



Universidade Presbiteriana Mackenzie

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

Capítulo XVI

Ligações soldadas

Disciplinas: *Estruturas Metálicas*
Prof. Dr *Celso Antonio Abrantes*
Outubro - 2015



Universidade São Judas Tadeu

ENGENHARIA CIVIL

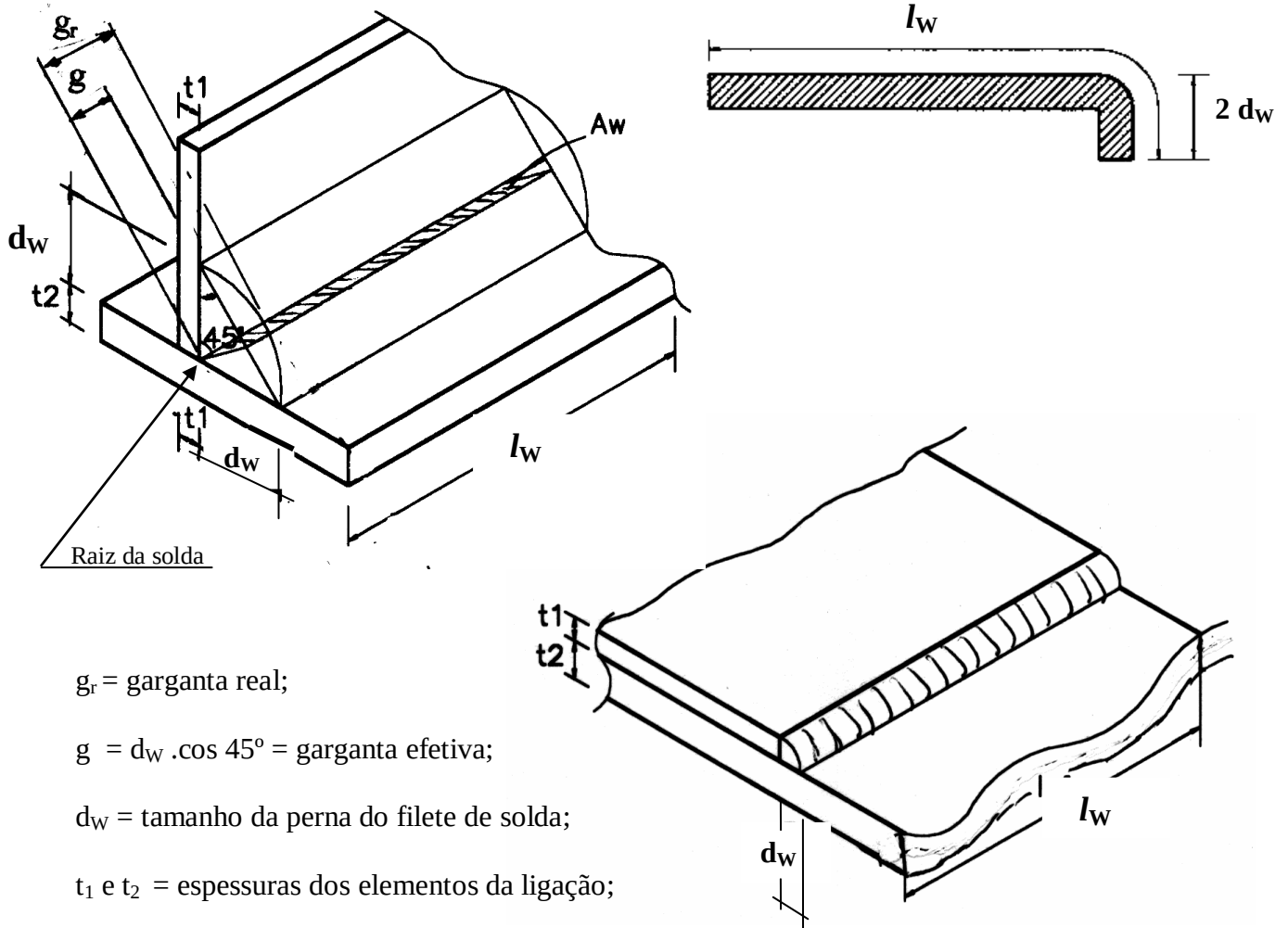
Capítulo XVI

Ligações soldadas

Disciplinas: *Estruturas de Madeiras*
Estruturas Metálicas
Prof. Dr Celso Antonio Abrantes
Outubro - 2015

LIGAÇÕES SOLDADAS - SOLDAS DE FILETE (segundo o item 6.2.6.2 da NBR 8800:2008)

1. Disposições aplicáveis:



g_r = garganta real;

$g = d_w \cdot \cos 45^\circ$ = garganta efetiva;

d_w = tamanho da perna do filete de solda;

t_1 e t_2 = espessuras dos elementos da ligação;

$t_{\min}$ = espessura mínima equivalente a menor espessura das chapas soldadas (t_1 ou t_2);

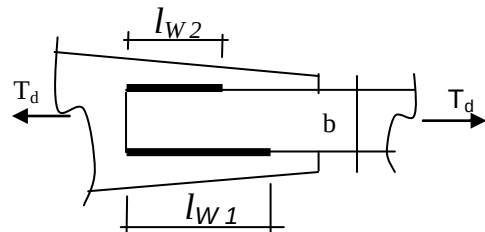
l_w = comprimento efetivo do filete de solda (incluindo o retorno = $2 d_w$)

$2 d_w$ = retorno

$A_w = g \cdot l_w = d_w \cdot \cos 45^\circ \cdot l_w$ = área de solda

Restrições: $\begin{cases} l_w \geq 40 \text{ mm e} \\ l_w \geq 4 d_w \\ l_{w1} \geq l_{w2} \geq b \text{ apenas no caso de barra chata;} \end{cases}$

$A_{MB} = d_w \cdot l_w$ = Área do metal base.



2. Adoção da dimensão “ d_w ” da perna da solda:

Definir dimensões máxima ($d_{w \max}$) e mínima ($d_{w \min}$) da perna de solda, em função das espessuras das chapas a serem soldadas, é necessário para garantir que a penetração do metal da solda no metal base não rompa a chapa mais fina da ligação e garanta penetração suficiente na chapa mais grossa para transmissão de esforços.

$$d_{w \min} \leq d_w \leq d_{w \max}$$

2.1 Dimensão máxima da perna de solda ($d_{w \max}$)

(pag 74 da NBR8800:2008)

Se $t_{\min} < 6,35 \text{ mm}$, $d_{w \max} = t_{\min}$

ou

se $t_{\min} \geq 6,35 \text{ mm}$, $d_{w \max} = t_{\min} - 1,5 \text{ mm}$

Onde: $t_{\min}$ = menor espessura de chapa na ligação.

2.2 Tamanho mínimo da perna de uma solda de filete ($d_{w \min}$)

(pag 74 da NBR8800:2008)

Tabela 10 da NBR 8800:2008: Tamanho mínimo da perna de uma solda de filete ($d_{w \min}$)

Menor espessura do metal-base na junta ($t_{\min}$) (mm)	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, ($d_{w \min}$) ¹⁾ (mm)
Abaixo de 6,35 até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19,0	6
Acima de 19,0	8
¹⁾ Executadas somente com um passe.	

2.3 Compatibilidade do metal-base com o metal da solda

Ver tabela 7 da NBR 8800:2008.

3 Força resistente de cálculo $F_{Rd,W}$ dos diversos tipos de solda

As forças resistentes de cálculo $F_{Rd,W}$ dos diversos tipos de solda, estão indicadas na tabela 8 da NBR 8800:2008.

3.1 Resistências de cálculo de soldas filete (item 6.2.6.2 da NBR 8800:2008)

3.1.1 Resistência a tração ou compressão paralelas ao eixo da solda.

Não precisa ser considerado.

3.1.2 Resistência a cisalhamento do metal da solda (ruptura da solda)

(item 6.2.5 da NBR 8800:2008, pag 71)

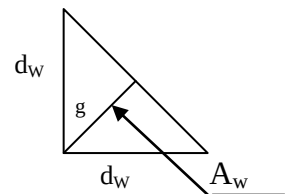
$$F_{W,Rd} = 0,6 \frac{A_w f_w}{\gamma_{W2}}$$

$A_w = g \cdot l_w = d_w \cdot \cos 45^\circ \cdot l_w = \text{área de solda}$;

f_w = resistência a tração do metal da solda;

$\gamma_{W2} = 1,35$ para combinações normais ou de construção ou

$\gamma_{W2} = 1,15$ para combinações excepcionais.



