

INDICE

CAPÍTULO 7 – LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS (PARTE1)	1
1 INTRODUÇÃO	1
2 CONCEITOS GERAIS DO COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES	3
3 LIGAÇÕES SOLDADAS	7
3.1 Solda de filete	8
3.1.1 Tipos de metal de solda (eletrodos) e dimensões mínimas e máximas dos filetes	9
3.1.2 Condições a serem verificadas para dimensionamento	10
3.1.3 Verificação quanto ao colapso por rasgamento (item 6.5.6, NBR 8800)	11
3.2 Exemplos de dimensionamento de ligações soldadas	12
3.2.1 Caso de tração centrada, cisalhamento do filete de solda	12
3.2.2 Caso de tração e cisalhamento do filete de solda	14
3.2.3 Caso de esforço excêntrico – tensão não uniforme na solda	16

CAPÍTULO 7 – LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS (parte1)

1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores, foram estudados os métodos básicos de dimensionamento aos esforços simples, para a continuidade do estudo das estruturas metálicas é necessário agora iniciar com o estudo das ligações entre as peças componentes da estrutura. Como elemento estrutural pré-moldado, a estrutura metálica é composta de partes fornecidas por fabricantes de perfis, chapas, etc. que são montados em seu local de aplicação. As ligações entre esses diversos componentes, portanto, é de fundamental importância para o correto desempenho da estrutura, tanto sob o aspecto de estabilidade como pelo aspecto de se obter da estrutura o comportamento previsto pelo projeto.

As ligações entre as peças da estrutura é feita usualmente através da utilização de soldas ou de parafusos. Também são utilizados chumbadores para conexão com elementos de estruturas existentes, partes em concreto ou fundações. As ligações entre as peças metálicas são apresentadas na seção 6 da NBR 8800 e as ligações mistas para estruturas aço/concreto estão nas seções 7 e 8, além do anexo R da mesma norma. Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos do dimensionamento de ligações por meio de solda ou parafusos entre elementos metálicos.

Mais uma vez lembrando que as estruturas metálicas são compostas de elementos, tais como perfis, para sua ligação é usual a utilização de elementos auxiliares, tais como as chamadas “chapas de gusset” ou cantoneiras.



figura 7.1 – (esq) Ligação entre viga e coluna por meio de parafusos, utilizando cantoneiras auxiliares e (dir) ligação entre elementos de contraventamento e da estrutura principal através de chapas de gusset.

A NBR 8800, define no item 6.1.1.2, ligações metálicas como um conjunto de elementos de ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos.

Esses componentes devem ser dimensionados de forma que sua resistência de cálculo a um determinado estado-limite último seja igual ou superior à solicitação de cálculo, determinada:

- a) Pela análise da estrutura sujeita às combinações de cálculo das ações, conforme já estabelecido no capítulo correspondente ao tratamento das ações e segurança;
- b) Como uma porcentagem especificada da resistência da barra ligada.

Em algumas situações específicas, o dimensionamento também pode ter como base um estado-limite de serviço.

A NBR 8800 estabelece também, que a força mínima a ser considerada para o dimensionamento de uma ligação é de 45 kN, para qualquer direção da força atuante, exceto no caso de diagonais e montantes de travejamento de barras compostas, tirantes constituídos de barras redondas, travessas de fechamento lateral e terças de cobertura de edifícios (item 6.1.5.2). No item 6.1.5.3, a NBR 8800 recomenda, a critério do responsável técnico, que as ligações de barras tracionadas ou comprimidas sejam dimensionadas, no mínimo, para 50% da força axial resistente da barra, referente ao tipo de solicitação que comanda o dimensionamento.

A NBR 8800 (item 6.1.7) estabelece, também, que nos pontos de apoio, vigas e treliças devem ter rotação impedida em relação ao seu eixo longitudinal.

2 CONCEITOS GERAIS DO COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

As ligações podem ser classificadas conforme seu comportamento estrutural, conforme os esforços a que é submetida ou conforme o elemento de ligação entre as peças. Iniciando pelo comportamento estrutural, pode-se classificar as ligações em:

- Rígida: Quando sua rigidez é suficiente para manter o ângulo entre as peças ligadas praticamente constante;
- Flexível: Quando permite rotação entre os elementos conectados.
- Semi-rígida: Tem um comportamento intermediário.

Os comportamentos apresentados acima são teóricos e não existe um comportamento perfeitamente rígido ou flexível. Os limites que definem uma ligação como rígida, flexível ou semi-rígida estão apresentados no item 6.1.2 da NBR 8800 e dependem da rigidez dos elementos conectados e da ligação. De modo simplificado, a NBR admite no item 6.1.2.3, que as ligações usuais, tradicionalmente consideradas como rígidas ou flexíveis possam ser simuladas dessa forma na análise estrutural. Alguns exemplos de ligações que estão nessa condição aproximada:

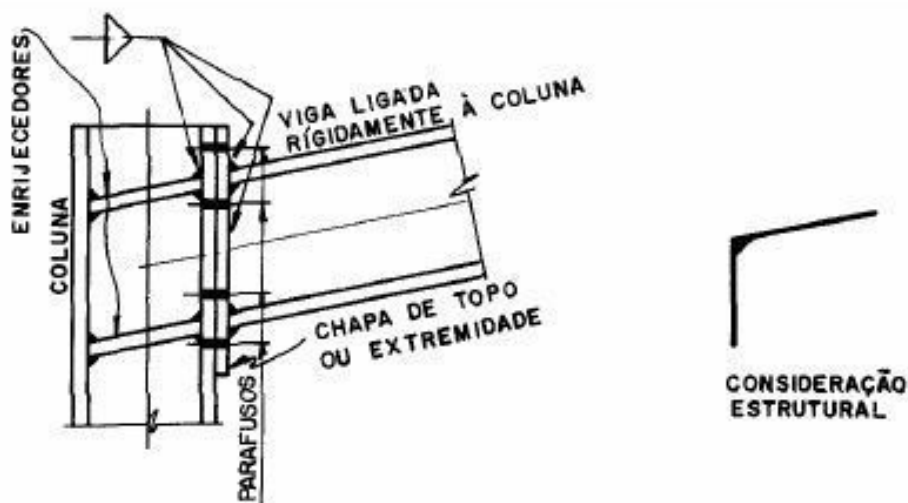


figura 7.2 – Ligação com comportamento rígido – engastamento elástico

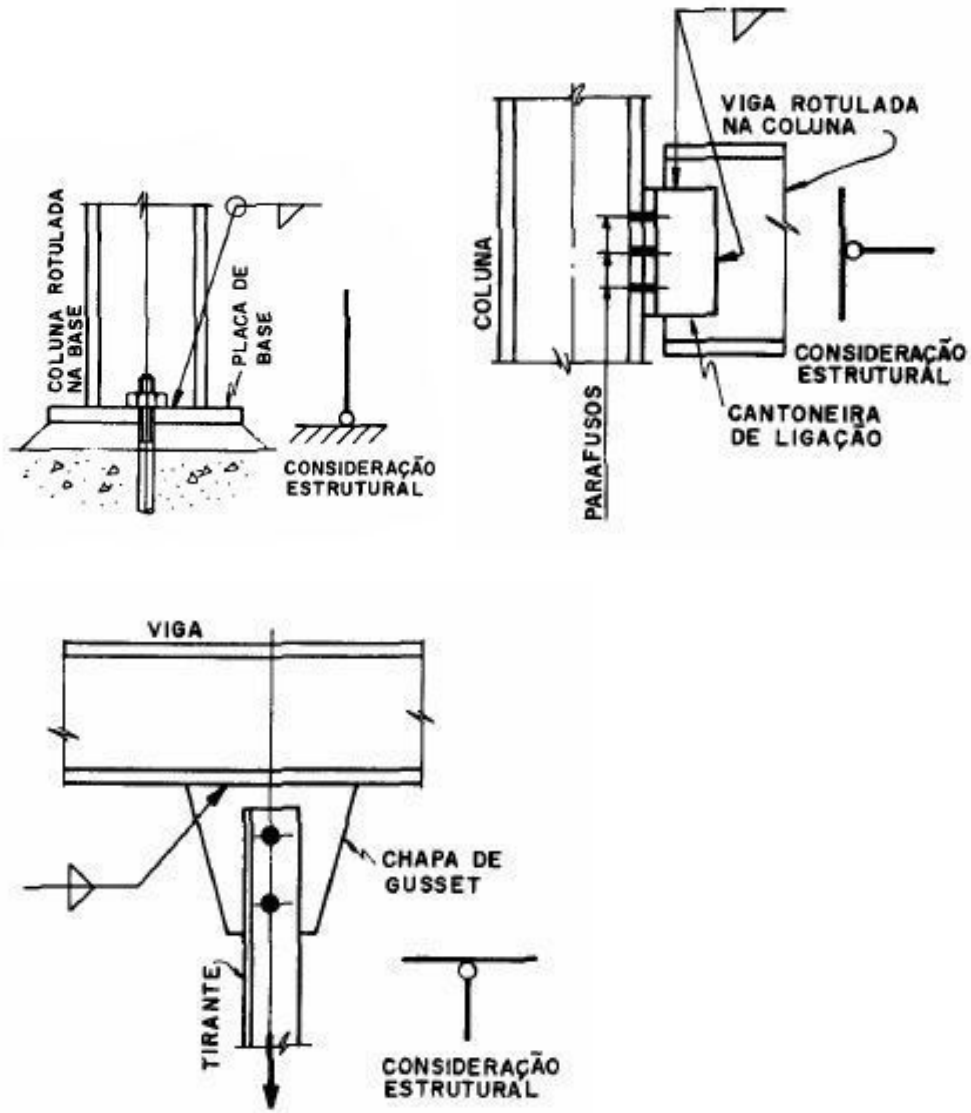


figura 7.3 – ligações com comportamento flexível – rótula na base de coluna, apoio simples de viga e tirante preso a viga.

