text{Com } l_w = 100mm \rightarrow OK!$$

Há três casos que devem ser checados: esforço de tração no metal base, esforço de cisalhamento no metal base e esforço de cisalhamento na solda. Apresenta-se a seguir os cálculos para a o esforço de tração no metal base, o qual ocorre na chapa 1.

$$A_{t,MB} = l_w t = 10,0 \times 0,5 = 5,0cm^2$$

$$N_{t,MB,Rd,esc.} = \frac{A_{t,MB}f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{5,0 \times 25}{1,1} = 113,64kN$$

$$L_w = 100mm \geq 2b = 2 \times 12mm = 24mm \rightarrow C_t = 1,0$$

(Cap. 4.3.3 - Coeficiente de Redução C_t - Chapas Planas)

$$N_{t,MB,Rd,rup.} = \frac{C_t A_{t,MB} f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{1,0 \times 5,0 \times 40}{1,35} = 148,15kN$$

Como $N_{t,MB,Rd,rup.} = 148,15kN > N_{t,MB,Rd,esc.} = 113,64kN > N_{t,Sd} = 60kN$, na chapa 1 não ocorrerá falha sob a solda. Checa-se, em seguida, o esforço cortante no metal base, o qual ocorre na chapa 2. Destaca-se que é necessário multiplicar a área do metal base por 2 pois a ruptura terá que acontecer em duas regiões simultaneamente como mostrado na figura 10.14 da apostila.

Tem-se então:

$$A_{v,MB} = 2l_w t = 2 \times 10,0 \times 0,5 = 10,0cm^2$$

$$V_{MB,Rd,esc.} = \frac{0,6A_{v,MB}f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 10,0 \times 25}{1,1} = 136,36kN$$

$$L_w = 100mm \geq 2b = 2 \times 12mm = 24mm \rightarrow C_t = 1,0$$

(Cap. 4.3.3 - Coeficiente de Redução C_t - Chapas Planas)

$$V_{MB,Rd,rup.} = \frac{0,6C_t A_{t,MB} f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{0,6 \times 1,0 \times 10 \times 40}{1,35} = 177,78kN$$

Como $V_{MB,Rd,rup.} = 177,78kN > V_{MB,Rd,esc.} = 136,36kN > N_{t,Sd} = 60kN$, na chapa 2 não ocorrerá falha sob a solda. Finalmente, deve-se checar o esforço de cisalhamento na solda. Para combinações normais e lembrando que há duas fileiras de solda (uma de cada lado da chapa), tem-se então:

Para eletrodo E60XX $\rightarrow f_w = 415MPa$

$$t_w = \frac{w\sqrt{2}}{2} = \frac{5mm\sqrt{2}}{2} = 3,535mm$$

$$A_w = 2t_w l_w = 2 \times 0,3535 \times 10,0 = 7,07cm^2$$

$$V_{w,Rd} = \frac{0,6A_w f_w}{\gamma_{w2}} = \frac{0,6 \times 7,07 \times 41,5}{1,35} = 130,40kN$$

Como $V_{w,Rd} = 130,40kN > N_{t,Sd} = 60kN$, a solda resiste ao esforço solicitante. Portanto, como todos os elementos foram checados, o dimensionamento é satisfatório.

Ex. 10.1.2 Comprimento necessário solda Qual é o comprimento e qual é a espessura da solda de filete requeridos para a conexão da figura? Admitir aço A36 e eletrodo E60XX. O esforço solicitante é variável decorrente da ação do vento.

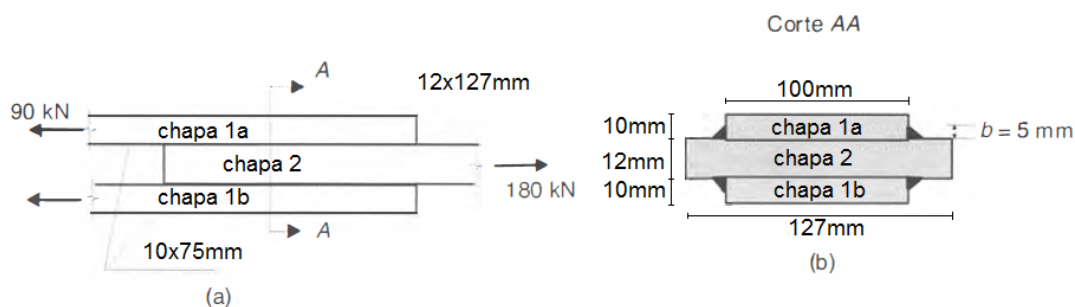


Figura 10.2: Vista lateral e corte AA.