Resistência à tração do metal da solda. Tabela A.4 da NBR 8800:2008, pag 110.

Metal da solda	f_w (MPa)
Todos eletrodos com classe de resistência 6 ou 60	415
Todos eletrodos com classe de resistência 7 ou 70	485
Todos eletrodos com classe de resistência 8 ou 80	550

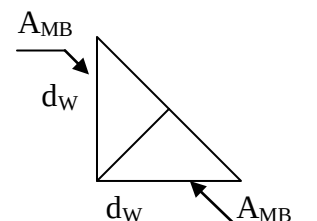
3.1.3 Resistência a escoamento do metal base

(item 6.5.5- a da NBR 8800:2008, pag 87)

Para o estado limite de escoamento:

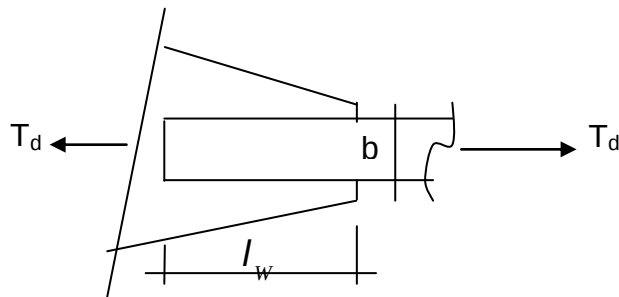
$$F_{Rd} = \frac{0,60 \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \Rightarrow F_{MB,Rd} = \frac{0,60 \cdot A_{MB} \cdot f_y}{\gamma_{W1}}$$

$A_{MB} = d_w \cdot l_w = \text{Área do metal base.}$



4) Área líquida efetiva (A_e) de barras tracionadas soldadas, em função dos comprimentos dos cordões de solda:

Quando a carga for transmitida a uma chapa por soldas longitudinais ao longo de ambas as bordas, na extremidade da chapa, o comprimento das soldas não pode ser inferior a largura da mesma.



l_w = comprimento da solda

b = largura da chapa = distância entre os cordões de solda

t = espessura da chapa

Da verificação da suficiência a tração da barra, vem:

$$A_g = \text{área bruta} = b \cdot t$$

$$A_n = \text{área líquida} = A_g - A_{\text{furos}}$$

No caso, para barras soldadas, $A_n = A_g$

A_e = área líquida efetiva

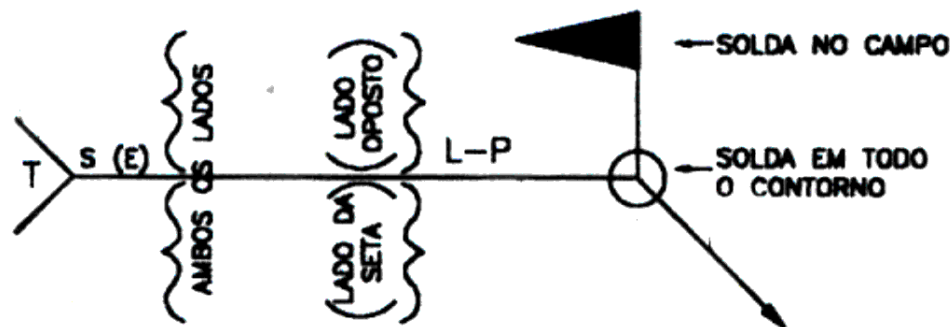
$$A_e = c_t A_n$$

$$\text{Valores de } c_t \text{ para: } \left\{ \begin{array}{ll} l_w \geq 2,0 b, & c_t = 1,00 \\ 1,5 b \leq l_w < 2,0 b, & c_t = 0,87 \\ b \leq l_w < 1,5 b, & c_t = 0,75 \end{array} \right.$$

Recordação: Estados limite últimos aplicáveis ao dimensionamento de barras tracionadas:
(item 5.2.2 da NBR 8800:2008)

$$\text{E.L. nº1: Escoamento da seção bruta: } N_{tRd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}}$$

$$\text{E.L. nº2: Ruptura da seção líquida: } N_{tRd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

5) Símbolos básicos de soldagem e sua localização:

SOLDA LOCALI-	EM CHANFRO						
	RETO OU S/ CHANFRO	V OU X	MEIO V OU K	U OU DUPLO U	J OU DUPLO J	COM FACE CONVEXA	C/ UMA FACE CONVEXA
LADO DA SETA							
LADO OPOSTO							
AMBOS OS LADOS							
S/ INDICAÇÃO DE LADO		NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO

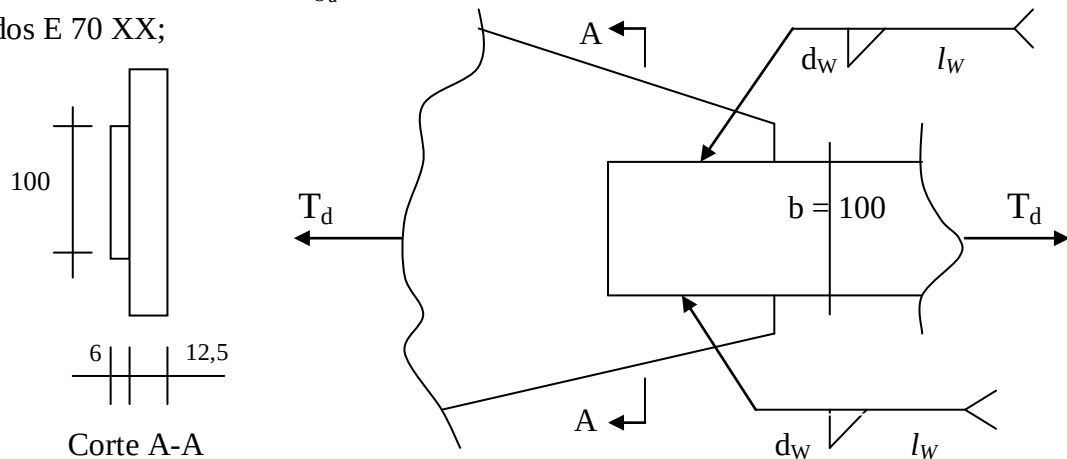
SOLDA LOCALI-	EM ÂNGULO	TAMPÃO OU FENDA	POR PONTO OU PROJEÇÃO	COSTURA	SUPORTE	REVESTIMENTO	ENCAIXE PARA JUNTA BRAZADA	FECHAMENTO OU ARESTA	
LADO DA SETA									
LADO OPOSTO						NÃO USADO			
AMBOS OS LADOS		NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO		NÃO USADO	NÃO USADO
S/ INDICAÇÃO DE LADO	NÃO USADO	NÃO USADO			NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO	NÃO USADO

Ilustrações do livro: Edifícios Industriais em Aço.

6. Exercícios :

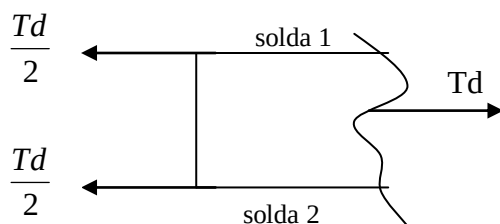
6.1 Dimensionar a ligação soldada da tira de ferro chato à chapa de ligação, considerando:

- 1) Aço ASTM A-36, com $f_y = 250 \text{ MPa}$ e $f_u = 400 \text{ MPa}$;
- 2) A tira e a chapa de ligação são suficientes para a carga aplicada.
- 3) Carga axial de cálculo: $T_d = N_{tsd} = 70 \text{ kN}$;
- 4) Eletrodos E 70 XX;



Solução:

1- Esforços nos cordões de solda:



Barra simétrica, T_d aplicada no eixo de simetria, portanto: $R_{S1} = R_{S2}$

$$R_{S1} = R_{S2} = \frac{T_d}{2} = \frac{N_{ts,d}}{2} = \frac{70}{2} = 35,0 \text{ kN}$$

2 -Adoção da perna de solda:
(pag 66 da NBR 8800:2008)

$$t_{\min} = 6,0 \text{ mm} < 6,35 \text{ mm} \Rightarrow d_{w,\max} = t_{\min} = 6,0 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = 6,0 \text{ mm} < 6,35 \text{ mm} \xrightarrow{\text{tabela 10}} d_{w,\min} = 3,0 \text{ mm}$$

$$\text{Assim, } d_{w,\min} = 3,0 \text{ mm} \leq d_w \leq d_{w,\max} = 6,0 \text{ mm} \Rightarrow$$

$$\text{Adota-se } d_w = 6,0 \text{ mm} = 0,6 \text{ cm}$$

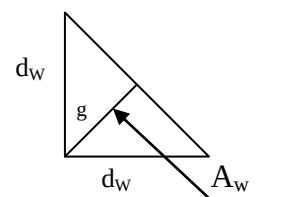
3- Resistência da ligação:

A resistência da ligação é o menor dentre os valores da resistência a cisalhamento do metal da solda (ruptura da solda) ou resistência a escoamento do metal base.

