

Exercícios de Ligações Parafusadas

9.1 Resolvidos

Ex. 9.1.1 Ligação Simples Chapas Duas chapas de 204mm x 12,7mm (1/2") de aço ASTM A36 são emendadas com chapas laterais de 9,5mm (3/8") e parafusos comuns de diâmetro igual à 22mm e aço A307 ($f_{ub} = 415 \times 10^6 N/m^2$), conforme figura a seguir. Se as chapas estão sujeitas às forças $N_g = 200kN$ e $N_q = 100kN$, oriundas de cargas permanentes e variáveis decorrentes do uso da estrutura, respectivamente, verificar a segurança da emenda no estado limite último para combinações normais. Não é necessário verificar as chapas à tração, assumir que a deformação do furo para forças de serviço é uma limitação de projeto e assumir também que as distâncias máximas e mínimas entre furos, bem como entre furos e bordas, atende aos critérios da NBR8800.

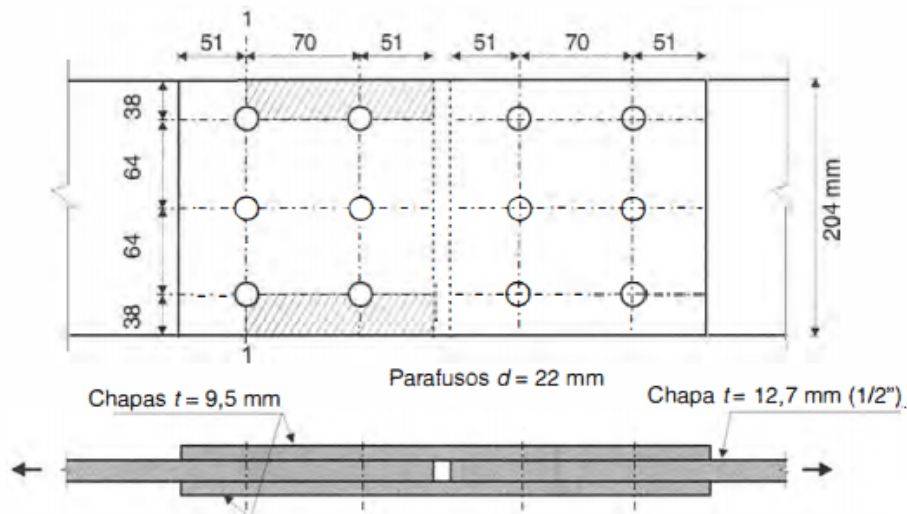


Figura 9.1: Ligação entre as chapas.

Solução:

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

$$N_{Sd} = \gamma_g N_g + \gamma_q N_q = 1,4 \times 200 + 1,5 \times 100 = 430kN$$

A ligação em questão é um caso clássico de ligação sujeita apenas à esforço cortante, sendo portanto necessário checar a ligação em relação ao cisalhamento no parafuso, à pressão de contato na parede dos furos e ao colapso por rasgamento (cisalhamento de bloco).

É apresentado primeiro o cálculo para o cisalhamento no parafuso, destacando que todos os parafusos são do tipo comum ($C_{pc} = 0,4$), apresentam dois planos de corte, são de aço A307 ($f_{ub} = 415 \times 10^6 N/m^2$) e

que a força é resistida por 6 (não por 12) parafusos. Dessa maneira, para um parafuso com um único plano de corte ($F_{v,Rd,1}$) tem-se:

$$F_{v,Rd,1} = \frac{C_{pc} A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{C_{pc} (0,25\pi d_b^2) f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{0,4 \times 0,25 \times \pi \times 2,2^2 \times 41,5}{1,35}$$

$$\therefore F_{v,Rd,1} = 46,74 kN$$

Como esse é o valor para um parafuso com um plano de corte e a ligação é composta por 6 parafusos com 2 planos de corte cada, é necessário multiplicar esse valor por $6 \times 2 = 12$, como mostrado a seguir:

$$F_{v,Rd} = F_{v,Rd,1} \times 6 \times 2 = 46,74 \times 12 = 560,91 kN$$

O valor da força solicitante de cisalhamento total para os parafusos ($F_{v,Sd} = 430 kN$) é menor que a força resistente de cisalhamento total dos parafusos ($F_{v,Rd} = 560,91 kN$), a ligação atende à esse critério.

O próximo passo é verificar a ligação em relação à pressão de contato na parede dos furos.