Solução:

É necessário determinar qual é o esforço solicitante de cálculo. Este pode ser calculado como:

$$N_{t,Sd} = \gamma_q N_k = 1,4 \times 180 = 252kN$$

Tem-se então as seguintes disposições construtivas para a solda:

$$\begin{aligned} 6,35mm < t_{min-MB} &\leq 12,5mm \rightarrow w_{min} = 5mm \\ t_{min-MB} &\geq 6,35mm \rightarrow w_{max} = t_{min-MB} - 1,5mm = 10mm - 1,5mm = 8,5mm \\ \therefore w &= 5mm \rightarrow OK! \\ l_w &\geq 4w = 4 \times 5mm = 20mm \\ l_w &\geq 40mm \\ l_w &\geq \text{Distância entre Soldas} \rightarrow l_w \geq 100mm \\ \therefore l_w &\geq 100mm \end{aligned}$$

Para este caso há duas verificações na ligação: esforço de cisalhamento no metal base e esforço de cisalhamento na solda.

Além disso, é possível abordar o problema para as soldas de duas maneiras distintas, mas que chegam ao mesmo resultado. A primeira é considerar que as 4 soldas resistem ao esforço solicitante de cálculo integral ($N_{t,Sd} = 252kN$). A segunda é considerar que 2 soldas resistem à metade do esforço solicitante de cálculo ($N_{t,Sd}/2 = 126kN$). Será utilizado a primeira abordagem nos cálculos do problema.

Calculando-se o esforço resistente da solda ao cisalhamento em função do comprimento da solda e comparando-se esse valor com o esforço solicitante de cálculo é possível determinar qual o menor valor do comprimento de solda necessário. Tem-se então:

Para eletrodo E60XX $\rightarrow f_w = 415MPa$

$$t_w = \frac{w\sqrt{2}}{2} = \frac{5\sqrt{2}}{2} = 3,535mm$$

$$A_w = 4t_w l_w = 4 \times 3,535 \times l_w = 1,414l_w \text{ (para } l_w \text{ em cm)}$$

$$V_{w,Rd} = \frac{0,6A_w f_w}{\gamma_{w2}} = \frac{0,6 \times 1,414l_w \times 41,5}{1,35} = 26,08l_w \text{ (para } l_w \text{ em cm e } V_{w,Rd} \text{ em kN)}$$

$$V_{w,Rd} = 26,08l_w \geq V_{Sd} = 252 \rightarrow l_w \geq 9,662 = 96,62mm$$

Sendo assim, será adotado $l_w = 100mm$, já que este valor atende à todos os critérios apresentados.

Como se trata de soldas de filete longitudinais nas ligações extremas de elementos axialmente solicitados, o comprimento efetivo deve ser tomado como o comprimento total da solda multiplicado pelo fator de redução β , dado por:

$$\beta = 1,2 - 0,002 \left(\frac{l_w}{w} \right) = 1,2 - 0,002 \left(\frac{100}{5} \right) = 1,16 \begin{cases} \geq 0,6 \\ \leq 1,0 \end{cases} \quad (10.1)$$

Portanto:

$$l_{w,total} = \beta * l_w = 1,16 * 100 = 116mm \quad (10.2)$$

E, por fim, a verificação no metal base para ambas as chapas é função da área do metal base, definida pelo comprimento de solda pela respectiva espessura da chapa:

Para escoamento da chapa 2:

$$V_{MB,Rd} = \frac{0,6A_{v,MB} f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 10,0 \times 1,2 \times 25}{1,1} = 327,27kN$$

Na avaliação da ruptura no metal base, usa-se o coeficiente C_t para a avaliação da transmissão dos esforços. Nesse caso, como a força de tração é transmitida somente por soldas longitudinais ao longo de ambas as suas bordas, e $l_w = b$, sendo $b = 100mm$, o coeficiente de redução $C_t = 0,75$.