3.1 Resistência a cisalhamento do metal da solda (ruptura da solda)

$$A_w = g \cdot l_w = d_w \cdot \cos 45^\circ \cdot l_w = \text{área de solda}$$

$$f_w = 485 \text{ MPa} = 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 70 XX})$$



$$A_w = 0,6 \cdot \cos 45^\circ \cdot l_w = 0,4242 \cdot l_w$$

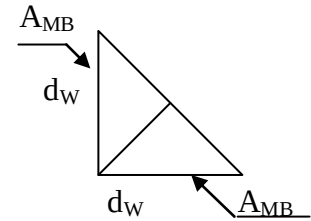
$$F_{w,Rd} = 0,6 \frac{A_w f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{0,4242 \cdot l_w \cdot 48,5}{1,35} = 9,145 \cdot l_w \text{ (kN)}$$

3.2 Resistência a escoamento do metal base:

$$A_{MB} = d_w \cdot l_w = 0,6 \cdot l_w$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ (Aço ASTM A-36)}$$

$$F_{MB,Rd} = 0,6 \frac{A_{MB} \cdot f_y}{\gamma_{w1}} = 0,6 \frac{0,6 \cdot l_w \cdot 25}{1,1} = 8,182 \cdot l_w \text{ (kN)}$$



3.3 Conclusão

Adota-se $F_{MB,Rd} = 8,182 \cdot l_w$ (o menor, com l_w em centímetros)

4- Determinação dos comprimentos dos cordões de solda:

$$\text{Fazendo } Td/2 = \phi R_n, \text{ vem: } 35 = 8,182 \cdot l_w \Rightarrow l_w = l_{w1} = l_{w2} = 4,28 \text{ cm} = 43 \text{ mm}$$

$$\text{Restrições: } l_w = 43 \text{ mm} > 4 d_w = 4 \cdot 0,6 = 24 \text{ mm} \therefore \text{OK}$$

$$l_w = 43 \text{ mm} > 40 \text{ mm} \therefore \text{OK}$$

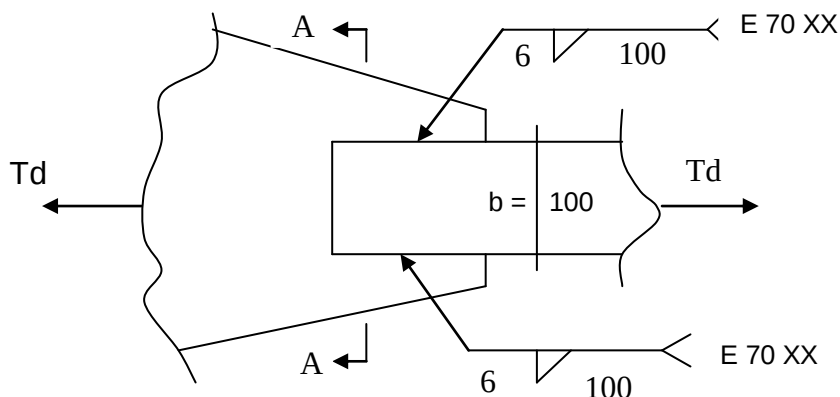
$$l_w = 43 \text{ mm} < b = 100 \text{ mm} \Rightarrow \text{adota-se } l_w = l_{w,min} = b = 100 \text{ mm (Apenas no caso de barra chata)}$$

-Observação:

Como l_w foi adotado pelo valor mínimo e não pelo valor necessário, poder-se-ia a favor da economia, adotar para o valor de d_w um número inteiro inferior a 6 mm, contido no intervalo $d_{w,min} = 3,0 \text{ mm} \leq d_w \leq d_{w,max} = 6,0 \text{ mm}$.

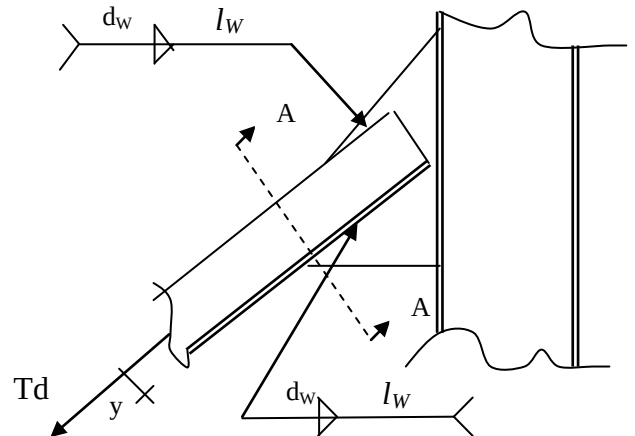
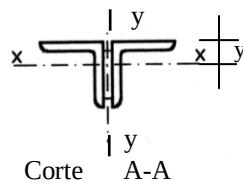
5- Representação da solução:

Adota-se $l_w = 100 \text{ mm}$ (incluindo retorno de $2 d_w = 12 \text{ mm}$)



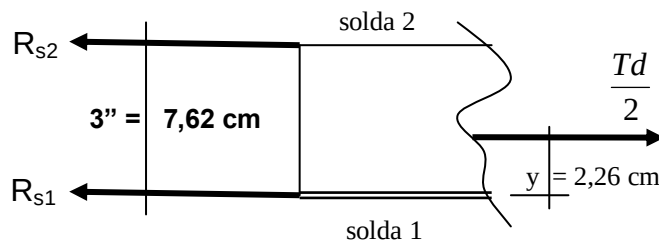
6.2 Dimensionar a ligação soldada da cantoneira à chapa de ligação, considerando:

- 1) Carga axial de tração de cálculo na barra: $Td = N_{tsd} = 100 \text{ kN}$;
- 2) Aço MR 250;
- 3) Eletrodos E 60 XX;
- 4) Seção empregada: dupla cantoneira de abas iguais 3" x 3" x 3/8", com $y = 2,26 \text{ cm}$;
- 5) Espessura da chapa de ligação: $t = 5/16"$.



Solução:

1- Esforços nos cordões de solda (R_{S1} e R_{S2}):



- O problema é resolvido como uma cantoneira simples, submetida a metade do esforço $\left(\frac{Td}{2}\right)$.

- A barra é assimétrica, fazendo com que a força ao longo do eixo baricêntrico da cantoneira, gere esforços diferentes nas soldas ($R_{S1} \neq R_{S2}$).