Outra forma de serem classificar as ligações é conforme os esforços a que estão submetidas. Essa classificação é adequada para o dimensionamento. De modo simplificado:

a) Ligações submetidas à tração centrada:

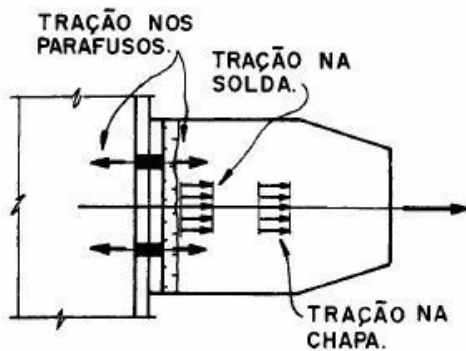


figura 7.4 – ligação tracionada

b) Ligações submetidas ao cisalhamento centrado:

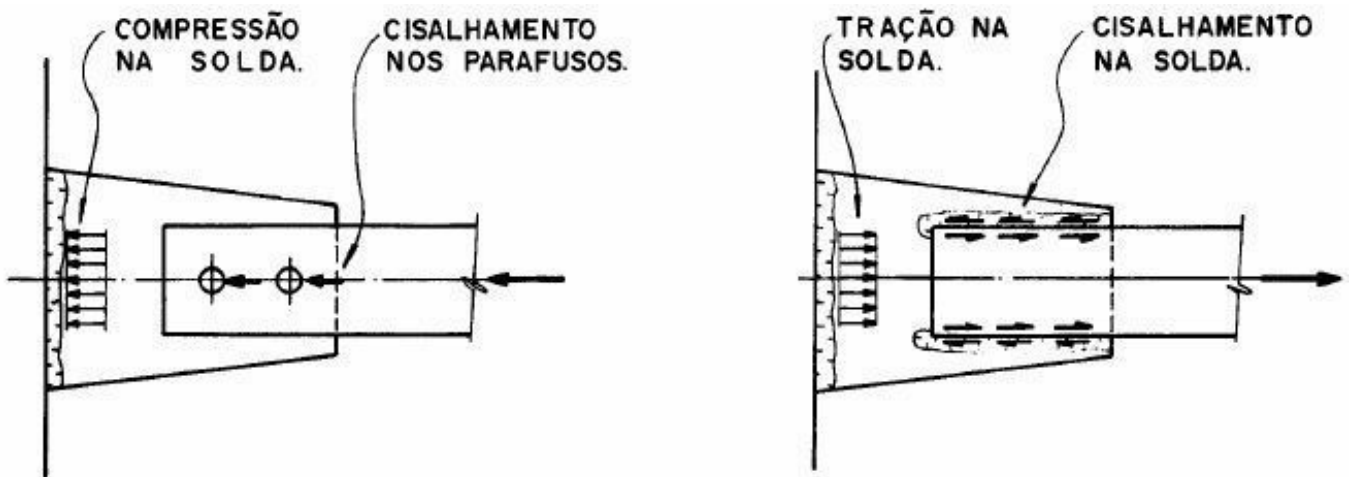


figura 7.5 – ligação com cisalhamento centrado

c) Ligações submetidas ao cisalhamento e tração:

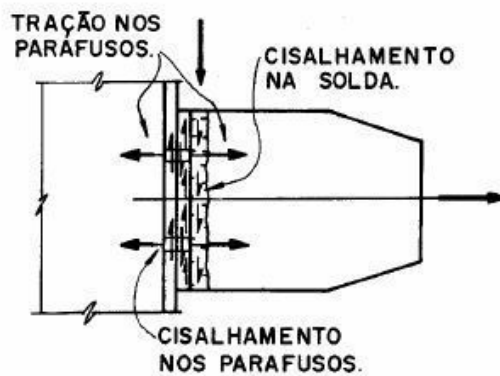


figura 7.6 – ligação com cisalhamento e tração

d) Ligações submetidas ao cisalhamento excêntrico:

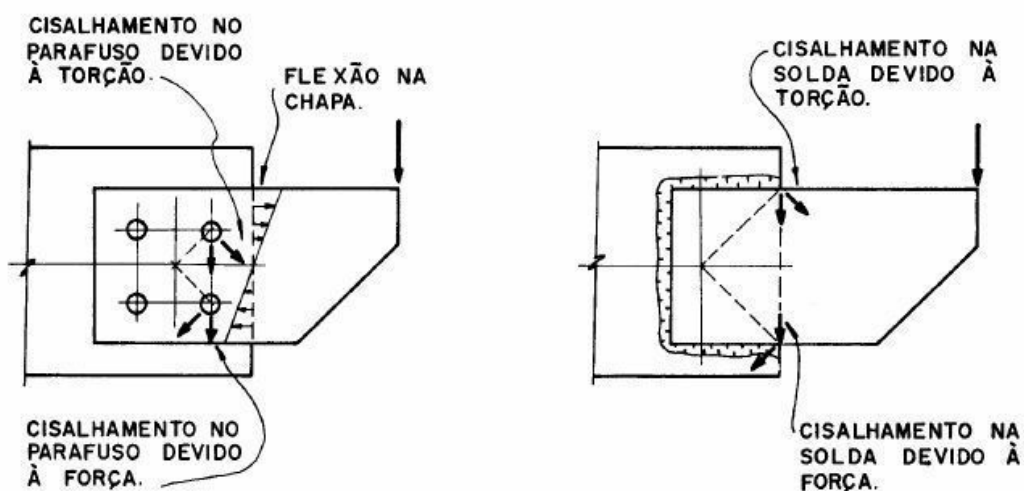


figura 7.7 – ligação submetida ao cisalhamento excêntrico

Finalmente, sob o aspecto do meio utilizado, as ligações podem ser:

a) Ligações soldadas:

Onde o meio de ligação dos elementos é a solda, alternativa largamente utilizada em fábrica ou canteiro. O comportamento básico dessa ligação pode ser visto a seguir, na figura 7.8:

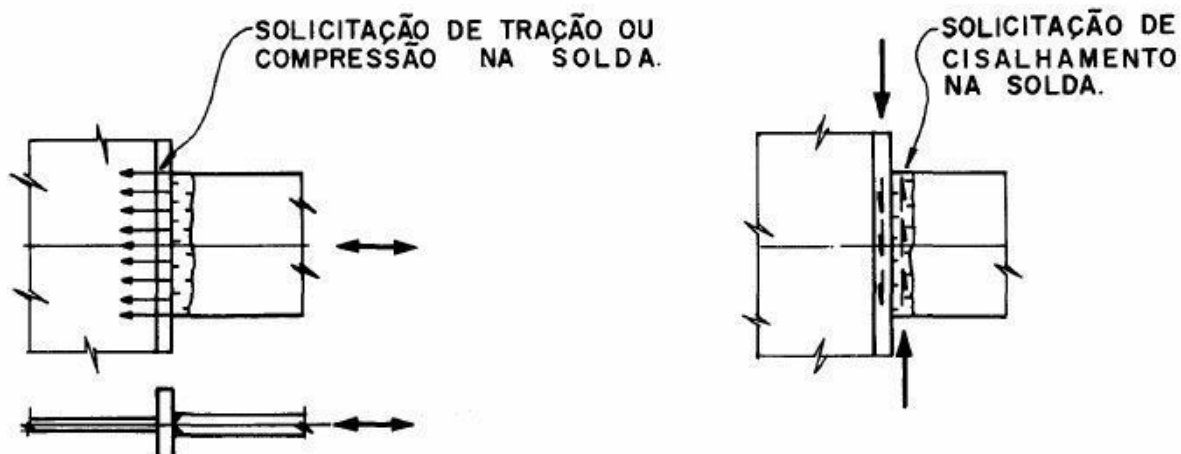


figura 7.8 – Condição típica de uma ligação soldada

Conforme pode-se observar na figura, no caso de ligação soldada, a solda pode ser submetida a esforços de tração/compressão e/ou cisalhamento. Os perfis conectados, por sua vez, podem ser rompidos no local da ligação por escoamento do material.

b) Ligações parafusadas:

Onde as peças são ligadas por meio de parafusos. Esse modo de conceber uma ligação é mais adequado para execução na obra.



figura 7.9 – Comportamento típico de uma ligação parafusada

Os esforços a que são submetidos os parafusos são: tração ou cisalhamento do fuste no plano da ligação. Quanto aos elementos conectados, como há o contato entre os parafusos e a chapa metálica, esta pode ser esmagada, ou o conjunto dos parafusos pode rasgar a chapa.

Neste capítulo será apresentado o dimensionamento básico das ligações, iniciando pelas ligações soldadas e completando com o dimensionamento das ligações parafusadas.

A NBR não permite, a menos de alguns casos particulares, e com limitações, o uso de ligações combinadas, soldas e parafusos.

3 LIGAÇÕES SOLDADAS

A ligação por meio de solda tem como características gerais:

- a) Necessidade de energia no local de execução o que limita sua aplicabilidade para algumas condições de canteiro;
- b) Necessidade de mão de obra mais especializada (soldador);
- c) Induz tensões nas peças, pelo aquecimento e resfriamento;
- d) É mais sensível à fadiga que a ligação parafusada;
- e) É de execução mais rápida que uma ligação parafusada quando esta tem muitos parafusos;
- f) Para ligação com solda de filete, seu custo é menor que o custo da ligação parafusada correspondente, devido ao custo dos parafusos, porcas e arruelas.