Para a ruptura da chapa 2:

$$V_{MB,Rd} = \frac{0,6C_tA_{v,MB}f_u}{\gamma_{a2}} = 2 \frac{0,6 \times 0,75 \times 10,0 \times 1,2 \times 40}{1,35} = 320,0kN$$

Como $V_{Sd} < V_{MB,Rd} = 320,0kN$, o metal base está verificado.

Ex. 10.1.3 Solda com filetes de comprimentos diferentes Calcular a ligação do tipo solda de filete de um perfil L 127x12,7mm, submetido à tração axial permanente de pequena variabilidade, com uma chapa gusset como indicando na figura. Adotar aço ASTM A36 (MR250), eletrodo E70XX e força oriunda de ações permanentes (peso próprio de estruturas pré-moldadas). Não há a necessidade de verificar o colapso por rasgamento.

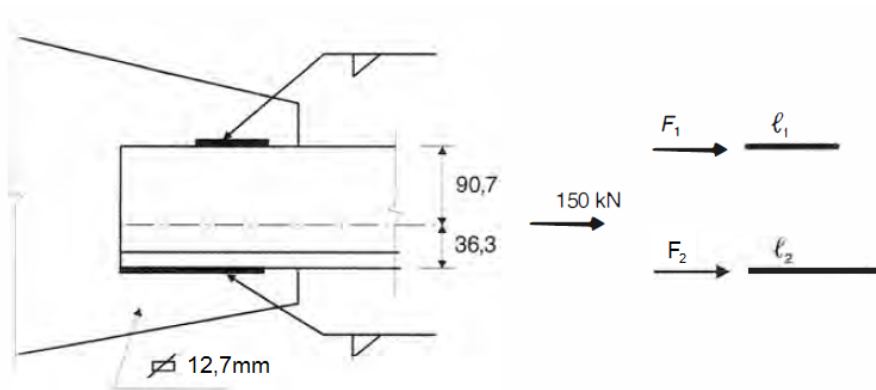


Figura 10.3: Filetes de comprimentos diferentes.

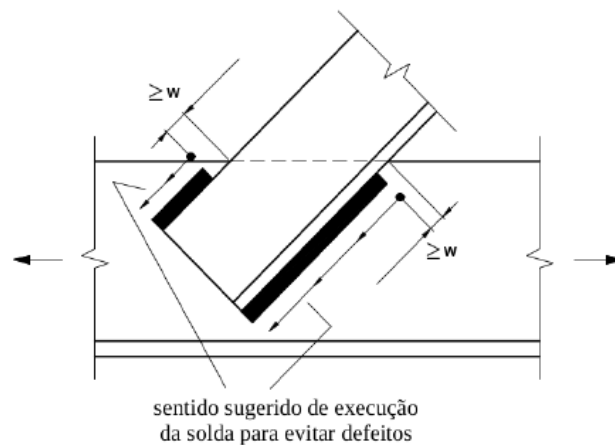


Figura 10.4: Sentido de execução da solda e distância mínima da borda w .

Solução:

Começa-se checando as seguintes disposições construtivas a seguir, lembrando que a chapa e o perfil possuem a mesma espessura de 12,7mm.

$$12,5mm < t_{min-MB} \leq 19mm \rightarrow w_{min} = 6mm$$

$$t_{MB} \geq 6,35mm \rightarrow w_{max} = t_{MB} - 1,5mm = 12,7mm - 1,5mm = 11,2mm$$

$$\therefore w = 6mm$$

$$l_{w,min} \geq \begin{cases} 4w = 4 \times 6mm = 24mm \\ 40mm \end{cases}$$

$$\therefore l_{w,min} \geq 40mm$$

Os esforços desenvolvidos nas soldas devem ter resultante passando pelo centro de gravidade do perfil L para que não surjam efeitos de flexão na ligação soldada e no perfil. Sendo l_{w1} e l_{w2} os comprimentos das soldas, pode-se determinar as forças F_1 e F_2 que atuam nas soldas através das equações de equilíbrio, como mostrado a seguir:

$$\begin{aligned}\Sigma M_{l_2} &= 0 \\ F \times 36,3mm - F_1 \times 127mm &= 0 \\ 150kN \times 36,3mm - F_1 \times 127mm &= 0 \\ F_1 &= 42,874kN\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma F_x &= 0 \\ F - F_1 - F_2 &= 0 \\ 150kN - 42,874kN - F_2 &= 0 \\ F_2 &= 107,126kN\end{aligned}$$