O cálculo de R_{S1} e R_{S2} , é feito como se a cantoneira fosse uma viga bi-apoiada de vão igual a dimensão da aba, submetida a uma carga concentrada aplicada fora do centro do vão.

$$\frac{Td}{2} = \frac{100}{2} = 50,0 \text{ kN} \Rightarrow R_{S2} = 50,0 \cdot \frac{2,26}{7,62} = 14,83 \text{ kN} \quad (\text{para uma cantoneira})$$

$$\Rightarrow R_{S1} = 50 - R_{S2} = 35,17 \text{ kN} \quad (\text{para uma cantoneira})$$

2 -Adoção da perna de solda:

$$t_{\min} = t_{\text{chapa}} = \frac{5}{16} = \frac{5}{16} \cdot 25,4 = 7,94 \text{ mm} > 6,35 \text{ mm} \Rightarrow d_{W,\max} = 7,94 - 1,5 \text{ mm} = 6,44 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = 7,94 \text{ mm} \xrightarrow{\text{tabela 10}} d_{W,\min} = 5,0 \text{ mm}$$

$$\text{Assim, } d_{W,\min} = 5,0 \text{ mm} \leq d_W \leq d_{W,\max} = 6,44 \text{ mm} \Rightarrow \text{adota-se } d_W = 6,0 \text{ mm} = 0,6 \text{ cm}$$

3) Resistência da ligação:

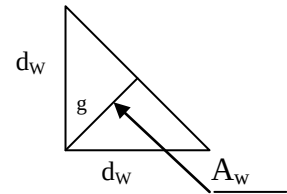
3.1 Resistência a cisalhamento do metal da solda (ruptura da solda)

$$A_w = g \cdot l_w = d_w \cdot \cos 45^\circ \cdot l_w = 0,6 \cos 45^\circ l_w$$

$$A_w = 0,4242 \cdot l_w$$

$$f_w = 415 \text{ MPa} = 41,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 60 XX})$$

$$F_{w,Rd} = 0,6 \frac{A_w f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{0,4242 \cdot l_w \cdot 41,5}{1,35} = 7,824 \cdot l_w \text{ (kN)}$$

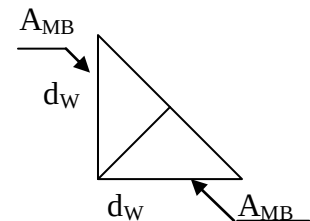


3.2 Resistência a escoamento do metal base:

$$A_{MB} = d_w \cdot l_w \Rightarrow A_{MB} = 0,6 \cdot l_w$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Aço MR 250 - tabela A1})$$

$$F_{MB,Rd} = 0,6 \frac{A_{MB} \cdot f_y}{\gamma_{w1}} = 0,6 \frac{0,6 \cdot l_w \cdot 25}{1,1} = 8,182 l_w$$



3.3 Conclusão

Adota-se $F_{MB,Rd} = 7,824 \cdot l_w$ (o menor, com l_w em centímetros)

4- Determinação dos comprimentos dos cordões de solda:

Solda 1: Fazendo $R_{S1} = F_{MB,Rd}$, vem: $35,17 = 7,824 \cdot l_{w1} \Rightarrow l_{w1} = 4,49 \text{ cm} = 45 \text{ mm}$

Restrições: $l_{w1} = 45 \text{ mm} > 4 \cdot d_w = 4 \cdot 0,6 = 24 \text{ mm}$, (oK)

$$l_{w1} = 45 \text{ mm} > 40 \text{ mm} \text{ (oK)}$$

Assim, adota-se $l_{w1} = 45 \text{ mm}$.

Solda 2: Fazendo $R_{S2} = F_{MB,Rd}$, vem: $14,83 = 7,824 \cdot l_{w2} \Rightarrow l_{w2} = 1,90 \text{ cm} = 19 \text{ mm}$

Restrições: $l_{w2} = 19 \text{ mm} < 4 d_w = 4 \cdot 0,6 = 2,4 \text{ cm} = 24 \text{ mm}$, (não oK)

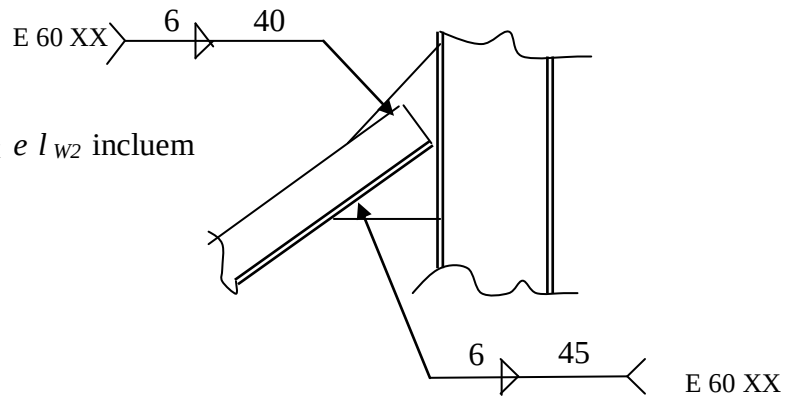
$$l_{w2} = 19 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \text{ (não oK)}$$

Assim, adota-se para l_{w2} o valor mínimo: $l_{w2} = 40 \text{ mm}$.

-Observação:

Como l_{w2} foi adotado pelo valor mínimo e não pelo valor necessário, poder-se-ia a favor da economia, adotar para o valor de d_{w2} o número inteiro inferior a 6 mm contido no intervalo $d_{w,\min} = 5,0 \text{ mm} \leq d_w \leq d_{w,\max} = 6,44 \text{ mm}$, ou seja, $d_{w2} = 5 \text{ mm}$.

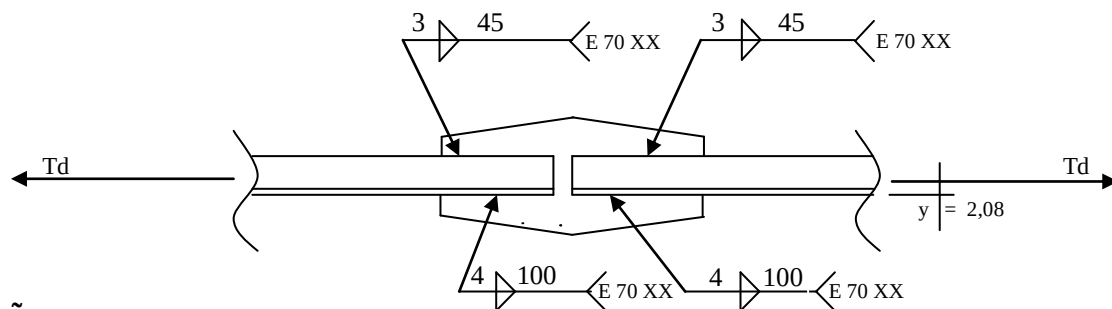
5- Representação da solução:



Obs: Os comprimentos indicados l_{w1} e l_{w2} incluem retorno de $2 d_w = 12 \text{ mm}$.

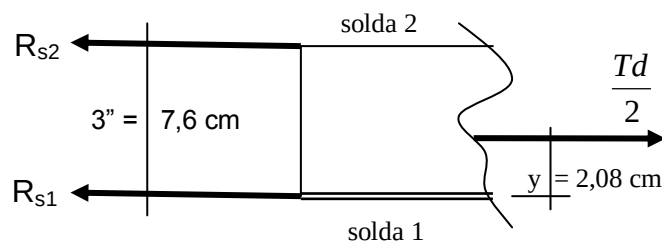
6.3 No nó abaixo, em função da resistência dos cordões de solda existentes, determinar o valor do máximo esforço axial de tração de cálculo $Td = N_{t_{sd}}$ a ser aplicado na barra. Dados:

- 1) Aço ASTM A-36, com $f_y = 250 \text{ MPa}$;
- 2) Chapa de ligação com espessura $t = 6,35 \text{ mm}$ ($\frac{1}{4}''$);
- 3) Seção empregada: dupla cantoneira $76 \times 76 \times 4,8 \text{ mm}$ ($3'' \times 3'' \times 3 / 16''$), com $y = 2,08 \text{ cm}$;
- 4) Considerar a chapa e as cantoneiras, suficientes ao esforço aplicado.



Solução:

1- Esforço $\frac{Td}{2}$ em função dos esforços R_{S1} e R_{S2} suportados pelos cordões de solda:



$$R_{S2} \cdot 7,6 = \frac{Td_2}{2} \cdot 2,08 \quad \Rightarrow \quad Td_2 = 7,308 R_{S2} \text{ kN} \quad (\text{para uma cantoneira})$$

OU

$$R_{S1} \cdot 7,6 = \frac{Td_1}{2} \cdot (7,6 - 2,08) \quad \Rightarrow \quad Td_1 = 2,754 R_{S1} \text{ kN} \quad (\text{para uma cantoneira})$$

Observação: Neste caso, T_d não pode ser considerado como a soma dos esforços R_{s1} e R_{s2} , pois estes serão determinados em função das resistências das áreas das soldas existentes.