Três tipos principais de solda que são utilizados em estruturas metálicas:

Solda por penetração: Onde o elemento de solda, material do eletrodo, é depositado em uma ranhura entre os elementos a serem ligados;

Solda de filete: Onde o elemento de solda é depositado no contato entre os elementos a serem ligados;

Solda de tampão ou rasgo: Quando o material de solda é depositado em uma abertura ou rasgo de uma chapa alcançando o outro perfil no fundo da abertura.

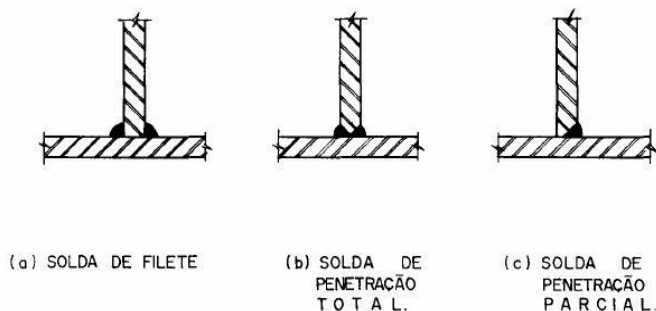


figura 7.10 – Solda de filete e de penetração

A solda de penetração é de execução mais difícil por necessitar da execução de entalhes nas peças, mas seu comportamento é melhor quanto às tensões induzidas pelo processo de soldagem, tem melhor comportamento à fadiga bem como possibilita um melhor acabamento da ligação. Contudo, como a solda de filete é de execução mais fácil, e de custo menor, ela é bastante mais comum em obras correntes.

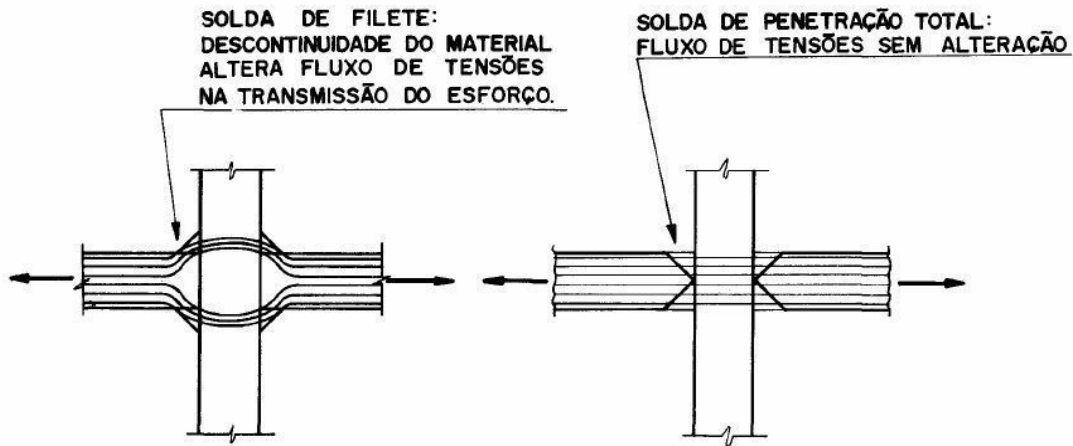


figura 7.11 – Comportamento de tensões residuais de soldas de filete e de penetração

3.1 Solda de filete

Uma vez que as soldas de filete são mais comuns, será estudada apenas esta alternativa no presente capítulo. Quanto à sua nomenclatura, as soldas de filete apresentam as seguintes definições:

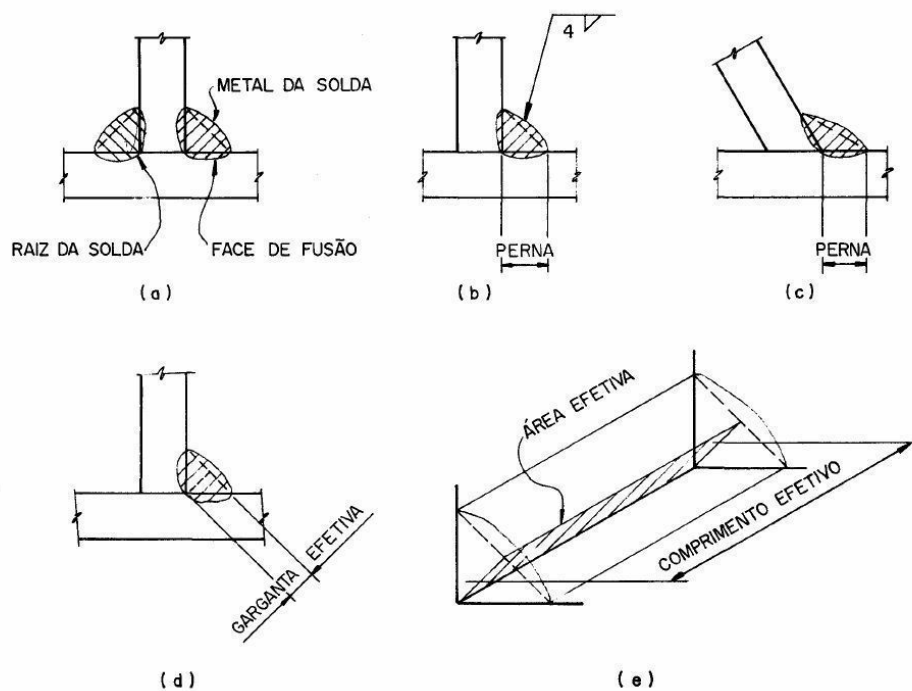


figura 7.12 – Nomenclatura básica para as soldas de filete

Da nomenclatura apresentada na figura 7.12, deve-se salientar:

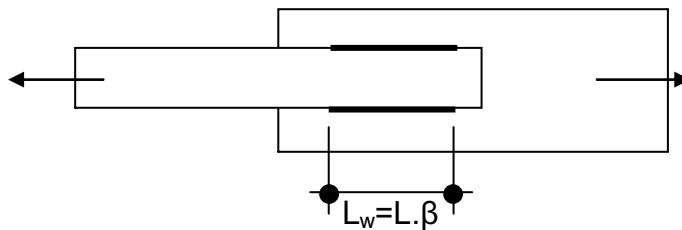
- A “perna” do filete (normalmente referido pela letra b), é a dimensão do lado do triângulo teórico da seção do filete de solda, observar que a dimensão da perna de solda (em mm) é indicada na representação gráfica do filete (figura 7.12 – b);
- Enquanto a perna da solda é referida na representação gráfica da solda, a “garganta efetiva” (usualmente referida pela letra “a”) é a altura do triângulo teórico do filete de solda e

c) a “área efetiva de solda” (A_w) é o produto da garganta efetiva pelo comprimento efetivo (L_w), que por sua vez é a extensão do filete de solda – $A_w = L_w \cdot a$.

d) A face do filete de solda, em contato com uma das peças ligadas, ver figura 7.12, é a face de fusão.

O produto: $A_{MB} = L_w \cdot t$, é a área do metal base (área definida pelo comprimento da solda e pela espessura do metal base). O comprimento efetivo de solda, é dado por:

$L_w = L \cdot \beta$, com $\beta = 1,2 - 0,002(L/b)$, e $0,6 \leq \beta \leq 1,0$ – no caso de soldas de filete longitudinais, nas ligações extremas de elementos axialmente solicitados;



Para os demais casos $L = L_w$ ($\beta = 1,0$).

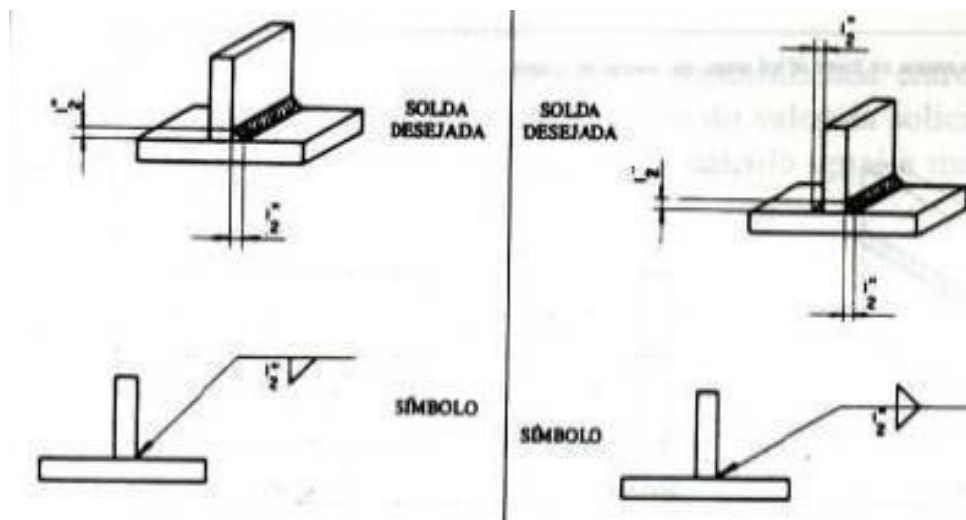


figura 7.13 - exemplos de representação gráfica de soldas de filete

3.1.1 Tipos de metal de solda (eletrodos) e dimensões mínimas e máximas dos filetes

A escolha do tipo de solda a ser aplicado para uma determinada ligação depende de um estudo mais aprofundado do processo de soldagem. Como uma indicação para o presente estudo, a NBR define o tipo de eletrodo que deve ser utilizado conforme as características do metal base (tabela 7, item 6.2.4). Por exemplo:

Para o aço A 36 (espessuras dos elementos $\leq 19\text{mm}$) – solda arco elétrico

Pode-se utilizar o eletrodo revestido E 70XX (resistência do metal de solda: $f_w = 485$ MPa), ou E 60XX (resistência do metal de solda: $f_w = 415$ MPa).