Entretanto, esses valores ainda não foram majorados. Sendo $F_i = N_{ki}$, deve-se então fazê-lo para obter-se os seguintes esforços solicitantes de cálculo:

$$\begin{aligned}N_{Sd} &= \gamma_g N_k = 1,3 \times 150kN = 195kN \\ N_{1,Sd} &= \gamma_g N_{k1} = 1,3 \times 42,874kN = 55,736kN \\ N_{1,Sd} &= \gamma_g N_{k2} = 1,3 \times 107,126kN = 139,264kN\end{aligned}$$

Para determinar os valores dos comprimentos de solda l_{w1} e l_{w2} deve-se calcular o valor dos esforços resistentes de cálculo para então compará-lo com os valores dos esforços solicitantes de cálculo já determinados. Para esse caso, devem ser checados os casos de esforço de cisalhamento na solda e de esforço de cisalhamento no metal base (chapa). Tem-se, respectivamente:

Para eletrodo E70XX $\rightarrow f_w = 485MPa$

$$t_w = \frac{w\sqrt{2}}{2} = \frac{6\sqrt{2}}{2} = 4,243mm$$

$$A_w = t_w l_w = 0,4243 \times l_{w1} \text{ (para } l_{w1} \text{ em cm)}$$

$$V_{w,Rd} = \frac{0,6A_w f_w}{\gamma_{w2}} = \frac{0,6 \times (0,4243 \times l_{w1}) \times 48,5}{1,35} = 94,160l_{w1}kN \text{ para } l_{w1} \text{ em cm}$$

$$A_{v,MB} = l_w t = l_{w1} \times 1,27 \text{ (para } l_{w1} \text{ em cm)}$$

$$V_{MB,Rd,esc} = \frac{0,6A_{v,MB} f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times (l_{w1} \times 1,27) \times 25}{1,1} = 17,32l_{w1}kN \text{ para } l_{w1} \text{ em cm}$$

Assumindo $l_w = 40mm (> 2b) \rightarrow C_t = 1,0$

(Cap. 4.3.3 - Coeficiente de Redução C_t - Chapas Planas)

$$V_{MB,Rd,rup.} = \frac{0,6C_t A_{t,MB} f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{0,6 \times 1,0 \times l_{w1} \times 1,27 \times 40}{1,35} = 22,58l_{w1}kN \text{ para } l_{w1} \text{ em cm}$$

Para o caso crítico do menor esforço resistente de cálculo, o qual corresponde ao escoamento do metal base, tem-se:

$$\begin{aligned}V_{MB,Rd,esc} = 17,32l_{w1}kN &\geq N_{1,Sd} = 55,736kN \rightarrow l_{w1} \geq 3,218cm = 32,18mm \\ \therefore l_{w1} = l_{w,min} &= 40mm\end{aligned}$$

Como $l_{w1} > 24mm = 2b \rightarrow C_t = 1,0 \rightarrow OK!$

Pode-se então repetir o mesmo processo para determinar o valor de l_{w2} ou pode-se calculá-lo ao perceber que a relação entre l_{w1} e l_{w2} com os esforços $N_{1,Sd}$ e $N_{2,Sd}$ deve ser mantida constante. Adotando o segundo método por simplicidade, tem-se:

$$\frac{l_{w1}}{l_{w2}} = \frac{N_{1,Sd}}{N_{2,Sd}} \rightarrow \frac{40mm}{l_{w2}} = \frac{55,736kN}{139,264kN} \rightarrow l_{w2} \geq 99,945mm$$