2- Resistências dos cordões de soldas da ligação:

2.1 Solda 1: ($d_{w,1} = 4 \text{ mm}$ e $l_{w,1} = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$)

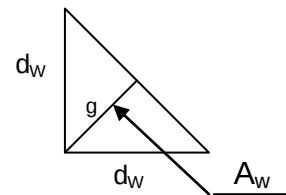
- Resistência a cisalhamento do metal da solda 1 (ruptura da solda 1)

$$A_{w,1} = g \cdot l_{w,1} = d_{w,1} \cdot \cos 45^\circ \cdot l_{w,1} = 0,4 \cos 45^\circ \cdot 10$$

$$A_{w,1} = 7,07 \text{ cm}^2$$

$$f_w = 485 \text{ MPa} = 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 70 XX})$$

$$F_{w,Rd,1} = 0,6 \frac{A_{w,1} f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{7,07 \cdot 48,5}{1,35} = 152,4 \text{ (kN)}$$

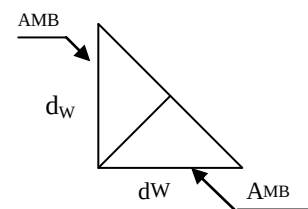


- Resistência a escoamento do metal base da solda 1:

$$A_{MB,1} = d_w \cdot l_{w,1} \Rightarrow A_{MB,1} = 0,4 \cdot 10 = 4,0 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Aço ASTM A36 - tabela A1})$$

$$F_{MB,Rd,1} = 0,6 \frac{A_{MB,1} \cdot f_y}{\gamma_{w1}} = 0,6 \frac{4 \cdot 25}{1,1} = 54,55 \text{ kN}$$



- Resistência da solda 1:

Adota-se para a solda 1, $F_{MB,Rd,1} = 54,55 \text{ kN}$ (o menor)

2.2 Solda 2: ($d_{w,2} = 3 \text{ mm}$ e $l_{w,2} = 45 \text{ mm}$)

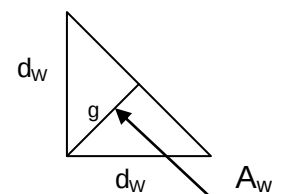
- Resistência a cisalhamento do metal da solda 2 (ruptura da solda 2)

$$A_{w,2} = g \cdot l_{w,2} = d_{w,2} \cdot \cos 45^\circ \cdot l_{w,2} = 0,3 \cdot \cos 45^\circ \cdot 4,5$$

$$A_{w,2} = 0,96 \text{ cm}^2$$

$$f_w = 485 \text{ MPa} = 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 70 XX})$$

$$F_{w,Rd,2} = 0,6 \frac{A_{w,2} f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{0,96 \cdot 48,5}{1,35} = 20,69 \text{ (kN)}$$

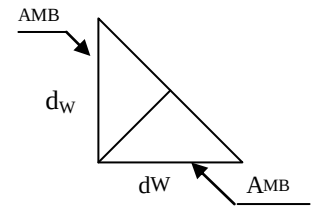


- Resistência a escoamento do metal base da solda 2:

$$A_{MB,2} = d_{W2} \cdot l_{W,2} \Rightarrow A_{MB,2} = 0,3 \cdot 4,5 = 1,35 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ (Aço ASTM A36 – tabela A1)}$$

$$F_{MB,Rd,2} = 0,6 \frac{A_{MB,2} \cdot f_y}{\gamma_{W1}} = 0,6 \frac{1,35 \cdot 25}{1,1} = 18,41 \text{ kN}$$



- Resistência da solda 2:

Adota-se para a solda 2, $F_{W,Rd,2} = 18,41 \text{ kN}$ (o menor)

3) Valor do máximo esforço axial de tração de cálculo $T_d = N_{tSd}$ em função da resistência dos cordões de solda existentes na ligação:

Fazendo $R_{S1} = F_{MB,Rd1} = 54,55 \text{ kN}$ em $Td_1 = 2,754 R_{S1} \text{ kN}$, vem:

$$Td_1 = 2,754 \cdot 54,55 \Rightarrow Td_1 = 150,23 \text{ kN}$$

Fazendo $R_{S2} = F_{W,Rd,2} = 18,41 \text{ kN}$ em $Td_2 = 7,308 R_{S2} \text{ kN}$, vem:

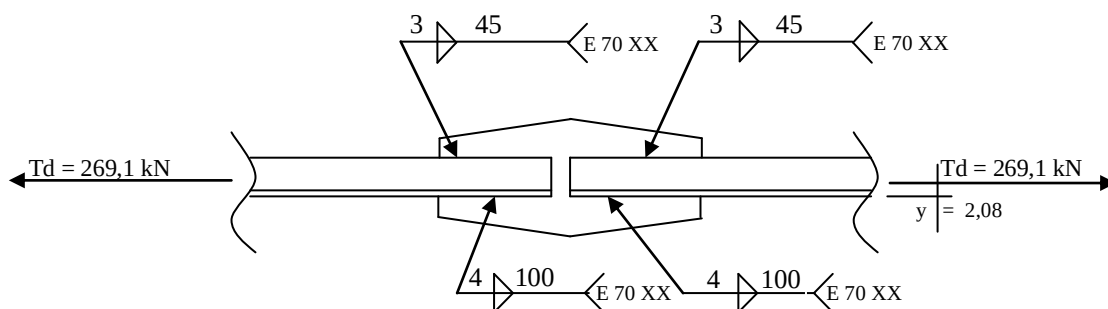
$$Td_2 = 7,308 \cdot 18,41 \Rightarrow Td_2 = 134,54 \text{ kN}$$

Adota-se para uma cantoneira, $Td_1 = 134,54 \text{ kN}$ (o menor)

Portanto, para dupla cantoneira vem:

$$Td = N_{tSd} = 2 \cdot Td_1 = 2 \times 134,54 \Rightarrow Td = 269,1 \text{ kN}$$

4) Resposta:

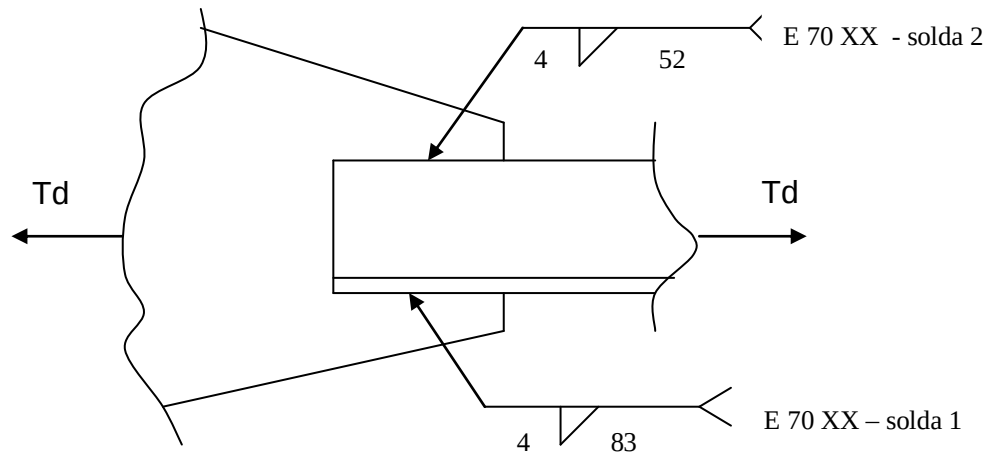


(incluindo o retorno = $2 d_W$)

6.4 No nó abaixo, em função da resistência dos cordões de solda existentes, determinar o valor do máximo esforço axial de tração de cálculo $T_d = N_{t_{sd}}$ a ser aplicado na barra.

Dados:

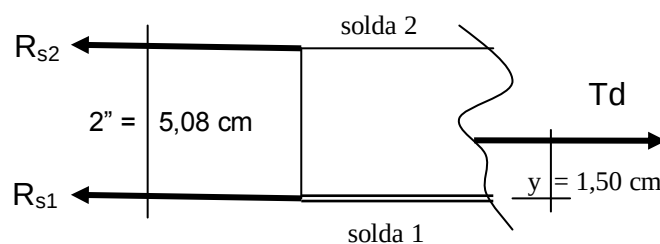
- 1) Chapa de ligação com espessura $t = 1/4''$,
- 2) Cantoneira simples de abas iguais $2'' \times 1/4''$, com $y = 1,50$ cm e $A_g = 6,06$ cm² ;
- 3) Aço ASTM A-36, com $f_y = 250$ MPa e $f_u = 400$ MPa.



