

Ligações Parafusadas

Tanto as ligações parafusadas quanto as ligações soldadas são utilizadas largamente nas ligações de fábrica e de campo de estruturas metálicas. É muito comum a utilização de soldas nas ligações de fábrica e de parafusos nas ligações de campo.

As vantagens da utilização de ligações parafusadas são:

- a) Rapidez de execução das ligações de campo;
- b) A mão de obra utilizada para instalação e inspeção dos parafusos não precisa ser especializada como a utilizada em ligações soldadas;
- c) O equipamento de instalação é simples e não necessita de muita energia.

Por outro lado, as desvantagens das ligações parafusadas são:

- a) Os furos enfraquecem as peças conectadas e, algumas vezes, pode ser necessário reforçar as mesmas;
- b) As ligações são mais complexas do que as ligações soldadas e exigem um trabalho maior de cálculo, detalhamento e fabricação;
- c) Necessidade de previsão antecipada para evitar falta de parafusos na obra.

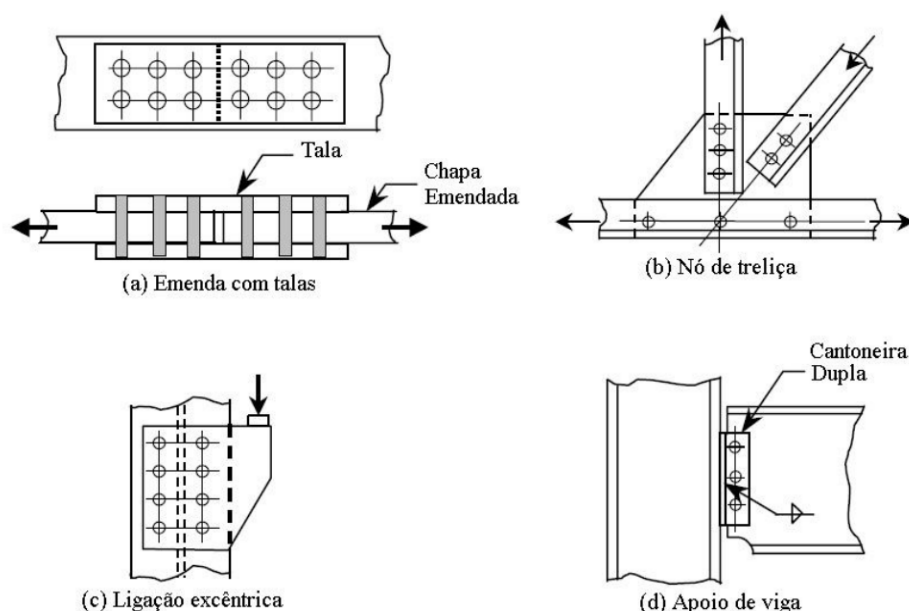


Figura 9.1: Ligações parafusadas com cortante nos parafusos.

9.1 Tipos de ligações parafusadas

As ligações parafusadas podem ser classificadas de acordo com o tipo de esforço que atua nos parafusos. Esses esforços são tração, esforço cortante e uma combinação de tração com esforço cortante. A forma com que estes esforços são introduzidos nos parafusos é bastante diversificada.

Na figura 9.1 estão representadas algumas ligações que introduzem esforço cortante nos parafusos.

A ligação (a) mostra uma emenda com tala dupla aonde o esforço de tração que chega pela chapa emendada deve ser transferido para a outra chapa. Esse esforço é transferido para os seis parafusos de metade da ligação, os quais ficam submetidos a esforço cortante. Esses parafusos transferem a carga para as duas talas da emenda, as quais ficam tracionadas. As talas por sua vez transferem o esforço de tração para os seis parafusos da outra metade da emenda, os quais transferem a carga para a outra chapa emendada. Em qualquer ligação é fundamental que o calculista entenda o fluxo das cargas para efetuar corretamente o dimensionamento dos conectores e dos componentes da ligação. Ao analisar o caso (a) percebe-se, entre outras coisas, que seis parafusos, e não doze, devem resistir a carga de tração aplicada na ligação.

A caso (b) da figura 9.1 mostra que as cargas passam dos barras para a chapa de nó, e desta para as outras barras, por meio de corte nos parafusos.

Na ligação (c) os parafusos estão submetidos a esforços de corte causados pela carga de uma viga de rolamento, a qual por ser excêntrica aumenta os esforços em alguns parafusos.