Para espessuras > 19 mm do aço A 36 ou para o aço AR 350, a mesma tabela indica eletrodos E 7015, E 7016 ou E 7018 ($f_w=485$ MPa) .

*as resistências mínimas dos eletrodos são indicadas na tabela A.4 da NBR 8800

As dimensões mínimas e máximas do filete dependem das espessuras dos elementos soldados:

Valores mínimos de b para espessura (e) do metal base (NBR 8800, item 6.2.6.2.2):

$e \leq 6,35$ mm	$b \geq 3,0$ mm
$6,35$ mm $< e \leq 12,5$ mm	$b \geq 5,0$ mm
$12,5$ mm $< e \leq 19,0$ mm	$b \geq 6,0$ mm
$e > 19,0$ mm	$b \geq 8,0$ mm

Valores máximos de b:

$e < 6,35$ mm	$b \leq e$
$e \geq 6,35$ mm	$b \leq e - 1,5$ mm

Quanto ao comprimento efetivo do filete de solda (L_w) (item 6.2.6.2.3):

$L_w \geq 4.b$ e 40 mm, ou b não pode ser considerado maior que 25% de L_w .

Para chapas planas tracionadas, ligadas em sua extremidade por meio de soldas de filete longitudinais: comprimento de cada filete deve ser maior que a distância transversal entre eles.

3.1.2 Condições a serem verificadas para dimensionamento

Conforme anteriormente exposto, as duas condições básicas a serem verificadas na seção da ligação são a ruptura de solda ou escoamento/ruptura do metal base.

Para a ruptura da solda:

$$F_{Rd} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_w / \gamma_{w2},$$

com $\gamma_{w2} = 1,35$ para combinações normais e 1,15 para combinações excepcionais.

Para a escoamento/ruptura do metal base:

$$F_{Rd} = A_{MB} \cdot f_y / \gamma_{a1};$$

para escoamento de elementos submetidos a tensões de tração ou compressão (NBR 8800, itens 6.5.3 e 6.5.4);

$$F_{Rd} = 0,6 \cdot A_{MB} \cdot f_y / \gamma_{a1};$$

para escoamento de elementos submetidos a cisalhamento (NBR 8800, item 6.5.5);

$F_{Rd} = A_{MB} \cdot f_u / \gamma_{a2}$; para ruptura de elementos submetidos a tensões de tração ou compressão (NBR 8800, itens 6.5.3 e 6.5.4);

$F_{Rd} = 0,6 \cdot A_{MB} \cdot f_u / \gamma_{a2}$; para ruptura de elementos submetidos a cisalhamento (NBR 8800, item 6.5.5);

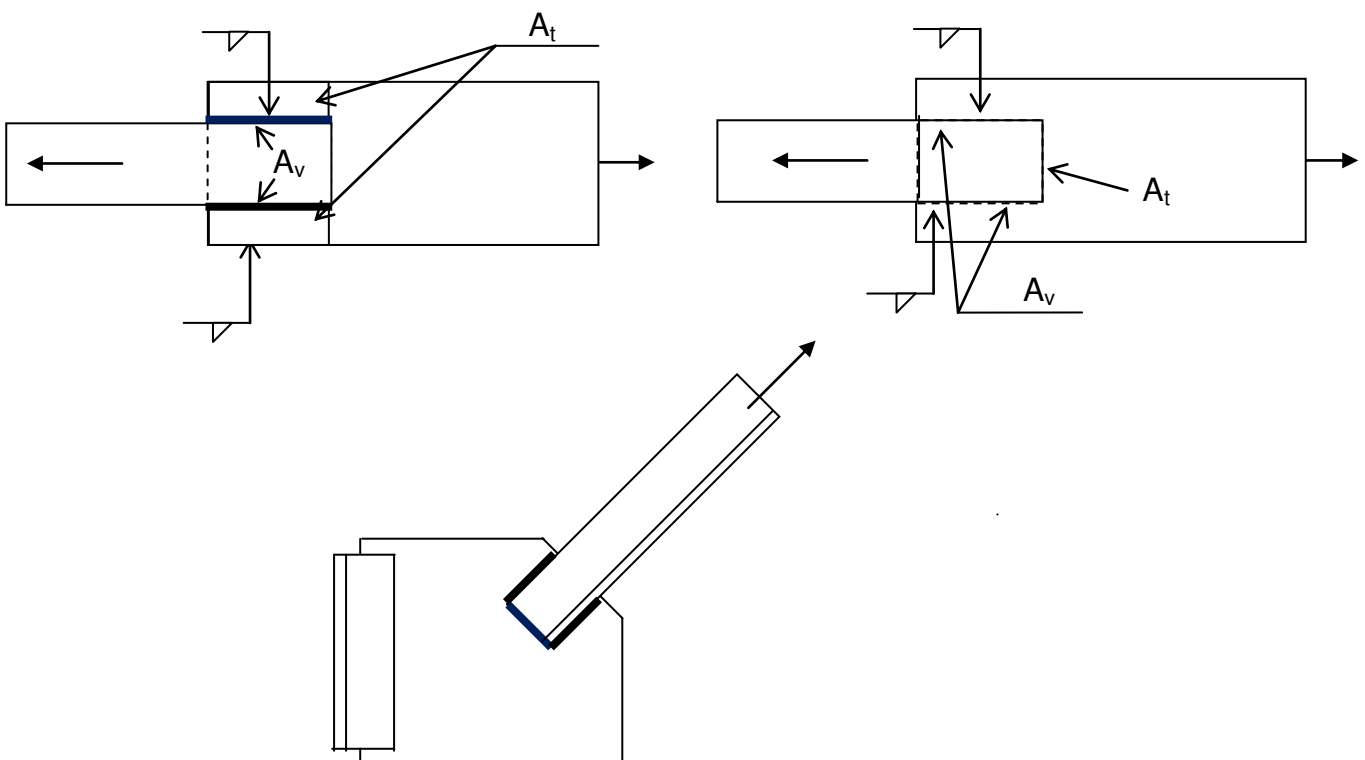
Onde, $\gamma_{a1} = 1,1$, $\gamma_{a2} = 1,35$.

As verificações acima se referem à ligação entre os elementos, além dessas verificações, no caso de ligações em extremidades e situações similares, deve ser verificada a condição de colapso por rasgamento.

Existem outras verificações relativas aos elementos auxiliares de ligação que serão apresentadas mais à frente, após o assunto ligações parafusadas.

3.1.3 Verificação quanto ao colapso por rasgamento (item 6.5.6, NBR 8800)

A condição de rasgamento deve ser verificada sempre que os esforços aplicados na ligação tendam a arrancar uma parte da seção transversal ao atuarem. As figuras abaixo, retiradas da NBR 8800, ilustram essa situação em algumas condições típicas aplicáveis à ligação soldada.



Para as situações de rasgamento, a força resistente de cálculo é dada por:

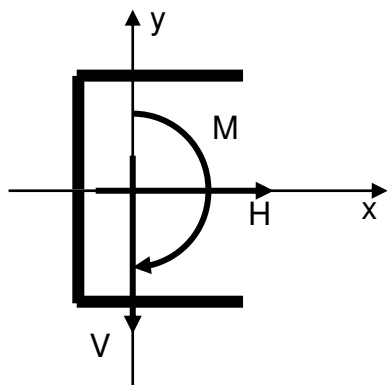
$$F_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt})$$

Onde: A_{nv} e A_{nt} são as áreas líquidas que sofrem corte e tração, respectivamente, quando a ligação é solicitada;

A_{gv} é a área bruta correspondente a A_{nv} ;

C_{ts} vale 1,0 se a tensão de tração na área líquida for uniforme e igual a 0,5 caso contrário.

3.2.3 Caso de esforço excêntrico – tensão não uniforme na solda

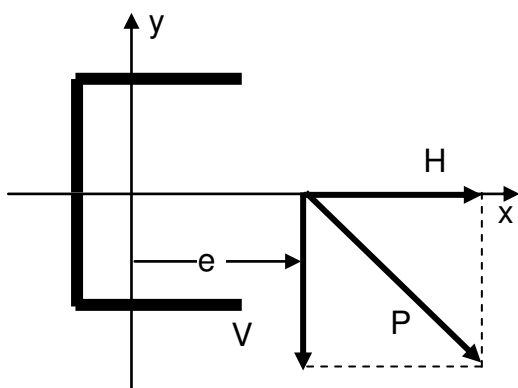


Em caso de ligação onde há aplicação de momento fletor, a NBR 8800 também indica que pode ser considerada a tensão sobre um filete unitário.

O esforço aplicado sobre o filete de solda está representado na figura ao lado.

Os eixos x e y são os eixos que passam pelo centro de gravidade do cordão de solda.

A situação mostrada é equivalente a uma carga excêntrica, ou seja:



Com M provocado pela excentricidade da força.

No caso da figura, $M = P.e$

Analisando inicialmente apenas o efeito do momento sobre a ligação, verifica-se que M atua no plano da seção transversal, e a tensão provocada pelo momento sobre o cordão de solda é dependente da distância da posição considerada até o centro de giro do momento.