O primeiro aspecto que deve ser notado é que tanto as chapas de 12,7mm quanto as chapas de 9,5mm de espessura devem ser checadas, entretanto a força atuando em cada uma não é a mesma. A força atuando na chapa de 12,7mm tem valor igual à $N_{sd} = 430 kN$, enquanto a força nas chapas de 9,5mm tem valor igual à $N_{sd}/2 = 430 kN/2 = 215 kN$ já que metade é resistida pela chapa de 9,5mm no topo e a outra metade pela chapa de 9,5mm de baixo. Ambos os casos serão calculados.

Ainda, é importante observar que no cálculo de l_f é necessário considerar o diâmetro do furo padrão igual à $d_{furo} = d_b + 1,5 mm$. Sendo assim, serão checados portanto os casos dos parafusos externos (parafuso mais próximo à borda da ligação) e os parafusos internos (mais distantes da borda da ligação).

Por último, tem-se que $C_{pl} = 1,2$ e $C_{fp} = 2,4$ pois trata-se de um furo padrão e a deformação do furo para forças de serviço é uma limitação de projeto.

É apresentado primeiro o caso para um único parafuso externo ($F_{c,Rd-ext,1}$) da chapa de 12,7mm:

$$d_{furo} = d_b + 1,5 = 22 + 1,5 = 23,5 mm$$

$$l_f = dist_{borda} - 0,5d = 51 - 0,5 \times 23,5 = 39,25 mm$$

$$F_{c,Rd-ext,1} = \frac{C_{pl} l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{C_{fp} d_b t f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$\frac{1,2 \times 3,925 \times 1,27 \times 40,0}{1,35} \leq \frac{2,4 \times 2,2 \times 1,27 \times 40,0}{1,35}$$

$$177,23 kN \leq 198,68 kN \rightarrow F_{c,Rd-ext,1} = 177,23 kN$$

Na sequência, o mesmo é feito para um único parafuso interno ($F_{c,Rd-int,1}$) da chapa de 12,7mm:

$$l_f = dist_{entre-parafusos} - 2 \times (0,5d) = 70 - 2 \times (0,5 \times 23,5) = 46,50 mm$$

$$F_{c,Rd-int,1} = \frac{C_{pl} l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{C_{fp} d_b t f_u}{\gamma_{a2}}$$

$$\frac{1,2 \times 4,650 \times 1,27 \times 40,0}{1,35} \leq \frac{2,4 \times 2,2 \times 1,27 \times 40,0}{1,35}$$

$$209,97 kN \leq 198,68 kN \rightarrow F_{c,Rd-int,1} = 198,68 kN$$

Como há 6 parafusos por ligação, 3 internos e 3 externos, os respectivos valores de $F_{c,Rd,1}$ devem ser multiplicado pelo número de parafusos. Dessa forma, tem-se:

$$F_{c,Rd} = F_{c,Rd-ext,1} \times 3 + F_{c,Rd-int,1} \times 3 = 177,23 \times 3 + 198,68 \times 3 = 1127,73 kN$$

Como o valor encontrado da força resistente de cálculo à pressão de contato total da ligação é maior que a força solicitante de cálculo à pressão de contato da ligação ($F_{c,Rd} = 1127,73 kN > F_{v,Rd} = 560,91 kN$), a chapa de 12,7mm a ligação atende ao critério exigido.

O mesmo cálculo será apresentado para a chapa de 9,5mm. Percebendo-se que os valores de l_f são iguais aos valores para a outra chapa (uma vez que, nesse caso específico, as distâncias até ambas as bordas das chapas são iguais, o que não ocorrerá obrigatoriamente todas as vezes), tem-se para os parafusos externos:

$$\begin{aligned}
l_f &= dist_{borda} - 0,5d = 51 - 0,5 \times 23,5 = 39,25mm \\
F_{c,Rd-ext,1} &= \frac{C_{pl} l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{C_{fp} d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \\
\frac{1,2 \times 3,925 \times 0,95 \times 40,0}{1,35} &\leq \frac{2,4 \times 2,2 \times 0,95 \times 40,0}{1,35} \\
132,57kN &\leq 148,62kN \rightarrow F_{c,Rd-ext,1} = 132,57kN
\end{aligned}$$