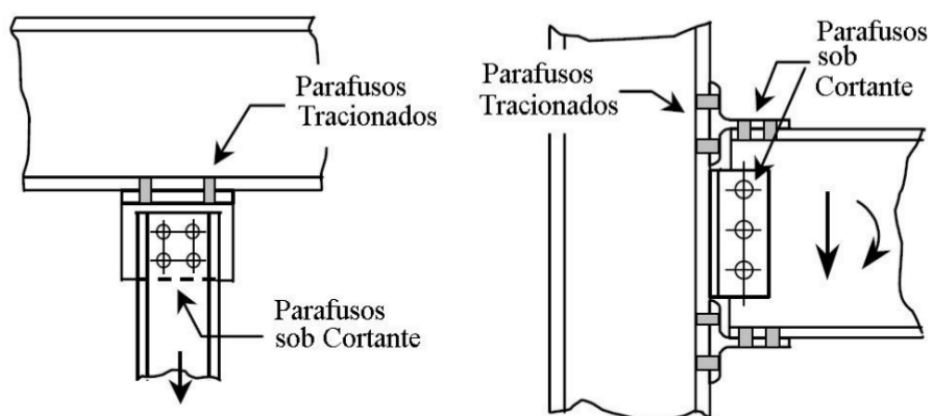


Figura 9.2: Ligações Parafusadas com parafusos tracionados.

Na figura 9.2 (a) está representada a ligação de um pendura, onde os parafusos de ligação com a mesa inferior de uma viga estão tracionados.

A figura 9.2 (b) mostra uma ligação rígida viga-coluna, que tem a capacidade de transmitir cortante e momento. Uma consideração aceitável de cálculo é que todo o cortante seja transmitido pela ligação da alma e que todo o momento seja transferido pelos flanges. Sendo assim, os parafusos da cantoneira dupla de ligação da alma estão submetidos somente a esforço cortante. O esforço no perfil T de ligação dos flanges é dado pelo binário, obtido da divisão do momento pela altura do perfil. Os parafusos de ligação do perfil T à mesa da viga estão submetidos a esforço de corte enquanto que os parafusos de ligação do perfil T com a mesa da coluna estão submetidos a esforço de tração.

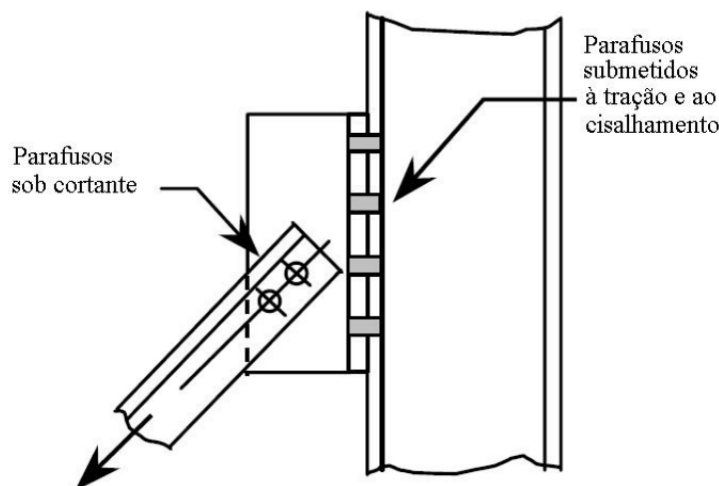


Figura 9.3: Parafusos submetidos à esforços combinados.

Na figura 9.3 está representada a chegada de uma barra de contraventamento. A componente vertical da

carga transmitida por esta barra causa cisalhamento nos parafusos de ligação do T com a mesa da coluna. A componente horizontal, por sua vez, causa tração nestes mesmos parafusos. Desta forma os parafusos de ligação do perfil T com a mesa da coluna estão submetidos simultaneamente a esforços de corte e de tração.

Para as ligações parafusadas submetidas a esforços de corte uma outra de forma de classificação é de acordo com o mecanismo de transferência entre os componentes da ligação. Neste caso as ligações com parafusos submetidos a esforços cortantes são classificadas da seguinte maneira:

Ligações por Contato: nestas ligações o esforço de corte é transmitido de um componente para outro da ligação através do contato entre o corpo do parafuso e a parede do furo.

Na figura 9.4 a) está representada uma ligação por contato, constando de apenas um parafuso.

O diagrama de corpo livre obtido quando o parafuso é cortado na interface entre as duas chapas é mostrado na figura 9.4 a).