Checa-se finalmente, o valor do comprimento efetivo da solda através da seguinte equação:

$$l_w = L_w \beta = L_w \left[1,2 - 0,002 \left(\frac{L_w}{w} \right) \begin{cases} \geq 0,6 \\ \leq 0,9 \end{cases} \right]$$

Entretanto, pode-se notar que o valor do comprimento efetivo de solda somente será reduzido caso o valor de $0,002 \left(\frac{L_w}{w} \right) \geq 0,2$, ou seja, se o valor de $L_w \geq \frac{0,2}{0,002} w = 100w = 100 \times 6mm = 600mm$. Então, pode-se optar por valores aproximadamente iguais aos calculados mas que sejam mais facilmente executáveis em obra. Por exemplo, pode-se determinar:

$$l_{w1} = 40mm$$

$$l_{w2} = 100mm$$

É necessário ainda garantir que há um valor de, ao menos, $w = 6mm$ entre a borda da peça e o final do filete de solda, como indicado na figura 10.4.

Ex. 10.1.4 Solda no entorno com filetes diferentes Resolver novamente o problema anterior 10.1.3 considerando o alteração na disposição solda de filete apresentada na figura a seguir. Adotar aço A36 (MR250), eletrodo E70XX e força oriunda de ações permanentes (peso próprio de estruturas pré-moldadas).

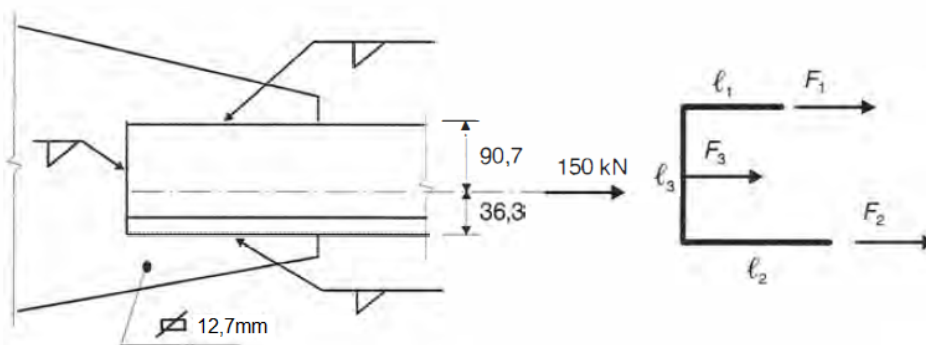


Figura 10.5: Esquema da solda em todo o entorno.

Solução:

Considerando-se o valor de l_{w3} constante e igual à distância entre l_{w1} e l_{w2} , ou seja:

$$l_{w3} = 90,7mm + 36,3mm = 127mm$$

Tem-se também as seguintes disposições construtivas, as quais foram apresentadas no exercício anterior 10.1.3:

$$12,5mm < t_{min-MB} \leq 19mm \rightarrow w_{min} = 6mm$$

$$t_{MB} \geq 6,35mm \rightarrow w_{max} = t_{MB} - 1,5mm = 12,7mm - 1,5mm = 11,2mm$$

$$\therefore w = 6mm$$

$$l_{w,min} \geq \begin{cases} 4w = 4 \times 6mm = 24mm \\ 40mm \end{cases}$$

$$\therefore l_{w,min} \geq 40mm$$

Sendo que $l_{w,min}$ se aplica às solda 1, 2 e 3 somadas. Deve-se então calcular os valores para os casos de esforço de cisalhamento na solda e de esforço de tração no metal base (chapa gusset). Tem-se, portanto para a região da solda 3, respectivamente:

Para eletrodo E70XX $\rightarrow f_w = 485MPa$

$$t_w = \frac{w\sqrt{2}}{2} = \frac{6mm\sqrt{2}}{2} = 4,243mm$$

$$A_w = t_w l_w = 0,4243 \times 12,7 = 5,389cm^2$$

$$V_{w,Rd} = \frac{0,6A_w f_w}{\gamma_{w2}} = \frac{0,6 \times 5,389 \times 48,5}{1,35} = 116,16kN$$

$$A_{t,MB} = l_w t = 12,7 \times 1,27 = 16,129cm$$

$$V_{MB,Rd,esc.} = \frac{A_{t,MB} f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{16,129 \times 25}{1,1} = 366,568kN$$

$$L_w \geq 2b = 2 \times 12mm = 24mm \rightarrow C_t = 1,0$$

(Cap. 4.3.3 - Coeficiente de Redução C_t - Chapas Planas)

$$V_{MB,Rd,rup.} = \frac{C_t A_{t,MB} f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{1,0 \times 16,129 \times 40}{1,35} = 477,896kN$$