Analogamente, para os parafusos internos tem-se:

$$\begin{aligned}
l_f &= dist_{entre-parafusos} - 2 \times (0,5d) = 70 - 2 \times (0,5 \times 23,5) = 46,50mm \\
F_{c,Rd-int,1} &= \frac{C_{pl} l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{C_{fp} d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \rightarrow \\
\frac{1,2 \times 4,65 \times 0,95 \times 40,0}{1,35} &\leq \frac{2,4 \times 2,2 \times 0,95 \times 40,0}{1,35} \\
157,07kN &\leq 148,62kN \rightarrow F_{c,Rd-int,1} = 148,62kN
\end{aligned}$$

Para a ligação como um todo o cálculo é apresentado na sequência:

$$F_{c,Rd} = F_{c,Rd-ext,1} \times 3 + F_{c,Rd-int,1} \times 3 = 132,57 \times 3 + 148,62 \times 3 = 843,57kN$$

Novamente, percebe-se que a força resistente de cálculo à pressão de contato total da ligação é maior que a força solicitante de cálculo à pressão de contato da ligação ($F_{c,Rd} = 843,57kN > F_{c,Rd} = 430kN/2 = 215kN$), a chapa de 9,5mm a ligação atende ao critério exigido.

O caso para a chapa de 12,7mm é o caso crítico entre as duas já que $F_{c,Rd}$ é apenas 2,62 vezes maior que $F_{c,Sd}$, enquanto que para a chapa de 9,5mm esse valor é 3,92 vezes maior.

Por último, é necessário checar o colapso por rasgamento da ligação. Deve-se notar que o valor para o diâmetro do furo usado para esta conferência é igual à $d_{furo} = d_b + 1,5 + 2,0$. Sendo assim, calcula-se para o caso crítico (mostrado na figura 9.1 em hachurado) a área bruta sujeita à cisalhamento (A_{gv}), a área líquida sujeita à cisalhamento (A_{nv}) e a área líquida sujeita à tração (A_{nt}), sendo n o número de vezes que a área se repete na ligação:

$$\begin{aligned}
d_{furo,ef} &= d_b + 1,5 + 2,0 = 22 + 1,5 + 2,0 = 25,5mm \\
A_{gv} &= (70mm + 51mm) \times t \times n = 12,1 \times 1,27 \times 2 = 30,7cm^2 \\
A_{nv} &= (70mm + 51mm - 1,5d_{furo}) \times t \times n = (12,1 - 1,5 \times 2,55) \times 1,27 \times 2 = 21,0cm^2 \\
A_{nt} &= (38mm + 38mm - 2 \times 0,5d_{furo}) \times t \times n = (7,6 - 1,0 \times 2,55) \times 1,27 \times 2 = 12,8cm^2
\end{aligned}$$

Com esses valores e sendo este um dos casos em que $C_t = 1,0$, calcula-se a força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento como sendo:

$$\begin{aligned}
F_{r,Rd} &= \frac{0,6f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{0,6f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}}{\gamma_{a2}} \\
\frac{0,6 \times 40 \times 21 + 1,0 \times 40 \times 12,8}{1,35} &\leq \frac{0,6 \times 25 \times 30,7 + 1,0 \times 40 \times 12,8}{1,35} \\
752,59kN &\leq 720,37kN \rightarrow F_{r,Rd} = 720,37kN
\end{aligned}$$

Como $F_{r,Rd} = 720,37kN > F_{r,Sd} = 430kN$, a ligação atende ao último critério, estando portanto corretamente dimensionada.

Destaca-se que não foram cheçadas as distâncias mínimas e máximas entre parafusos, bem como entre parafusos e bordas, apenas pelo fato do enunciado ter explicitamente dito que estavam de acordo com a norma. Caso contrário, esses deveriam ser checados.

Ex. 9.1.2 Cantoneiras parafusadas em uma linha Desprezando o pequeno efeito da excentricidade introduzida pela ligação, calcular qual é a força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento para a ligação apresentada a seguir. Assumir parafusos com diâmetro igual à 12,7mm (1/2") de aço A307 e que se trata da ligação de um tirante de uma treliça de telhado constituído por duas cantoneiras 63x6,3mm (2 1/2"x1/4") conectadas à uma chapa de 6,3mm.