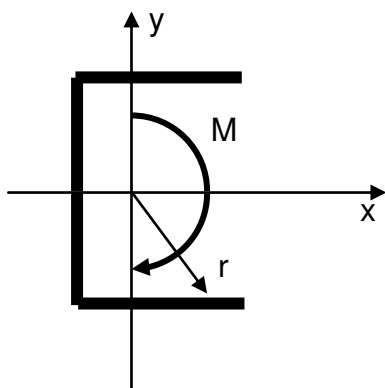
A tensão é dada pela expressão da resistência dos materiais:

$$\sigma_M = \frac{M}{I_p} \cdot r,$$

Na expressão:

I_p = Momento de inércia polar da seção, calculado com relação aos eixos principais de inércia do filete de solda. Com $I_p = I_x + I_y$, e,

r – é a distância da posição considerada até o centro de gravidade do filete. Para um valor r qualquer, $r^2 = x^2 + y^2$



Expressando a tensão devida ao momento sobre a solda em termos de x e y:

$$\sigma_M = \sqrt{\left(\frac{M}{I_p}\right)^2 \cdot x^2 + \left(\frac{M}{I_p}\right)^2 \cdot y^2} = \frac{M}{I_x + I_y} \sqrt{x^2 + y^2} \text{ ou, chamando:}$$

$$k = \frac{M}{I_x + I_y}, \text{ pode-se escrever: } f_x = k \cdot y \text{ e } f_y = k \cdot x, \text{ e } f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

Uma vez que o momento em geral é proveniente do efeito da excentricidade da força aplicada, é necessário superpor às tensões provocadas pelo momento as tensões provocadas pelas forças em si. Chamando, as tensões nos filetes de solda, devido às componentes de força vertical e horizontal, respectivamente de:

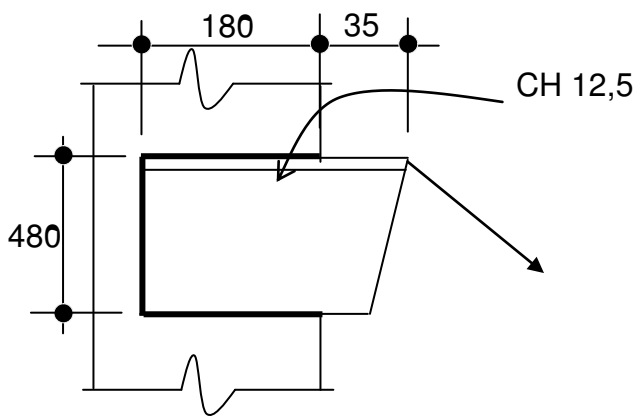
$$f_v = V/A \text{ e } f_h = H/A, \text{ onde } A = L_w \cdot a,$$

a resultante dessas tensões é:
$$f_r = \sqrt{f_h^2 + f_v^2}$$

superpondo com o efeito da excentricidade da força:

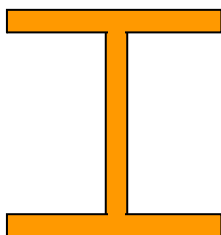
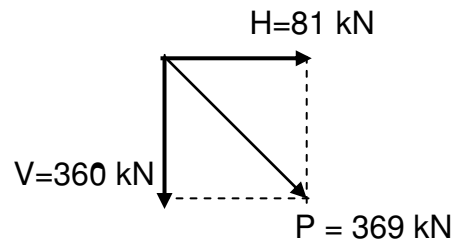
$$f_r = \sqrt{(f_x + f_h)^2 + (f_y + f_v)^2}$$

Com os conceitos acima, calcule a dimensão necessária (b) para o filete de solda representado de modo esquemático na figura: Aço A-36 e solda com E70 XX.



Perfil
HPL 400

Componentes da carga:



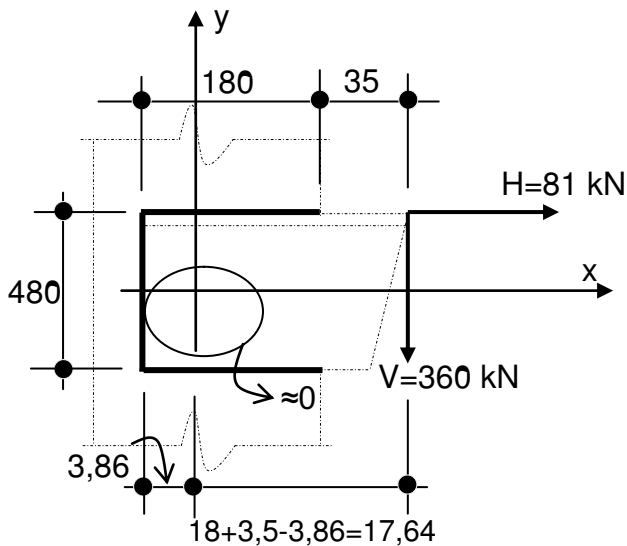
a) Como o esforço deve ser transportado para o centro de gravidade da ligação:

$$\text{Área do filete teórico (b=1) de solda: } A = 1.2 \cdot 18 + 1.48 = 84 \text{ cm}^2$$

$$x_g = \frac{2 \cdot 18 \cdot 18/2 + 48 \cdot 0}{84} = 3,86 \text{ cm}$$

$$y_g = 48/2 = 24 \text{ cm (o perfil e a solda são simétricos)}$$

O filete de solda com o esforço externo, pode ser representado:



Demais propriedades do filete:

$$I_x = \frac{1.48^3}{12} + 2 \cdot \frac{18.1^3}{12} + 2.18.1 \cdot \left(\frac{48}{2}\right)^2 = 29.950 \text{ cm}^4$$

$$I_y = \frac{48.1^3}{12} + 48.1 \cdot 3,86^2 + 2 \cdot \left[\frac{1.18^3}{12} + 18.1 \cdot \left(\frac{18}{2} - 3,86\right)^2 \right] = 2640 \text{ cm}^4$$

b) Cálculo dos esforços no CG do filete unitário:

$$M = 81.24 + 360.17,64 = 8.294,40 \text{ kN.cm}$$

$$f_v = \frac{360}{84} = 4,29 \text{ kN/cm}^2; \quad f_h = \frac{81}{84} = 0,96 \text{ kN/cm}^2$$

$$k = \frac{8294,4}{29950+2640} = 0,2545 - \text{ a tensão será máxima nas coordenadas extremas do filete, daí:}$$

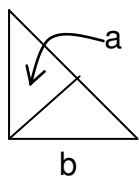
$$x_{\text{máx}} = 18 - 3,86 = 14,14 \text{ cm} \rightarrow f_y \text{ (ou } f_v) = 0,2545.14,14 = 3,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$y_{\text{máx}} = 24 \text{ cm} \rightarrow f_x \text{ (ou } f_h) = 0,2545.24 = 6,11 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_r = \sqrt{(0,96 + 6,11)^2 + (4,29 + 3,6)^2} = 10,59 \text{ kN/cm}^2;$$

Do exemplo anterior: $S_d/A_w = 19,28 \text{ kN/cm}^2$;

$$\text{força por unidade de comprimento} = 1 \cdot \sqrt{2}/2 \cdot b \cdot 19,28 = 13,63 \cdot b$$



Tensão por unidade de comprimento: $10,6 \text{ kN/cm}^2$, essa tensão corresponde a uma força por unidade de comprimento dada por:

$$10,6 \cdot 1 \cdot 1 = 10,6 \text{ kN, daí } \rightarrow 13,63 \cdot b = 10,6 \rightarrow b = 10,6/13,63 = 0,78 \text{ cm}$$

Verificação da espessura da solda:

$$\text{Chapa mais grossa: } e = 16 \text{ mm} \rightarrow b \geq 6,0 \text{ mm}$$

$$\text{Chapa mais fina: } e = 12,5 \text{ mm} \rightarrow b \leq 12,5 - 1,5 = 11 \text{ mm}$$

Logo, filete com $b = 8 \text{ mm}$.

INDICE

CAPÍTULO 7 – LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS (PARTE 2)		10
4	LIGAÇÕES PARAFUSADAS	10
4.1	Tipos de furos padronizados e distanciamento.....	12
4.2	Força resistente de cálculo dos parafusos ou nas chapas em contato direto com eles	14
4.2.1	Tração.....	14
4.2.2	Cisalhamento	15
4.2.3	Pressão de contato em furos	16
4.2.4	Tração e cisalhamento.....	16
4.2.5	Atrito	17
4.2.6	Condições desfavoráveis – pega longa ou ligações de grande comprimento	19
4.3	Exemplos de dimensionamento de ligações parafusadas	19
5	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO	20
5.1	Elementos tracionados	20
5.2	Elementos comprimidos.....	20
5.3	Elementos submetidos a cisalhamento.....	21
5.4	Colapso por rasgamento.....	21
5.5	Exemplos de dimensionamento de elementos de ligação	21

CAPÍTULO 7 – LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS (parte 2)

Na primeira parte deste capítulo foram estudados os conceitos gerais de ligações e as regras básicas do dimensionamento de ligações soldadas. Esta segunda parte irá tratar da outra alternativa usual, as ligações parafusadas.