Como o caso crítico é para o cisalhamento na solda, tem-se que a solda 3 resistirá à 116,15kN do valor de $N_{Sd} = 195kN$. Portanto, as soldas 1 e 2 terão que resistir à uma força igual à:

$$N_{Sd-restante} = 195kN - 116,15kN = 78,85kN$$

Pelo mesmo método apresentado no exercício anterior tem-se:

$$\begin{aligned} \Sigma M_{l_2} &= 0 \\ N_{Sd-restante} \times 36,3mm - N_{1,Sd} \times 127mm &= 0 \\ 78,85 \times 3,63 - N_{1,Sd} \times 12,7 &= 0 \\ \therefore N_{1,Sd} &= 22,537kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ N_{Sd-restante} - N_{1,Sd} - N_{2,Sd} &= 0 \\ 78,85kN - 22,537kN - N_{2,Sd} &= 0 \\ N_{2,Sd} &= 56,313kN \end{aligned}$$

Sendo os valores para os casos de resistência ao cisalhamento da solda e de resistência ao cisalhamento no metal base iguais aos do exercício anterior, tem-se para o caso crítico que:

$$V_{MB,Rd,esc.} = 17,32l_{w1}kN \text{ para } l_{w1} \text{ em cm}$$

$$V_{MB,Rd,esc.} = 17,32l_{w1}kN \geq N_{1,Sd} = 22,537kN \rightarrow l_{w1} \geq 1,301cm = 13,01mm < 40mm$$

Como $l_{w,total} \geq 40mm$, adotando $l_{w1} = 25mm \rightarrow l_{w1} > 2b \therefore C_t = 1,0 \rightarrow OK!$

$$\frac{l_{w1}}{l_{w2}} = \frac{N_{1,Sd}}{N_{2,Sd}} \rightarrow \frac{25mm}{l_{w2}} = \frac{22,537kN}{56,313kN} \rightarrow l_{w2} \geq 62,467mm$$

Adotando $l_{w2} = 65mm \rightarrow l_{w,total} = l_{w1} + l_{w2} + l_{w2} = 12,7 + 25 + 65 = 102,7mm > 40mm \rightarrow OK!$
Checa-se o valor do comprimento efetivo de solda através da seguinte equação:

$$l_w = L_w \beta = L_w \left[1,2 - 0,002 \left(\frac{L_w}{w} \right) \begin{cases} \geq 0,6 \\ \leq 0,9 \end{cases} \right]$$

Entretanto, pode-se notar que o valor do comprimento efetivo de solda somente será reduzido caso o valor de $0,002 \left(\frac{L_w}{w} \right) \geq 0,2$, ou seja, se o valor de $L_w \geq 100w = 100 \times 6\text{mm} = 600\text{mm}$. Então:

$$l_{w1} = 25\text{mm}$$

$$l_{w2} = 65\text{mm}$$

Esses valores são aplicáveis desde que sejam executado em um único passe juntamente com l_{w3} , para que o sejam considerados como um único filete de solda e atendam à disposição construtiva de que $l_w \geq 40\text{mm}$.

É necessário ainda garantir que há um valor de, ao menos, $w = 6\text{mm}$ entre a borda da peça e o final do filete de solda, como mostrado no exercício anterior 10.1.3.

10.2 Propostos, nível iniciante

Ex. 10.2.1 Solda de Topo Determine a máxima carga acidental característica P que pode ser aplicada na ligação de topo da figura. Cada componente é uma placa CH 15,875x177,8 mm de aço A242. A solda de eletrodo E70XX tem uma perna de 7,94 mm.