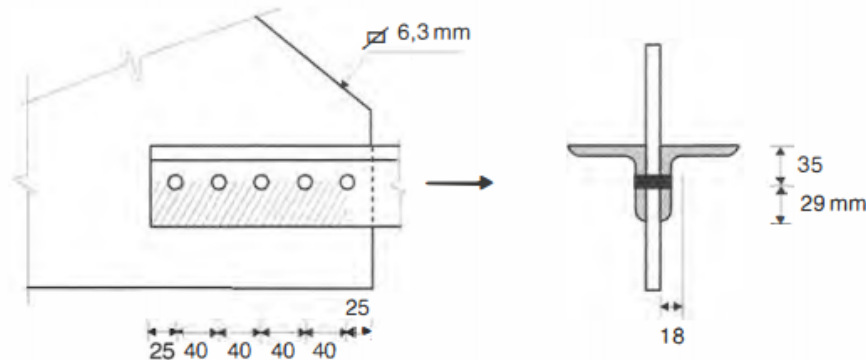


Figura 9.2: Cantoneiras parafusadas em uma linha.

Solução:

Antes de calcular as áreas líquidas e bruta, deve-se notar que o rasgamento não pode ocorrer sobre a aba da cantoneira, pois este tem uma área muito superior à área do lado em que não há aba. Ainda, como a distância dos parafusos ao limite da chapa de 6,3mm não foi informada, pode-se assumir que essa distância será tão grande que não representará a situação crítica da ligação.

A partir disso, calcula-se para o caso crítico (mostrado na figura do exercício 9.2 em hachurado) a área bruta sujeita à cisalhamento (A_{gv}), a área líquida sujeita à cisalhamento (A_{nv}) e a área líquida sujeita à tração (A_{nt}), sendo n o número de vezes que a área se repete na ligação. O diâmetro do furo deve ser utilizado em seu valor efetivo, acrescentando-se 2,0mm ao diâmetro real do furo

$$d_{furo} = d_b + 1,5 + 2,0 = 12,7 + 1,5 + 2,0 = 16,2mm$$

$$A_{gv} = (4,0 + 4,0 + 4,0 + 4,0 + 2,5) \times t \times n = 18,5 \times 0,63 \times 2 = 23,31cm^2$$

$$A_{nv} = (4,0 + 4,0 + 4,0 + 4,0 + 2,5 - 4,5d_{furo}) \times t \times n = (18,5 - 4,5 \times 1,62) \times 0,63 \times 2 = 14,125cm^2$$

$$A_{nt} = (2,9 - 0,5d_{furo,ef}) \times t \times n = (2,9 - 0,5 \times 1,62) \times 0,63 \times 2 = 2,633cm^2$$

Com esses valores e sendo este um dos casos em que $C_t = 1,0$, calcula-se a força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento como sendo:

$$F_{r,Rd} = \frac{0,6f_uA_{nv} + C_{ts}f_uA_{nt}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{0,6f_yA_{gv} + C_{ts}f_uA_{nt}}{\gamma_{a2}}$$

$$\frac{0,6 \times 40 \times 14,125 + 1,0 \times 40 \times 2,633}{1,35} \leq \frac{0,6 \times 25 \times 23,31 + 1,0 \times 40 \times 2,633}{1,35}$$

$$329,126kN \leq 337,015kN \rightarrow F_{r,Rd} = 329,126kN$$

Ex. 9.1.3 Cantoneiras opostas parafusadas Desprezando o pequeno efeito da excentricidade introduzida pela ligação, calcular qual é a força resistente de cálculo da ligação apresentada a seguir. A ligação é composta por 4 parafusos (2 por barra) com diâmetro igual à 12,7mm (1/2") de aço A36 sendo constituída a barra por duas cantoneiras 50,8x6,3mm conectadas à uma chapa de 6,3mm.

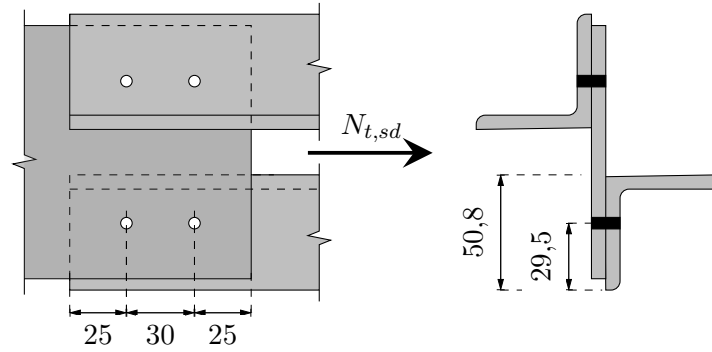


Figura 9.3: Cantoneiras opostas parafusadas.