(incluindo o retorno = $2 d_w = 2 \cdot 4 = 8$ mm)

Solução:

1- Esforço “Td” em função dos esforços R_{s1} e R_{s2} suportados pelos cordões de solda:



$$R_{s2} \cdot 5,08 = T_d \cdot 1,50 \quad \Rightarrow \quad T_{d2} = 3,387 R_{s2} \text{ kN (Para cantoneira simples)}$$

OU

$$R_{s1} \cdot 5,08 = T_d \cdot (5,08 - 1,50) \quad \Rightarrow \quad T_{d1} = 1,419 R_{s1} \text{ kN (Para cantoneira simples)}$$

Observação: Neste caso, T_d não pode ser considerado como a soma dos esforços R_{s1} e R_{s2} , pois estes serão determinados em função das resistências das áreas das soldas existentes.

2) Resistências dos cordões de soldas da ligação:

2.1 Solda 1: ($d_{w,1} = 4 \text{ mm}$ e $l_{w,1} = 83 \text{ mm} = 8,3 \text{ cm}$)

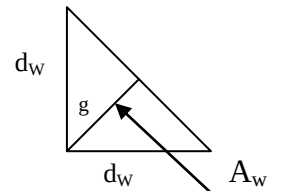
- Resistência a cisalhamento do metal da solda 1 (ruptura da solda 1)

$$A_{w,1} = g \cdot l_{w,1} = d_{w,1} \cdot \cos 45^\circ \cdot l_{w,1} = 0,4 \cdot \cos 45^\circ \cdot 8,3$$

$$A_{w,1} = 2,35 \text{ cm}^2$$

$$f_w = 485 \text{ MPa} = 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 70 XX})$$

$$F_{w,Rd,1} = 0,6 \frac{A_{w,1} f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{2,35 \cdot 48,5}{1,35} = 50,66 \text{ (kN)}$$

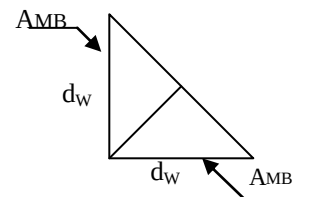


- Resistência a escoamento do metal base da solda 1:

$$A_{MB,1} = d_w \cdot l_{w,1} \Rightarrow A_{MB,1} = 0,4 \cdot 8,3 = 3,32 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Aço ASTM A36 - tabela A1})$$

$$F_{MB,Rd,1} = 0,6 \frac{A_{MB,1} \cdot f_y}{\gamma_{w1}} = 0,6 \frac{3,32 \cdot 25}{1,1} = 45,27 \text{ kN}$$



- Resistência da solda 1:

Adota-se para a solda 1, $F_{MB,Rd,1} = 45,27 \text{ kN}$ (o menor)2.2 Solda 2: ($d_{w,2} = 4 \text{ mm}$ e $l_{w,2} = 52 \text{ mm} = 5,2 \text{ cm}$)

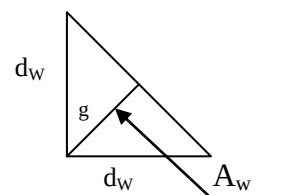
- Resistência a cisalhamento do metal da solda 2 (ruptura da solda 2)

$$A_{w,2} = g \cdot l_{w,2} = d_{w,2} \cdot \cos 45^\circ \cdot l_{w,2} = 0,4 \cos 45^\circ \cdot 5,2$$

$$A_{w,2} = 1,47 \text{ cm}^2$$

$$f_w = 485 \text{ MPa} = 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 70 XX})$$

$$F_{w,Rd,2} = 0,6 \frac{A_{w,2} f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{1,47 \cdot 48,5}{1,35} = 31,69 \text{ (kN)}$$

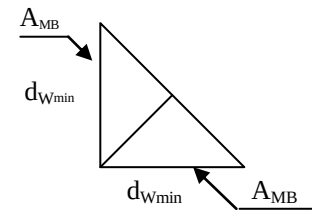


- Resistência a escoamento do metal base da solda 2:

$$A_{MB,2} = d_W \cdot l_{W,2} \Rightarrow A_{MB,2} = 0,4 \cdot 5,2 = 2,08 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ (Aço ASTM A36 – tabela A1)}$$

$$F_{MB,Rd,2} = 0,6 \frac{A_{MB,2} \cdot f_y}{\gamma_{W1}} = 0,6 \frac{2,08 \cdot 25}{1,1} = 28,36 \text{ kN}$$



- Resistência da solda 2:

Adota-se para a solda 2, $F_{W,Rd,2} = 28,36 \text{ kN}$ (o menor)

- 4) Valor do máximo esforço axial de tração de cálculo $T_d = N_{tSd}$ em função da resistência dos cordões de solda existentes na ligação:

Fazendo $R_{S1} = F_{MB,Rd,1} = 45,27 \text{ kN}$ em $T_{d1} = 1,419 R_{S1} \text{ kN}$, vem:

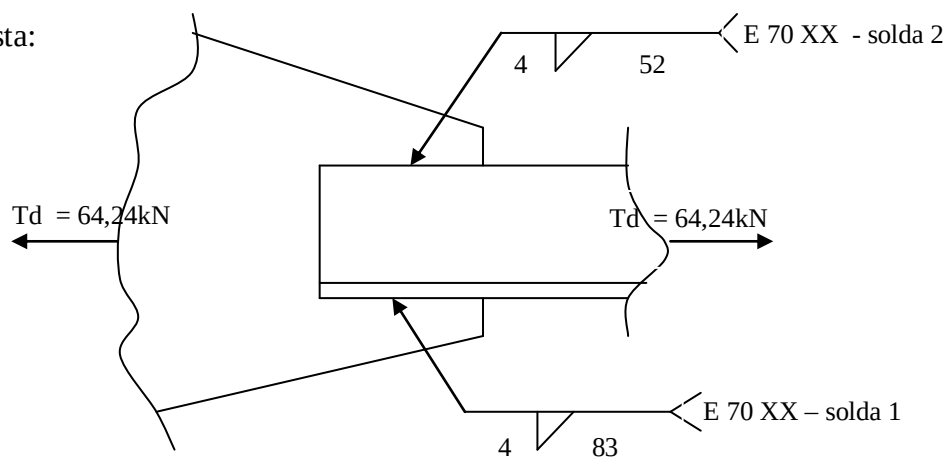
$$T_{d1} = 1,419 \cdot 45,27 \Rightarrow T_{d1} = 64,24 \text{ kN}$$

Fazendo $R_{S2} = F_{W,Rd,2} = 28,36 \text{ kN}$ em $T_{d2} = 3,387 R_{S2} \text{ kN}$, vem:

$$T_{d2} = 3,387 \cdot 28,36 \Rightarrow T_{d2} = 96,06 \text{ kN}$$

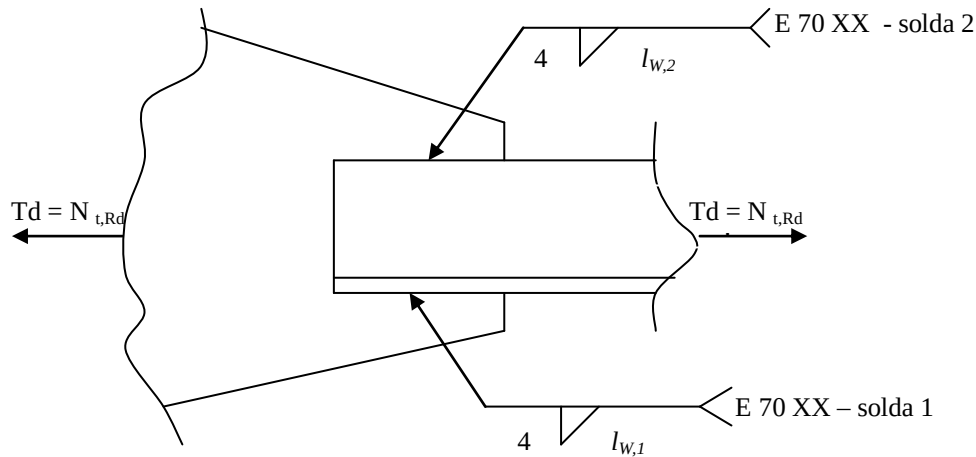
Adota-se o menor: $T_d = N_{tSd} = T_{d1} = 64,24 \text{ kN}$, para cantoneira simples.