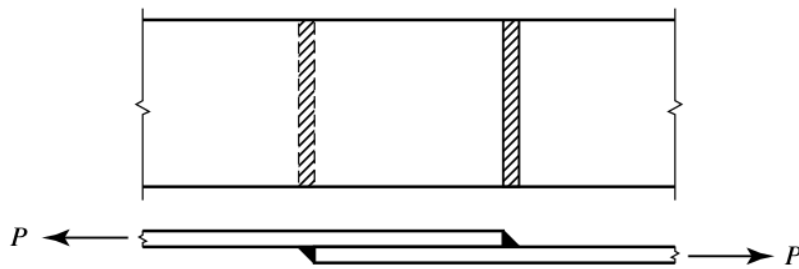


Figura 10.6: Solda de Topo entre chapas.

Ex. 10.2.2 Solda no contorno Uma barra tracionada é conectada por filetes de solda de eletrodo E70XX com perna de 4,76 mm de largura, conforme figura. A chapa interna é uma CH 12,7x76,2 mm e as externas são CH 7,94x76,2 mm. Todas são de aço MR250. Determine a máxima carga acidental característica P que pode ser aplicada na ligação.

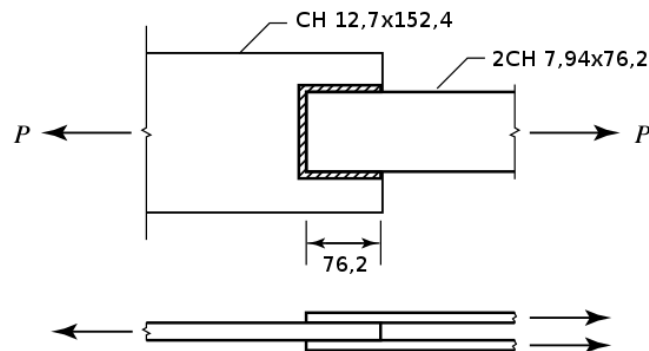


Figura 10.7: Solda no contorno.

Ex. 10.2.3 Estados Limites para a Solda Determine a máxima carga característica que pode ser aplicada se a relação cargas acidentais sobre cargas permanentes é 3,0. Investigue todos os estados limites. A barra tracionada é de aço A572 grau 50 e a chapa gusset de A36. A solda tem uma perna de 3,175 mm e foi feita com eletrodo E70XX.

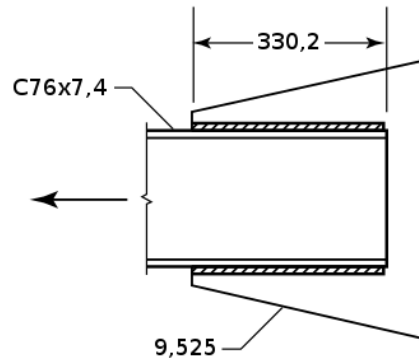


Figura 10.8: Esquema da ligação do Perfil C e a chapa gusset.

Ex. 10.2.4 Dimensionamento de solda cantoneira Dimensione a ligação soldada da figura. As forças dadas são características e valem $F_{gk} = 88kN$ de pesos de estruturas metálicas e $F_{qk} = 222kN$ de uso. Use $f_y = 50kN/m^2$ para a cantoneira e $f_y = 36kN/cm^2$ para a chapa gusset. Faça um desenho final da solda dimensionada.

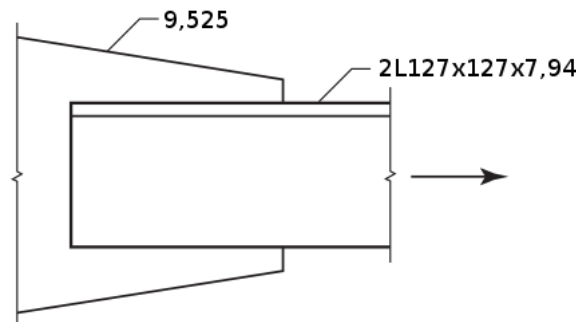


Figura 10.9: Cantoneira à ser Soldada.

Ex. 10.2.5 Dimensionamento de solda perfil C Dimensione uma ligação soldada para conectar um perfil C 102x8,0 de aço A572 grau 50 à uma chapa gusset de 9,525 mm de espessura de aço A36. Faça o detalhamento completo da ligação.