Solução:

Iniciando pelo colapso por rasgamento:

Área cisalhada:

$$A_{gv} = (2,5 + 3,0) \times 0,63 = 3,47 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = A_{gv} - 1,5 \times (1,27 + 0,35) \times 0,63 = 1,94 \text{ cm}^2$$

Área tracionada:

$$A_{nt} = [2,13 - 0,5 \times (1,27 + 0,35)] \times 0,63 = 0,83 \text{ cm}^2$$

Resistência ao colapso por rasgamento:

$$F_{r,Rd} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,6 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) = \frac{1}{1,35} (0,6 \times 40 \times 1,94 + 1,0 \times 40 \times 0,83) = 59,08 \text{ kN} \\ \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,6 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}) = \frac{1}{1,35} (0,6 \times 25 \times 3,47 + 1,0 \times 40 \times 0,83) = 63,15 \text{ kN} \end{cases}$$

$$\therefore F_{r,Rd} = 59,08 \text{ kN}$$

Cisalhamento dos parafusos por barra:

Força resistente de 1 parafuso em 1 plano de corte:

$$A_b = \frac{\pi d_b^2}{4} = 1,27 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd}^{(1)} = \frac{C_{pc} A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{0,4 \times 1,27 \times 41,5}{1,35} = 15,62 \text{ kN}$$

Como são 2 parafusos submetidos a 1 plano de corte: $F_{b,Rd} = 2 \times 1 \times F_{v,Rd}^{(1)} = 31,23 \text{ kN}$.

Pressão de contato por barra:

Parafusos externos $l_f = 18,65 \text{ mm}$ e parafusos internos $l_f = 17,3 \text{ mm}$:

$$F_{c,Rd} = \begin{cases} C_{pl} l_f t \frac{f_u}{\gamma_{a2}} = 1,2 \times (1,865 + 1,73) \times 0,63 \times \frac{40}{1,35} = 80,53 \text{ kN} \\ C_{fp} d_b t \frac{f_u}{\gamma_{a2}} = 2,4 \times 2 \times 1,27 \times 0,63 \times \frac{40}{1,35} = 113,79 \text{ kN} \end{cases}$$

$$\therefore F_{c,Rd} = 80,53 \text{ kN}$$

Resistência das duas cantoneiras:

$$N_{t,Rd} = 2 \times 31,23 = 62,46 \text{ kN}$$

A resistência fica limitada ao cisalhamento dos parafusos.

9.2 Propostos, nível iniciante

Ex. 9.2.1 Chapa tracionada ligação simples A chapa tracionada CH 12,7 x 152,4 mm é conectada a uma chapa gusset de 9,53 mm de espessura com parafusos ISO 898-1 Classe 4.6 de 22,23 mm de diâmetro.

- Verifique todos os espaçamentos e distâncias de bordas (em mm na figura);
- Calcule a resistência da ligação.

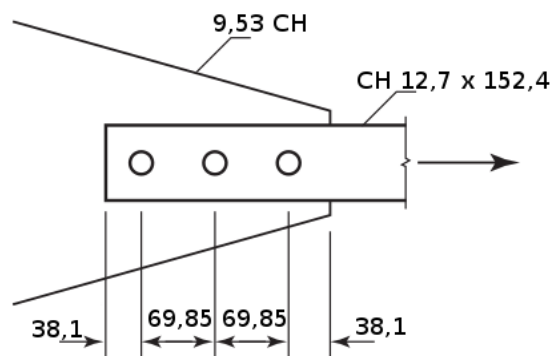


Figura 9.4: Chapa tracionada com ligação parafusada simples.

Ex. 9.2.2 Chapa tracionada linha dupla A chapa tracionada da figura é uma CH 12,7 x 139,7 mm de aço A36 e está conectada a uma chapa gusset de 9,53 mm de espessura (também de aço A36) com parafusos A307 de 19,05 mm de diâmetro.

- Verifique todos os espaçamentos e distâncias de bordas (em mm na figura);
- Calcule a resistência da ligação.

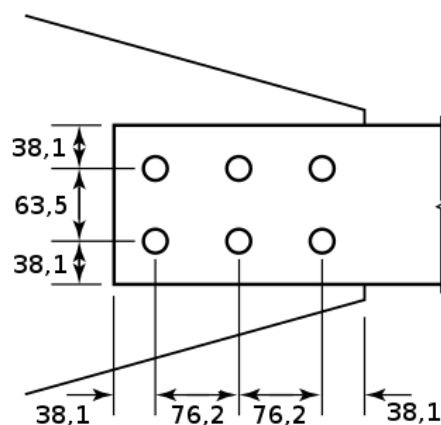


Figura 9.5: Chapa tracionada com dupla linha de parafusos.