5) Resposta:



(incluindo o retorno = $2 d_W = 2 \cdot 4 = 8 \text{ mm}$)

6.5 No nó do exemplo anterior abaixo representado, para uma carga axial de tração T_d aplicada no centro de gravidade da cantoneira, igual a sua capacidade a tração axial $N_{t,Rd}$, pede-se dimensionar os comprimentos dos cordões de solda $l_{w,1}$ e $l_{w,2}$, mantendo as dimensões das suas pernas, perfis e materiais empregados.



Solução:

1) Cálculo da capacidade a tração axial $N_{t,Rd}$ da cantoneira.

Cantoneira simples de abas iguais 2" x 1/4", com $A_g = 6,06 \text{ cm}^2$:

Aço ASTM A-36, com $f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \text{ kN/cm}^2$ e $f_u = 400 \text{ MPa} = 40 \text{ kN/cm}^2$

E.L. nº1: Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{6,06 \cdot 25}{1,1} = 137,73 \text{ kN}$$

E.L. nº2: Ruptura da seção líquida: $N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$

- No caso, para barras soldadas, $A_n = A_g = 6,06 \text{ cm}^2$

$$A_e = C_t A_n$$

- Para máxima carga na cantoneira, adota-se $C_t = 1,0$, que corresponde a $l_{w1} \geq 2b$ e

$$l_{w2} \geq 2b, \text{ onde } b = \text{largura da cantoneira.}$$

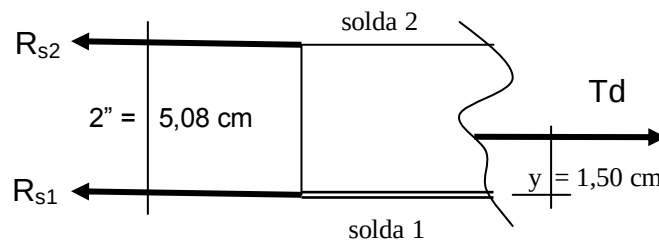
- Como $b = 2" = 50,8 \text{ mm} \cong 51 \text{ mm}$, $l_{w1} \geq l_{wmin} = 2 \cdot 51 = 102 \text{ mm}$ e

$$l_{w2} \geq l_{wmin} = 2 \cdot 51 = 102 \text{ mm.}$$

$$A_e = C_t A_n = C_t A_g = 1,0 \cdot 6,06 \Rightarrow A_e = 6,06 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{6,06 \cdot 40}{1,35} = 179,66 \text{ kN}$$

Conclusão: Adota-se $T_d = N_{t,Rd} = 137,73 \text{ kN}$ (o menor)

2) Cálculo dos esforços nos cordões de solda $l_{w,1}$ e $l_{w,2}$ 

$$R_{S2} \cdot 5,08 = Td \cdot 1,50 \quad \Rightarrow \quad R_{S2} = 0,2953 \cdot Td \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad R_{S2} = 0,2953 \cdot 137,73 \text{ kN}$$

$$\therefore R_{S2} = 40,67 \text{ kN}$$

$$R_{S1} \cdot 5,08 = Td \cdot (5,08 - 1,50) \quad \Rightarrow \quad R_{S1} = 0,7047 \cdot Td \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad R_{S1} = 0,7047 \cdot 137,73 \text{ kN}$$

$$\therefore R_{S1} = 97,06 \text{ kN}$$

3) Verificação da perna de solda adotada:

$$t_{\min} = t_{\text{chapa}} = t_{\text{cantoneira}} = \frac{1''}{4} = \frac{1}{4} \cdot 25,4 = 6,35 \text{ mm} \Rightarrow d_{w,\max} = 6,35 - 1,5 \text{ mm} = 4,85 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = 6,35 \text{ mm} \xrightarrow{\text{tabela 10}} d_{w,\min} = 3,0 \text{ mm}$$

Assim, $d_{w,\min} = 3,0 \text{ mm} \leq d_w = 4 \text{ mm} \leq d_{w,\max} = 4,85 \text{ mm} \Rightarrow$ atende as restrições.

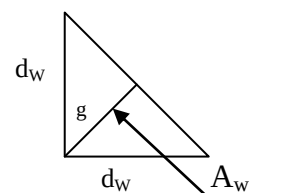
4) Resistência da ligação:

4.1 Resistência a cisalhamento do metal da solda (ruptura da solda)

$$A_w = g \cdot l_w = d_w \cdot \cos 45^\circ \cdot l_w = 0,4 \cos 45^\circ l_w \Rightarrow A_w = 0,2828 \cdot l_w$$

$$f_w = 485 \text{ MPa} = 48,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Tabela A-4 - Eletrodos E 70 XX})$$

$$F_{w,Rd} = 0,6 \frac{A_w f_w}{\gamma_{w2}} = 0,6 \frac{0,2828 \cdot l_w \cdot 48,5}{1,35} = 6,096 \cdot l_w \text{ (kN)}$$

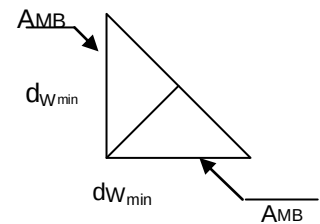


4.2 Resistência a escoamento do metal base:

$$A_{MB} = d_W \cdot l_W \Rightarrow A_{MB} = 0,4 \cdot l_W$$

$$f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ (Aço ASTM A-36 – tabela A1)}$$

$$F_{MB,Rd} = 0,6 \frac{A_{MB} \cdot f_y}{\gamma_{W1}} = 0,6 \frac{0,4 \cdot l_W \cdot 25}{1,1} = 5,455 \cdot l_W$$

4.3 Conclusão: Adota-se $F_{MB,Rd} = 5,455 \cdot l_W$ (o menor, com l_W em centímetros)

5) Pré-dimensionamento dos comprimentos dos cordões de solda:

Solda 1: Fazendo $R_{S1} = F_{MB,Rd}$, vem: $97,06 = 5,455 \cdot l_{W1} \Rightarrow l_{W1} = 17,8 \text{ cm} = 178 \text{ mm}$

Restrições: $l_{W1} = 178 \text{ mm} > 4 d_W = 4 \cdot 0,4 = 16 \text{ mm}$ (oK)

$l_{W1} = 178 \text{ mm} > 40 \text{ mm}$ (oK)

$l_{W1} = 178 \text{ mm} > l_{W\min} = 102 \text{ mm}$ para $C_t = 1,0$.

Assim adota-se $l_{W1} = 178 \text{ mm}$

Solda 2: Fazendo $R_{S2} = F_{MB,Rd}$, vem: $40,67 = 5,455 \cdot l_{W2} \Rightarrow l_{W2} = 7,46 \text{ cm} = 75 \text{ mm}$

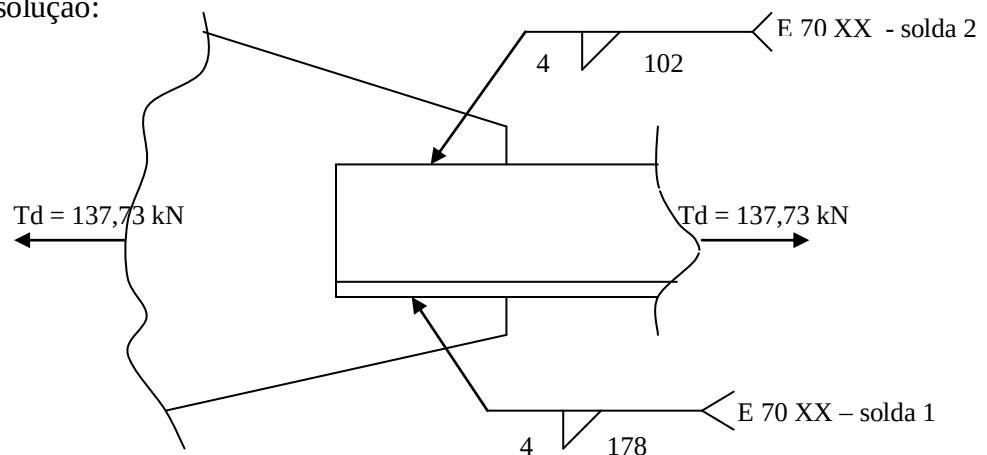
Restrições: $l_{W2} = 75 \text{ mm} > 4 d_W = 4 \cdot 0,4 = 16 \text{ mm}$ (oK)

$l_{W2} = 75 \text{ mm} > 40 \text{ mm}$ (oK)

$l_{W2} = 75 \text{ mm} < l_{W\min} = 102 \text{ mm}$ para $C_t = 1,0$.