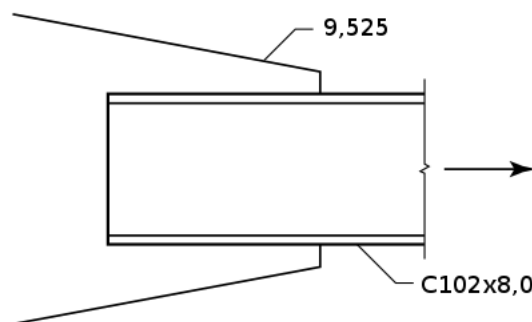


Figura 10.10: Perfil C para ser ligado com solda.

10.3 Propostos, nível intermediário

Ex. 10.3.1 Diversas pernas do filete Determine a dimensão b da perna do filete de solda necessária para desenvolver o esforço resistente de cálculo das peças nas ligações esquematizadas. Aço MR250 e eletrodo E60XX.

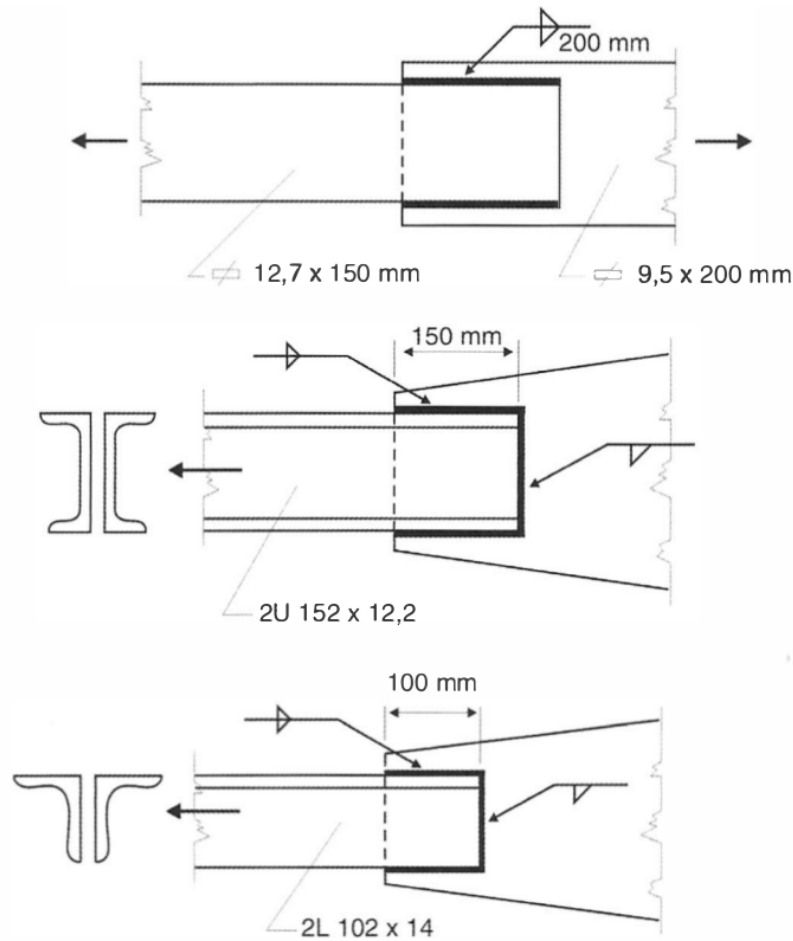


Figura 10.11: Ligações Esquemáticas.

10.4 Propostos, nível graduado

Ex. 10.4.1 Dimensionamento às cegas Dimensione uma barra tracionada e sua conexão de acordo com as seguintes condições:

- A barra deve ser composta por cantoneiras de abas iguais de aço A572 grau 50;
- Comprimento de 548 cm;
- A aba da(s) cantoneira(s) será(ão) soldada(s) a uma chapa gusset de 9,525 mm de espessura de aço A36;
- A carga permanente característica vale 200 kN, a acidental característica 266 kN e a do vento 275 kN (todas de tração).

Mostre os resultados na forma de um desenho técnico de detalhamento da ligação com memorial de cálculo completo.