Ex. 9.2.3 Ligação de topo com chapas As chapas de 12,7 mm de espessura estão conectadas através de duas chapas de ligação de 6,35 mm de espessura, conforme figura. Os parafusos A307 possuem 22,23 mm de diâmetro. As chapas de aço A36.

- Verifique todos os espaçamentos e distâncias de bordas (em mm na figura);
- Calcule a resistência da ligação.

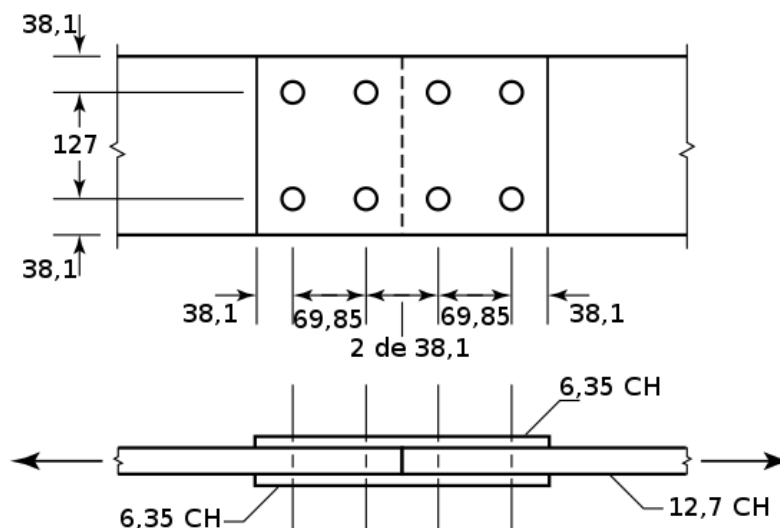


Figura 9.6: Esquema da ligação de topo com chapas.

Ex. 9.2.4 Quantidade de parafusos Determine quantos parafusos de 22,23 mm de diâmetro de A307 são necessários na ligação da figura.

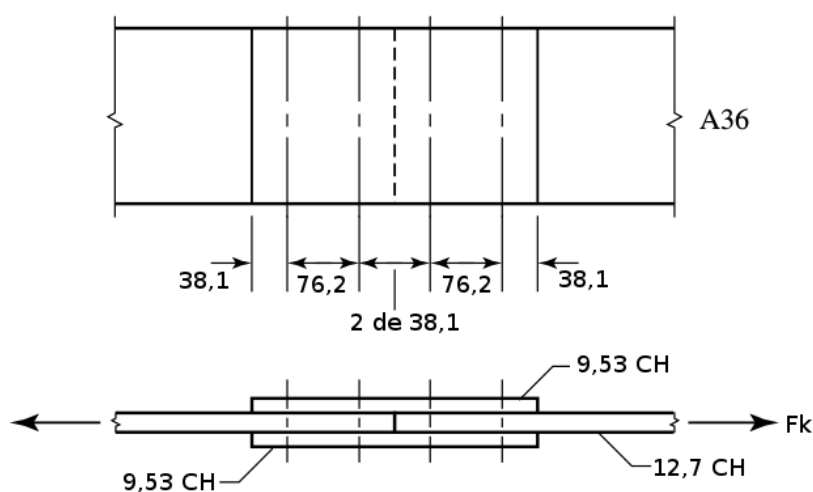


Figura 9.7: Esquema para posicionamento dos parafusos.

9.3 Propostos, nível intermediário

Ex. 9.3.1 Barra atirantada U Uma barra atirantada de uma treliça sujeita a uma carga característica acidental de 720 kN, é constituída por dois perfis U 250 x 29,8 kg/m, prendendo-se a uma chapa gusset de 12,7 mm por meio de parafusos A307 de 19,05 mm de diâmetro. Verificar a segurança da ligação em projeto. Desconsidere o peso próprio.