4 LIGAÇÕES PARAFUSADAS

A ligação parafusada tem como características gerais:

- Não necessita energia no local de execução o que a torna indicada para ligações feitas no canteiro;
- Necessidade de mão de obra menos especializada para sua execução;
- É menos sensível à fadiga que a ligação soldada;
- É conveniente a execução de pré-montagens dos elementos para assegurar a coincidência de furos das peças;

De maneira geral, é indicado o uso de ligações parafusadas no canteiro, principalmente pela dificuldade de se garantir a correta execução e posterior resfriamento dos materiais no caso de soldas. Os parafusos utilizados em construções metálicas são o parafuso comum e o de alta resistência, além de porcas e arruelas normalizadas. Em casos bastante específicos é permitido o uso de barras de aço comum rosqueadas, que conforme a NBR 8800 (item 6.3) podem ser dimensionadas como parafusos de aço comum, utilizando a resistência do metal da barra.

Os parafusos comuns sempre têm um comportamento de corte e contato, são as chamadas ligações por contato, ilustradas na figura abaixo.

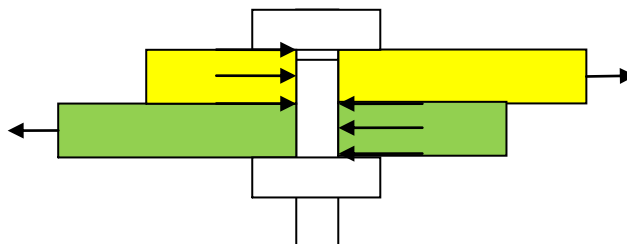


figura 7.14 - esquema do comportamento em ligação por contato

No caso acima, o fuste do parafuso recebe um esforço de corte na altura do plano da ligação e os elementos dos perfis ligados recebem a compressão transmitida pelo parafuso (pressão de contato). O parafuso comum mais utilizado é o tipo ASTM A307, com tensão de ruptura $f_{ub} = 415\text{MPa}$, com os diâmetros especificados em norma, d_b , entre $\frac{1}{2}''$ e $4''$.

Já os parafusos de alta resistência podem ser utilizados como os comuns, corte e contato, ou atuando por atrito. Neste segundo tipo de comportamento, o parafuso recebe um esforço de aperto definido em norma, chamado de protensão inicial, que comprime os elementos ligados. O parafuso, portanto, trabalha tracionado e quando as solicitações externas atuam, o deslocamento é impedido pelo atrito mobilizado entre as chapas devido à compressão entre estes elementos.

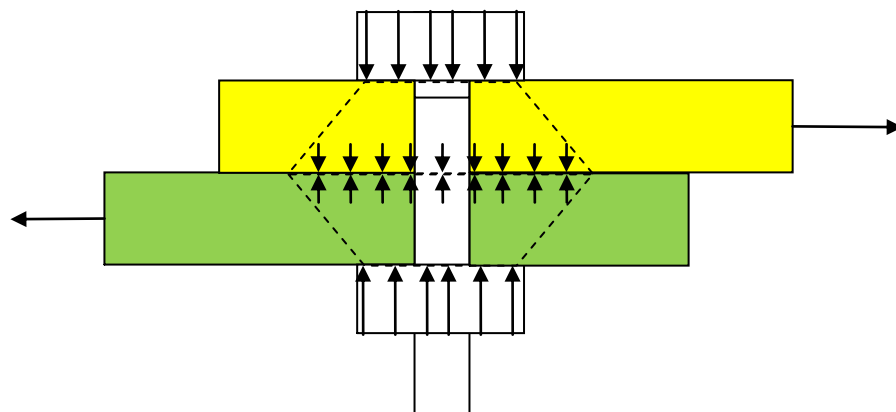


figura 7.15 - esquema do comportamento em ligações por atrito

Os parafusos de alta resistência definidos pela NBR 8800 são:

- a) ASTM A325, para $16\text{mm} \leq d_b \leq 24\text{mm}$ – $f_{yb} = 635\text{MPa}$ e $f_{ub} = 825\text{MPa}$
para $24\text{mm} \leq d_b \leq 36\text{mm}$ – $f_{yb} = 560\text{MPa}$ e $f_{ub} = 725\text{MPa}$
disponíveis também com resistência atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR;
- b) ASTM A490, para $16\text{mm} \leq d_b \leq 36\text{mm}$ – $f_{yb} = 895\text{MPa}$ e $f_{ub} = 1035\text{MPa}$.

Conforme está indicado na figura 7.15, a pressão transmitida pelo parafuso atua nas chapas através do chamado “cone de pressão”, mobilizando o atrito entre as chapas.

As ligações por contato são indicadas em posições secundárias e em ligações não estruturais, uma vez que para mobilizar o contato, é necessário que se possa admitir o deslocamento relativo entre os elementos. Para ligações estruturais de maior responsabilidade, que não admitem deslocamento relativo entre os elementos conectados, a ligação deve ser dimensionada prevendo o comportamento por atrito, que é mais crítico que os comportamento corte-contato.

A NBR estabelece situações indicadas para cada um dos tipos de ligação parafusada, em seu item 6.1.11 e 6.3.1, resumidos a seguir.

Devem ser usados soldas ou parafusos de alta resistência com protensão inicial em ligações por contato e atrito nos seguintes casos:

- a) emendas de pilares nas estruturas de andares múltiplos com mais de 40m de altura;
- b) ligações de vigas com pilares e quaisquer outras vigas das quais depende o sistema de contraventamento, nas estruturas com mais de 40m de altura;
- c) ligações e emendas de treliças de cobertura, ligações de vigas com pilares, emendas de pilares, ligações de contraventamento de pilares, ligações de mãos francesas ou mísulas usadas para reforço de pórticos e ligações de peças suportes de pontes rolantes, nas estruturas com pontes rolantes de capacidade superior a 50kN;
- d) ligações de peças sujeitas a ações que produzam impactos ou tensões reversas;

- e) parafusos A490 sujeitos à tração ou tração e cisalhamento;
- f) parafusos A325 sujeitos à tração ou tração e cisalhamento, em casos que o afrouxamento ou fadiga devidos à vibração ou flutuações de solicitação necessitem ser considerados em projeto.

Nos demais casos podem ser utilizados parafusos de alta resistência sem protensão inicial ou parafusos comuns. A NBR define, item 6.3.1, essa última condição como sendo de “aperto normal” (não é o esforço de protensão inicial). Esse aperto é aquele que pode ser obtido através do esforço máximo de um operário usando uma chave normal, devendo garantir o firme contato entre as partes ligadas. Parafusos montados sem controle de protensão inicial devem ser claramente indicados nos desenhos de projeto, fabricação e montagem.

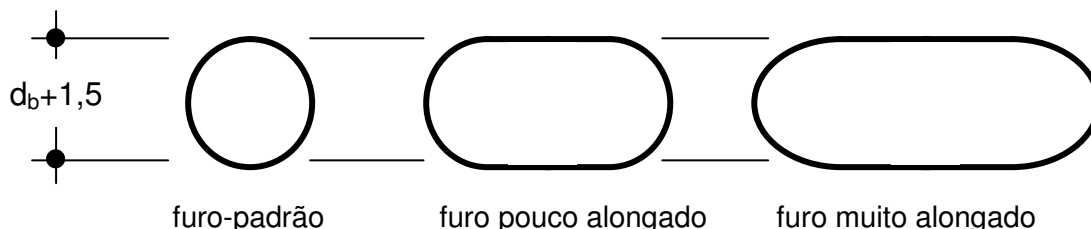
A NBR estabelece, além do que foi exposto, diversos outros procedimentos e detalhes a serem observados para execução em campo e para o controle de qualidade das ligações executadas.

4.1 Tipos de furos padronizados e distanciamento

Os tipos de furação padronizados para utilização em estruturas metálicas estão descritos na NBR 8800, sempre referidos ao chamado furo padrão, apresentado no capítulo que estudou o esforço de tração. O uso de furos com dimensões maiores que o furo padrão (furos alargados ou alongados) é interessante em situações onde a montagem das peças a serem ligadas é mais difícil. A tabela a seguir, extraída da NBR 8800 (tabela 12 da NBR), resume os tipos de furos.

Tabela 4.1 - Dimensões padronizadas de furos (mm)

	Diâmetro do parafuso ou barra rosqueada d_b	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
Dimensões em mm	≤ 24	$d_b + 1,5$	$d_b + 5$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 6)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5d_b$
	27		33	28,5x35	28,5x67,5
	≥ 30		$d_b + 8$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 9,5)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5d_b$



Os furos alargados ou alongados têm limitações de emprego definidas na tabela a seguir.

Tabela 4.2 - Limitações de emprego dos furos alargados ou alongados (tabela 13 NBR 8800)

Tipo de furo	Tipo de ligação	Limitações	
		Posição do furo	Arruelas*
Alargado	Por atrito	Em qualquer uma ou em todas as chapas da ligação	Endurecidas, sobre furos alargados em chapas externas da ligação
Pouco Alongado	Por atrito	Em qualquer uma ou em todas as chapas da ligação. Qualquer posição, independente da direção da solicitação	Sobre furos alongados em chapas externas da ligação devem ser usadas arruelas, que devem ser endurecidas quando os parafusos forem de alta resistência.
	Por contato	Em qualquer uma ou em todas as chapas da ligação. Maior dimensão normal à direção da solicitação	
Muito Alongado	Por atrito	Em qualquer uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Qualquer posição, independente da direção da solicitação	Arruelas de chapa ou barras chatas contínuas, de aço estrutural, com espessura mínima de 8mm e com furos padrão, devem ser usadas sobre furos muito alongados em chapas externas. Tais arruelas ou barras devem ter dimensões suficientes para cobrir totalmente os furos alongados após instalação dos parafusos. Quando necessário usar arruelas endurecidas, estas serão colocadas sobre aquelas arruelas de chapas ou barras contínuas.
	Por contato	Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Maior dimensão normal à direção da solicitação	

(*) Quando forem usados parafusos A490 com $d_b > 25,4\text{mm}$, em furos alongados ou alargados, devem ser usadas arruelas endurecidas (em lugar das padrão) nas chapas externas da ligação. Essas chapas devem ter espessura mínima de 8mm.