Assim adota-se $l_{W2} = 102 \text{ mm}$

6) Representação da solução:



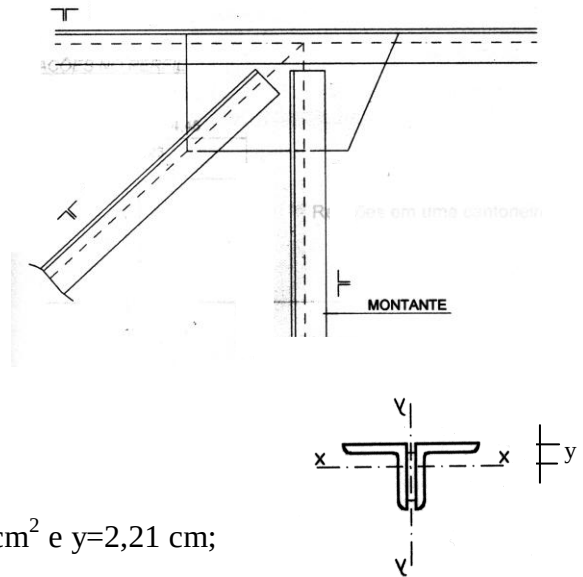
(incluindo o retorno = $2 d_W = 2 \cdot 4 = 8 \text{ mm}$)

7. Exercícios propostos:

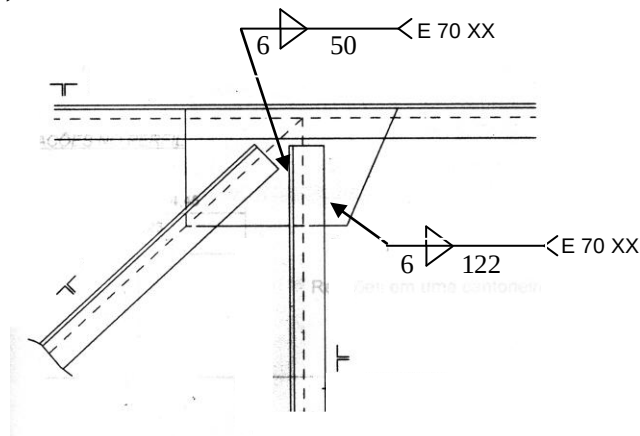
7.1. Dimensionar a ligação soldada do montante à chapa de ligação do nó ao lado, indicando a resposta no desenho através de convenção apropriada.

Dados:

- 1) Metal base: aço ASTM A-36 com: $f_y=250$ MPa e $f_u=400$ MPa ;
- 2) Metal da solda: eletrodos E 70-XX;
- 3) Tração de cálculo no montante: $T_d = 280$ kN = $N_{t,sd}$;
- 4) Espessura da chapa de ligação: $t = 8$ mm;
- 5) Perfil dupla cantoneira 3"x3"x 5/16", com $A_g=31,0$ cm² e $y=2,21$ cm;
- 6) Adotar 1"=2,54 cm;

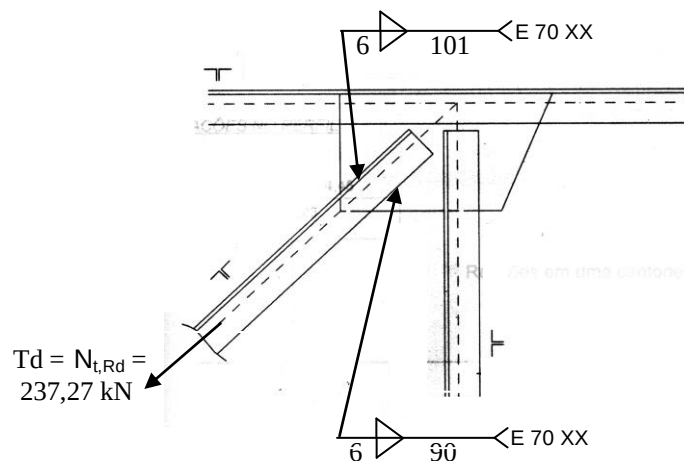


Resposta:



7.2. No exemplo anterior (exercício 7.1), dimensionar a ligação soldada da diagonal á chapa de ligação, para uma carga axial T_d igual à capacidade a tração da barra $N_{t,Rd}$, adotando $C_t = 1,0$ e considerando dupla cantoneira de abas iguais $1 \frac{3}{4}'' \times 1 \frac{3}{4}'' \times \frac{1}{4}''$, com $A_g=10,44$ cm² e $y=1,35$ cm.

Resposta:



Obs: $l_{wmin} = 90$ mm para $C_t = 1,0$.

7.3. Na ligação soldada abaixo, pede-se:

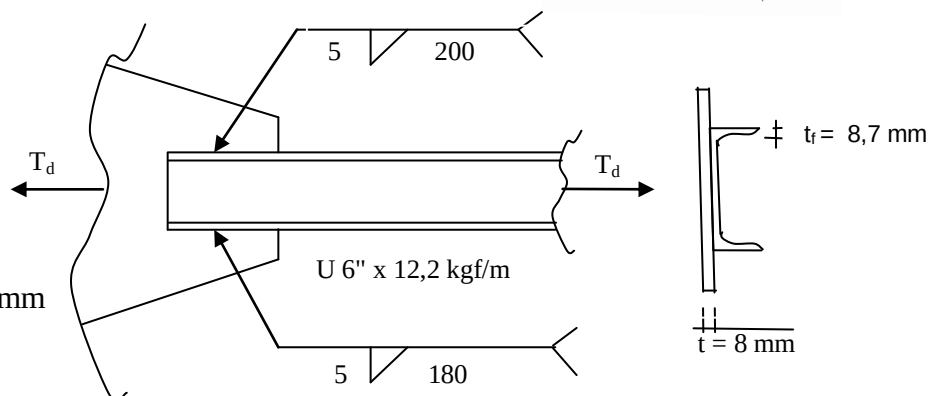
- Determinar o valor da máxima carga de tração de cálculo " T_d " = $N_{t, Sd}$, a ser aplicada na barra abaixo, em função única e exclusivamente da resistência da ligação soldada;
- Determinar o comprimento mínimo dos cordões de solda, para que o perfil possa trabalhar com a totalidade da sua capacidade a tração, adotando inicialmente $c_t=0,75$.

Dados:

- A carga de tração está aplicada no centro de gravidade da peça;
- Eletrodos E 70- XX;
- Metais base:
 - Chapa de ligação em aço ASTM A-500 grau A, com $f_y=230$ MPa, $f_u=310$ MPa e espessura $t=8,0$ mm;
 - Perfil laminado [6" x 12,2 kgf/m em aço ASTM A-36, com $f_y=250$ MPa e $f_u=400$ MPa;

- Características do perfil [6" x 12,2 kgf/m

$$\begin{aligned} A_g &= 15,50 \text{ cm}^2 \\ b_f &= 48,80 \text{ mm} \\ t_f &= 8,70 \text{ mm} \\ d &= 152,40 \text{ mm} \\ t_w &= 5,08 \text{ mm} \\ h &= d - 2 t_w = 142,24 \text{ mm} \end{aligned}$$



Resposta a):

Resistência a cisalhamento do metal da solda (ruptura da solda)

$$F_{W,Rd} = 137,1 \text{ (kN)}$$

Resistências a escoamento dos metais base:

$$\text{Para perfil laminado em aço ASTM A-36 : } F_{MB,Rd} = 122,73 \text{ (kN)}$$

$$\text{Para chapa em aço ASTM A-500 grau A: } F_{MB,Rd} = 112,91 \text{ (kN)}$$

Adota-se $F_{MB,Rd} = 112,91 \text{ kN}$ (o menor), para um filete de solda.

$$\text{Como } T_d = 2 \cdot F_{MB,Rd} = 2 \cdot 112,91 = 225,82 \text{ kN}$$

Resposta b): $T_d = 352,27 \text{ kN}$, para $c_t=0,87$ e $l_w = 281 \text{ mm}$.