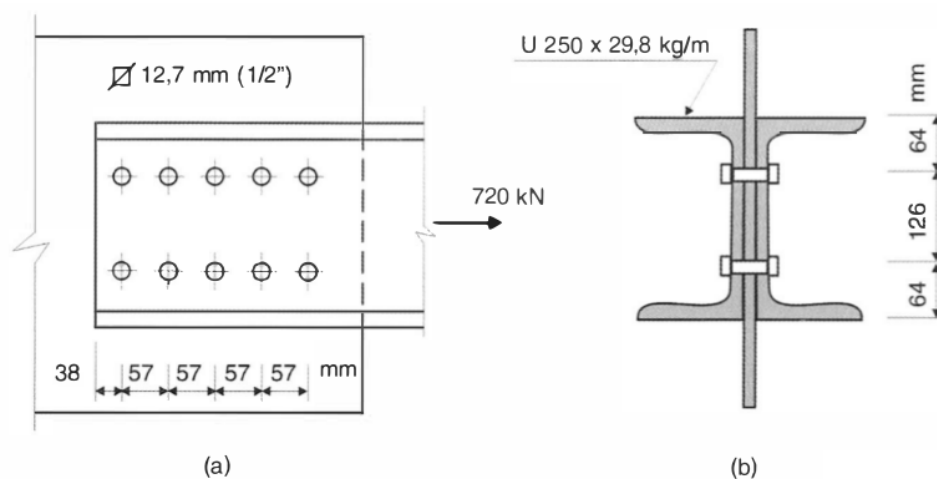


Figura 9.8: Esquema de ligação da barra atirantada.

Ex. 9.3.2 Dimensionamento Completo Um C 254x22,7 kg/m de aço A242 é usado como barra tracionada e deverá ser conectado a uma chapa gusset de 12,7 mm de espessura de aço A36. As solicitações características da barra são uma carga permanente de 178 kN e uma carga acidental de uso de 356 kN. Determine a quantidade e o diâmetro dos parafusos a serem utilizados, assim como os seus espaçamentos. Não é necessário verificar o perfil C à tração.

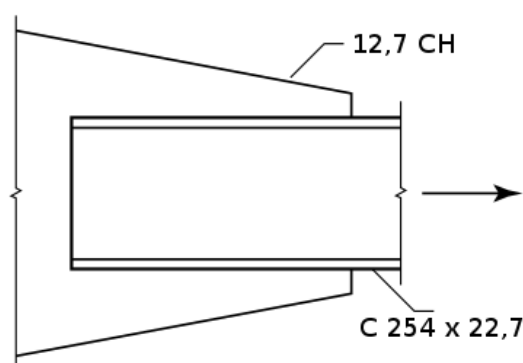


Figura 9.9: Esquema inicial para a composição da ligação.

Ex. 9.3.3 Máximo de parafusos com mesas rígidas Determinar o número mínimo de parafusos A325 de 22 mm de diâmetro necessários para a ligação à tração da figura. Admitir que as chapas das mesas são bastante rígidas.

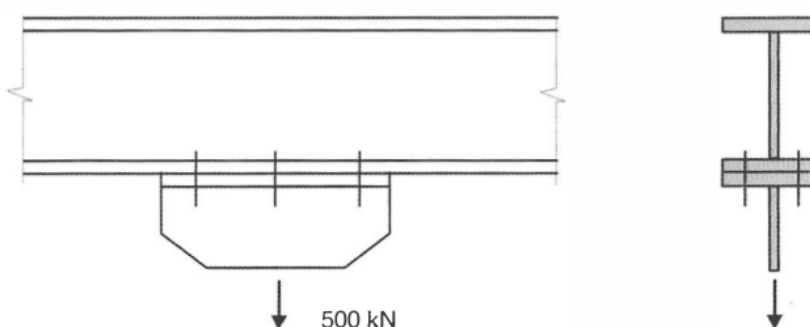


Figura 9.10: Esquema de ligação das mesas com parafusos.

Ex. 9.3.4 Ligação tracionada cantoneira Verifique a ligação tracionada da figura levando em conta os efeitos de alavanca. As cargas são de 27 kN permanente e 67 kN acidental de uso. As cantoneiras 2L 101,6 x 101,6 x 15,88 mm são de aço A36 e as chapas de 22,23 mm de espessura e também A36. Os parafusos são A307 de 12,7 mm de diâmetro.

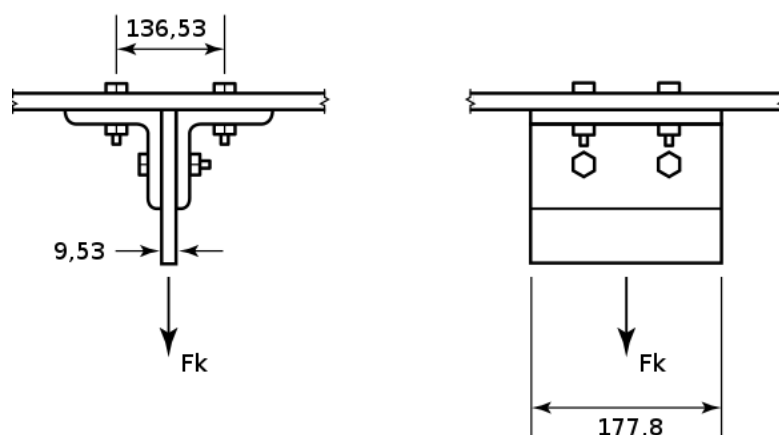


Figura 9.11: Detalhamento da ligação tracionada.