As tabelas anteriores foram colocadas com objetivo de ilustração e de alerta quanto aos detalhes que devem ser observados no projeto da ligação parafusada, para mais detalhes consultar a NBR 8800.

Distâncias mínimas:

Entre centros de furos não pode ser inferior $2,7d_b$, preferivelmente $3,0d_b$, além disso, entre bordas de furos consecutivos, não pode haver uma distância menor que d_b .

Para distâncias do centro do furo até a borda mais próxima, a tabela 14 da NBR 8800 fornece os valores mínimos, de modo simplificado, para furos padrão, pode-se adotar, $1,75.d_b$ para bordas cortadas com serra ou tesoura e $1,25.d_b$ no caso de bordas cortadas a maçarico ou laminadas.

Distâncias máximas: O espaçamento máximo entre parafusos que ligam uma chapa a um perfil não pode exceder:

- Em elementos pintados ou não sujeitos à corrosão, 24 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 300mm;
- Em elementos sujeitos à corrosão atmosférica, executados em aços resistentes à corrosão, não pintados, 14 vezes a menor espessura entre os elementos ligados, nem 180mm.

A distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada até a borda é de 12 vezes a espessura da parte ligada e não mais que 150mm.

4.2 Força resistente de cálculo dos parafusos ou nas chapas em contato direto com eles

As expressões da força resistente de cálculo para os parafusos nas diversas condições de solicitações, fornecidas pela NBR 8800 estão colocadas a seguir.

4.2.1 Tração

A força resistente de cálculo para um parafuso ou barra redonda rosqueada é dada por (NBR 8800, 6.3.3.1):

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{be} \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}}, \text{ onde}$$

f_{ub} é a resistência à ruptura do parafuso à tração, e

A_{be} é a área efetiva do parafuso ou barra rosqueada, de modo aproximado, a NBR 8800 permite que se considere esta área como sendo 75% da área bruta do parafuso (ou barra rosqueada).

$$A_{be} = 0,75 \cdot A_b, \text{ e } A_b = \pi \cdot d_b^2 / 4, \text{ com } d_b \text{ sendo o diâmetro nominal (externo) do parafuso ou barra redonda rosqueada.}$$

Para barras rosqueadas, $F_{t,Rd}$ não pode ultrapassar: $A_b \cdot f_y / \gamma_{a1}$.

Embora o dimensionamento seja aparentemente simples, quando os parafusos são tracionados, deve-se considerar também o efeito alavanca, produzido pelas deformações das partes ligadas (NBR 8800, 6.3.5). A figura a seguir, extraída da NBR 8800 ilustra essa condição.

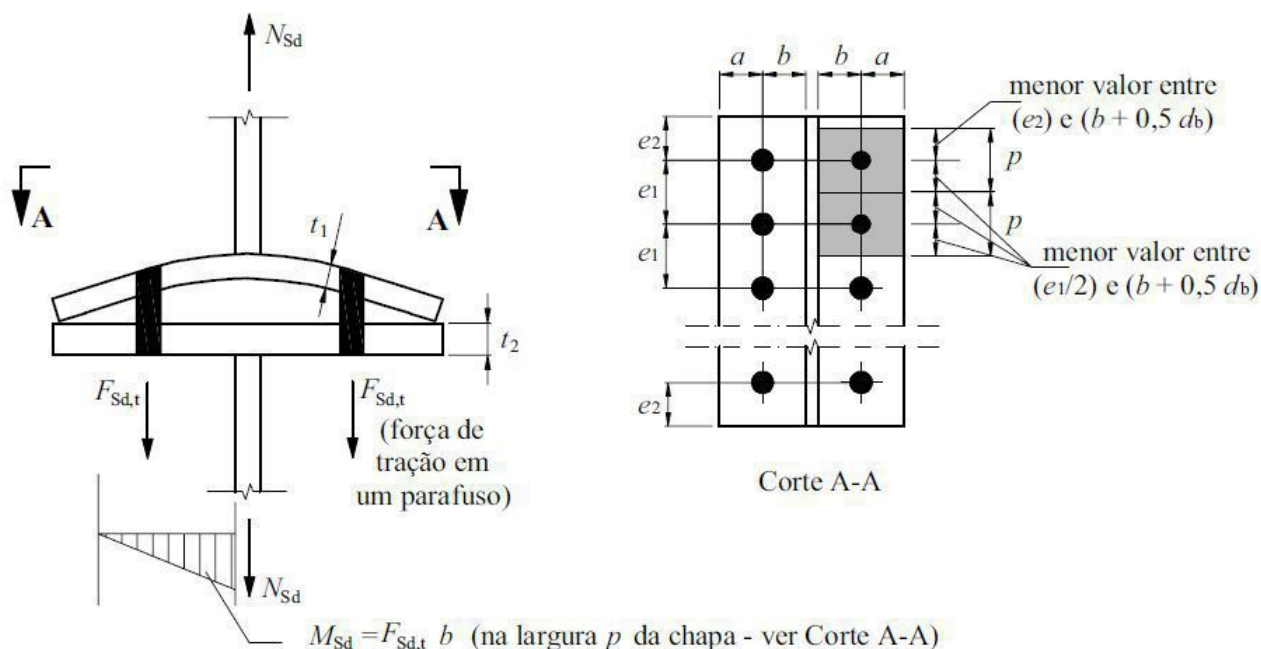


figura 7.16 – efeito alavanca.

Como pode-se observar na figura, o efeito alavanca provoca um acréscimo de força de tração nos parafusos, porém esse acréscimo é provocado pela deformação dos elementos ligados. Ou seja, o

acréscimo será menor para elementos mais rígidos. A NBR considera que o efeito alavanca foi adequadamente considerado, se ao menos uma das condições a seguir for satisfeita:

- Para a determinação das espessuras das partes ligadas (t_1 e t_2), for utilizado o momento resistente plástico ($Z.f_y$) e a força de tração resistente de cálculo dos parafusos ou barras rosqueadas for reduzida em 33%;
- Para a determinação das espessuras das partes ligadas (t_1 e t_2) for utilizado o momento resistente elástico ($W.f_y$) e a força de tração resistente de cálculo dos parafusos ou barras rosqueadas for reduzida em 25%.

Ao se calcular a espessura dos elementos ligados, deve-se tomar a força atuante em um parafuso e sua largura de influência “p”, bem como a dimensão “a” não pode ser inferior à dimensão “b” (ver figura 7.16). Deve-se observar que esse critério de dispensa da verificação conduz ao enrijecimento dos elementos componentes da ligação.

Caso não seja satisfeito o critério acima, pode-se dimensionar o parafuso para o valor aumentado da força de tração. O valor do acréscimo de força é determinado por expressões parcialmente empíricas, desenvolvidas a partir de um modelo de comportamento ajustado por resultados de ensaios. A NBR não fornece nenhuma expressão para esse acréscimo, podendo então ser utilizada a do AISC:

$$\Delta P = Q = \frac{F_{sd} \left(b - \frac{d_b}{2} \right) - \frac{p \cdot t^2}{4,44}}{a + \frac{d_b}{2}} \geq 0 \quad \text{na expressão ao lado, as convenções são as da figura 7.16.}$$

Embora a verificação da espessura mínima para não haver a necessidade de verificação desse efeito segundo a NBR 8800 esteja colocada acima, pode ser útil também a expressão dessa espessura do AISC, fornecida a seguir:

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{4,44 \cdot F_{sd} (b + 0,5 d_b)}{p \cdot f_y \left(1 + \frac{p + d_b}{p} \right)}}$$

Deve-se atentar também, que ao utilizar as ligações com protensão inicial, cujas linhas gerais foram apresentadas nas páginas 11 e 12, a força total de tração nos parafusos, considerando o acréscimo de força devido ao efeito alavanca não pode ultrapassar a protensão inicial dada ao parafuso, pois isso anularia o impedimento ao deslocamento relativo entre os elementos conectados, que é a própria razão de se aplicar a protensão aos parafusos.

Como o efeito alavanca é mobilizado pela deformação da ligação, de modo geral, em ligações de maior responsabilidade nas estruturas, é mais prudente utilizar espessuras maiores nos elementos conectados, do que verificar o atendimento ao acréscimo de esforço.

4.2.2 Cisalhamento

A condição de resistência ao cisalhamento dos parafusos é definida pela NBR 8800 por plano de corte (nas figuras 7.14 e 7.15 existe um plano de corte).

$$F_{v,Rd} = \frac{C \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}}$$

Onde o coeficiente C, vale:

- 0,4 para parafusos de alta resistência e barras rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca. Para parafusos comuns em qualquer situação;

- b) 0,5 para parafusos de alta resistência e barras rosqueadas, quando o plano de corte não passa pela rosca.

4.2.3 Pressão de contato em furos

A verificação de pressão de contato deve ser feita concomitantemente com a verificação da condição de cisalhamento do item 4.2.2.

A força resistente para cada parafuso é dada por:

$$F_{c,Rd} = \frac{C_1 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2C_1 \cdot d_b \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$$

- a) Furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força.
- Se a deformação no furo para forças de serviço for limitação de projeto, $C_1=1,2$;
 - Se a deformação no furo para forças de serviço não for limitação de projeto, $C_1=1,5$.
- b) Furos muito alongados na direção perpendicular à da força, $C_1=1,0$.

Na expressão da força resistente, l_f é a distância, medida na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre, d_b é o diâmetro do parafuso, e t é a espessura da parte ligada

4.2.4 Tração e cisalhamento

A condição de interação a ser verificada é dada por:

$$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$$

Na expressão acima $F_{v,Sd}$ é o cortante solicitante no plano do parafuso (ou barra redonda), $F_{t,Sd}$ é a força de tração solicitante. $F_{t,Rd}$ e $F_{v,Rd}$ são as resistências de cálculos aos esforços de tração e cisalhamento respectivamente.

A equação de interação genérica anterior pode ser substituída por:

Para ASTM A307	$F_{t,Sd} \leq f_{ub} \cdot A_b / \gamma_{a2} - 1,9F_{v,Sd}$;
Para ASTM A325	$F_{t,Sd} \leq f_{ub} \cdot A_b / \gamma_{a2} - 1,9F_{v,Sd}$; (a)
	$F_{t,Sd} \leq f_{ub} \cdot A_b / \gamma_{a2} - 1,5F_{v,Sd}$; (b)
Para ASTM A490	$F_{t,Sd} \leq f_{ub} \cdot A_b / \gamma_{a2} - 1,9F_{v,Sd}$; (a)
	$F_{t,Sd} \leq f_{ub} \cdot A_b / \gamma_{a2} - 1,5F_{v,Sd}$; (b)
Para barras rosqueadas	$F_{t,Sd} \leq f_{ub} \cdot A_b / \gamma_{a2} - 1,9F_{v,Sd}$;

Com f_{ub} , resistência à ruptura do parafuso. A área A_b está definida no item 4.2.1.

O plano de corte passa pela rosca (expressões “a”) ou o plano de corte não passa pela rosca (expressões “b”). Quando são utilizadas as expressões simplificadas, é obrigatória a verificação individualizada de tração e de cisalhamento como foram apresentadas nos itens anteriores.

4.2.5 Atrito

A condição de resistência para ligações por atrito depende inicialmente se o deslizamento relativo entre os elementos ligados é um estado-limite de serviço ou um estado-limite último. A NBR 8800 fornece uma indicação no item 6.3.4.2, estabelecendo que no caso de furos alargados e furos pouco alongados ou muito alongados com alongamentos paralelos à direção da força aplicada na ligação, o deslizamento deve ser considerado um estado-limite último. Já para furos padrão e para furos pouco ou muito alongados com alongamentos transversais à força aplicada, o deslizamento deve ser considerado um estado-limite de serviço.

Os parafusos de alta resistência em ligações por atrito devem ser apertados de modo a desenvolver uma força de protensão mínima. A NBR 8800 estabelece procedimentos para garantir que essa força seja obtida em campo. As forças mínimas de protensão estão na tabela reproduzida a seguir:

Tabela 4.3 – forças de protensão mínimas para parafusos de alta resistência em ligações por atrito.

Diâmetro d_b		Força de protensão F_{tb} (kN)	
pol	mm	ASTM A325	ASTM A490
1/2"		53	66
5/8"		85	106
	16	91	114
3/4"		125	156
	20	142	179
	22	176	221
7/8"		173	216
	24	205	247
1"		227	283
	27	267	334

1" 1/8		250	357
	30	326	408
1" 1/4		317	453
	36	475	595
1" 1/2		460	659

Além da verificação ao atrito, é necessário verificar a resistência às solicitações expressas nos itens 4.2.1 até 4.2.4.

4.2.5.1 Força resistente de cálculo – deslizamento como Estado Limite Último

Quando o deslizamento é um estado limite último, a força resistente de cálculo ($F_{f,Rd}$) para um parafuso é dada por:

$$F_{f,Rd} = \frac{1,13\mu C_h F_{Tb} n_s}{\gamma_c} \left(1 - \frac{F_{t,Sd}}{1,13F_{Tb}} \right) \geq F_{Sd}$$

Na expressão anterior:

F_{Sd} é a solicitação de cálculo correspondente a um parafuso;

F_{Tb} é a força de protensão do parafuso (tabela 4.3);

μ é o coeficiente de atrito (tabela 4.4);

C_h é um fator que depende do tipo de furo, vale 1,00 para furos padrão, 0,85 para furos alargados ou pouco alongados e 0,70 para furos alongados;

n_s é o número de planos de deslizamento;

γ_c vale 1,2 para combinações normais e 1,0 para combinações excepcionais;

$F_{t,Sd}$ é a força de tração solicitante de cálculo que atua no parafuso reduzindo a força de protensão do mesmo;

Tabela 4.4 – coeficientes médios de atrito.

Coeficiente de atrito (μ)	Superfícies
0,35	Superfícies classe A – laminadas, limpas, isentas de óleo ou graxas, sem pintura. Superfícies classe C – galvanizadas a quente com rugosidade aumentada manualmente por meio de escova de aço (não é permitido uso de máquinas na operação)
0,50	Superfícies classe B – jateadas sem pintura
0,20	Superfícies galvanizadas a quente

Detalhes da região sem pintura, para superfícies classes A e B, estão mostrados no item 6.3.4.3 da NBR 8800.

4.2.5.2 Força resistente de cálculo – deslizamento como Estado Limite de Serviço

No caso de deslizamento como estado limite de serviço, $F_{f,Rd}$ não deve ultrapassar a força cortante característica, calculada para combinações raras de ações, ou de modo simplificado, não ultrapassar 70% da força cortante de cálculo. A força resistente de cálculo é dada por:

$$F_{f,Rd} = 0,80\mu C_h F_{Tb} n_s \left(1 - \frac{F_{t,Sk}}{0,80F_{Tb}} \right) \geq F_{Sd}$$

Os elementos da expressão têm os mesmos significados já detalhados anteriormente, com exceção de $F_{t,Sk}$, que é a força de tração característica que atua no parafuso, reduzindo sua força de protensão. Pode ser tomada simplificada, como 70% da força de tração de cálculo.

4.2.6 Condições desfavoráveis – pega longa ou ligações de grande comprimento

- a) A pega é a espessura total de todas as chapas (elementos) ligados, somadas. Exceto no caso de ligações com protensão inicial, se a pega excede $5.d_b$ (d_b é o diâmetro do parafuso), deve-se reduzir a força resistente ao cisalhamento de parafusos ou barras rosqueadas de 1% para cada 1,5mm adicionais de pega (além dos $5d_b$).
- b) Ligações por contato com comprimento acima de 1270mm na direção da força de cisalhamento, devem ter as forças solicitantes de cálculo ao cisalhamento do parafuso e à pressão de contato na chapas multiplicadas por 1,25, para compensar efeito de distribuição não uniforme da força solicitante entre os parafusos.

4.3 Exemplos de dimensionamento de ligações parafusadas

5 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE LIGAÇÃO

Os elementos de ligação são as chapas e perfis afetados localmente pela ligação (NBR 8800, item 6.5). A NBR refere-se a esses elementos com sendo enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras, consolos, etc.. Uma vez que esses elementos existem tanto para ligações soldadas como para ligações parafusadas, as regras desse dimensionamento serão apresentadas à parte do cálculo de soldas ou parafusos, embora naturalmente se possa ver nos exemplos que o dimensionamento depende do tipo de meio de ligação.

Uma vez que a conexão dos perfis metálicos deve simular um nó da estrutura concebida no cálculo estrutural, de preferência, ao definir o conjunto de elementos que constituem uma ligação, deve-se fazer com que os eixos dos elementos se interceptem em um ponto comum. Se isso não ocorrer, deve-se considerar a excentricidade no dimensionamento da ligação.

5.1 Elementos tracionados

A força resistente de cálculo de elementos de ligação é definida de modo semelhante ao dimensionamento de outros elementos tracionados, ou seja, devem ser verificadas simultaneamente duas expressões:

a) Escoamento da seção bruta:

$$F_{Rd} = \frac{f_y \cdot A_g}{\gamma_{a1}}$$

b) Ruptura da seção líquida efetiva:

$$F_{Rd} = \frac{f_u \cdot A_e}{\gamma_{a2}}$$

Nas expressões anteriores, A_e é a seção líquida efetiva definida no estudo da tração simples. Para chapas de emendas parafusadas, pode-se utilizar:

$$A_e = A_n \leq 0,85A_g$$

5.2 Elementos comprimidos

Para elementos de ligação comprimidos, a força resistente de cálculo deve ser considerada como:

a) Quando o elemento de ligação é pouco esbelto, caso em que $KL/r \leq 25$, deve ser verificado o estado limite último de escoamento, dado por:

$$F_{Rd} = \frac{f_y \cdot A_g}{\gamma_{a1}}$$

- b) Caso a esbeltez do elemento seja superior ao limite anterior, $KL/r > 25$, deve ser verificado o estado limite de flambagem, ou seja, devem ser utilizadas as expressões do dimensionamento à compressão simples.

5.3 Elementos submetidos a cisalhamento

Quando o elemento de ligação é submetido a cisalhamento, sua força resistente de cálculo é dada pelo menor entre:

- a) Estado limite último de escoamento:

$$F_{Rd} = \frac{0,6 \cdot f_y \cdot A_g}{\gamma_{a1}}$$

- b) Estado limite último de ruptura

$$F_{Rd} = \frac{0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv}}{\gamma_{a2}}$$

Onde A_{nv} é a área líquida sujeita ao cisalhamento.

5.4 Colapso por rasgamento

A verificação do rasgamento das chapas componentes da ligação foi apresentada no item 3.1.3 da primeira parte deste capítulo.

5.5 Exemplos de dimensionamento de elementos de ligação