Ex. 9.3.5 Parafusos com dupla ligação Uma barra tracionada de cantoneira dupla deve ser conectada a uma chapa gusset de 22,23 mm de espessura a qual é, por sua vez, conectada a outro par de cantoneiras como mostrado na figura. A carga característica solicitante de 534 kN é composta de 25 % de carga permanente de pesos próprios e 75 % de carga acidental de uso. Todas as conexões devem ser executadas para trabalharem ao atrito com parafusos de 22,23 mm, A490. O centro de gravidade dos parafusos deve passar pela linha de ação da força solicitante. Determine o número de parafusos para cada região da ligação e seu posicionamento nas peças. A coluna é de aço A992 e as cantoneiras e chapas de MR250.

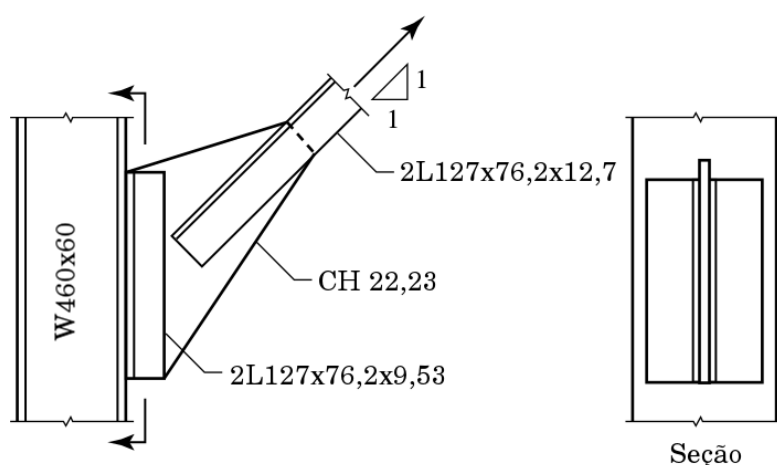


Figura 9.12: Ligação parafusada com dupla ligação.

9.4 Propostos, nível graduado

Ex. 9.4.1 Ligação Viga-Pilar Os seguintes elementos estruturais metálicos utilizam aço A36 para as cantoneiras e A992 para a viga e as colunas. Pede-se:

- Determine um perfil para a viga para suportar, em adição ao seu peso próprio, uma carga característica acidental de uso de 73 kN/m. A mesa comprimida está continuamente contida. Utilize o ELU para o dimensionamento;
- Dimensione a ligação parafusada com cantoneiras de abas iguais. Determine o diâmetro e quantidade de parafusos, assim como os seus espaçamentos e sua resistência. Verifique também as cantoneiras e determine sua dimensão o seu comprimento;
- Prepare um memorial e cálculo e um detalhamento construtivo.

Obs.: As ligações são idênticas em ambas as extremidades da viga.

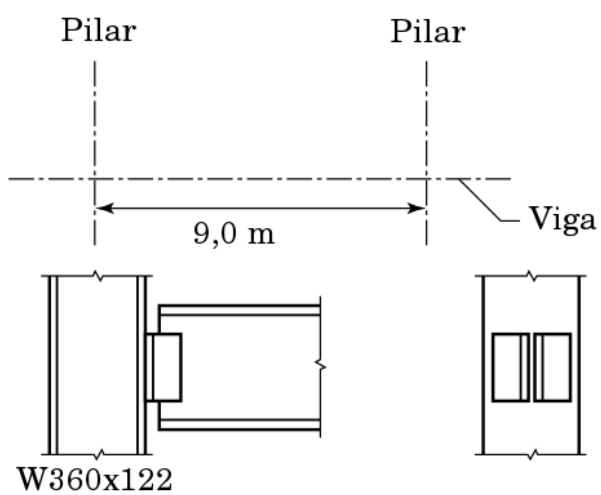


Figura 9.13: Esquema da ligação viga pilar.