A força na chapa P deve ser equilibrada pela força no parafuso; este é o esforço de corte no parafuso. Este esforço de corte causará uma tensão de cisalhamento no parafuso f_v que é obtida dividindo-se o esforço de corte no parafuso pela área da seção transversal do parafuso. Para que a carga P seja transferida da chapa para o parafuso é preciso que a borda do furo da chapa se apoie no corpo do parafuso (figura 9.4 a)).

A carga P é então transferida por contato, sendo chamada "carga de contato". A carga de contato gera uma tensão de contato na chapa, a qual é utilizada para verificar o esmagamento da chapa.

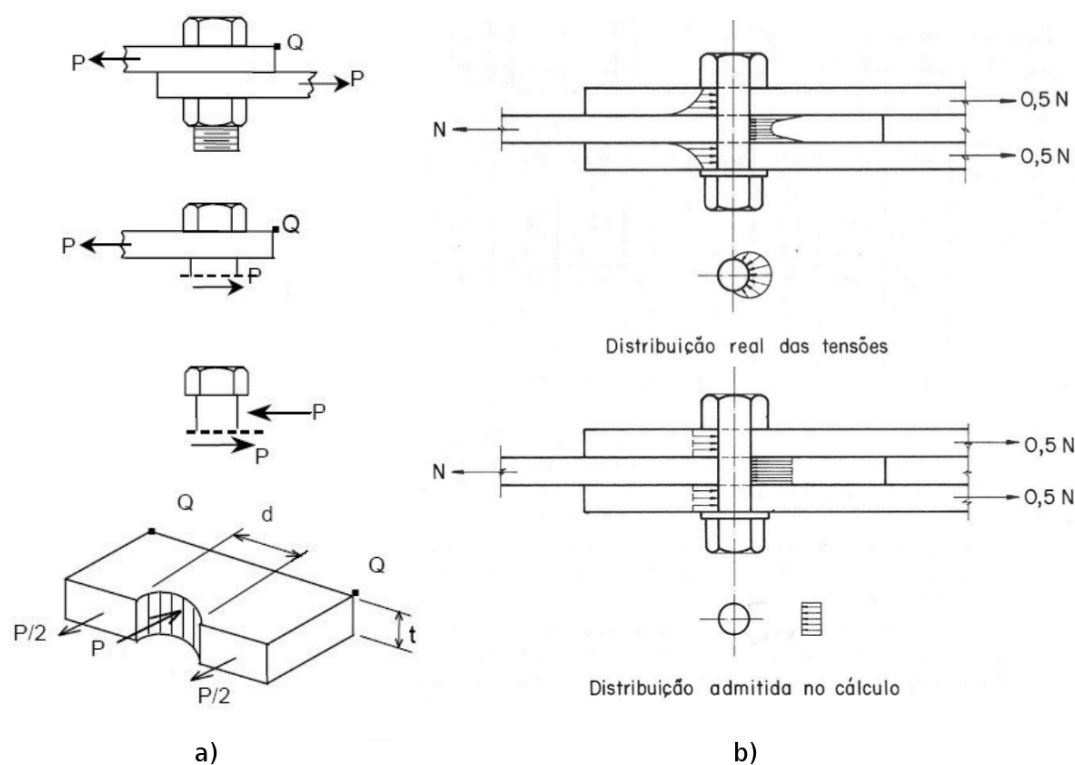


Figura 9.4: Transmissão das cargas em ligação por contato.

A distribuição real das tensões nas paredes do furo é mostrada na figura 9.4 b). Está representada a hipótese simplificada considerada no cálculo. Esta distribuição simplificada é baseada em valores obtidos em testes de ruptura e apresenta a segurança necessária para permitir a redistribuição das tensões quando estas atingem o escoamento.

A superfície de contato é chamada de plano de corte pois é neste plano que se dá o cisalhamento do parafuso. A presença da rosca no plano de corte reduz a resistência do parafuso ao cisalhamento.

Ligações por Atrito: nestas ligações os parafusos são montados com protensão de modo que se desenvolve uma elevada pressão entre as peças na superfície de contato (figura 9.5).

Cada parafuso desenvolve um cone de pressão constituído por regiões circulares das chapas, altamente comprimidas, com o parafuso no centro, altamente tracionado.

Ao tender a deslizar uma peça sobre a outra se desenvolve na superfície de contato uma tensão de atrito que impede o escorregamento das peças e garante o funcionamento da ligação.

Para garantir o coeficiente de atrito necessário entre as superfícies em contato estas devem ter um acabamento superficial de acordo com especificação da norma.

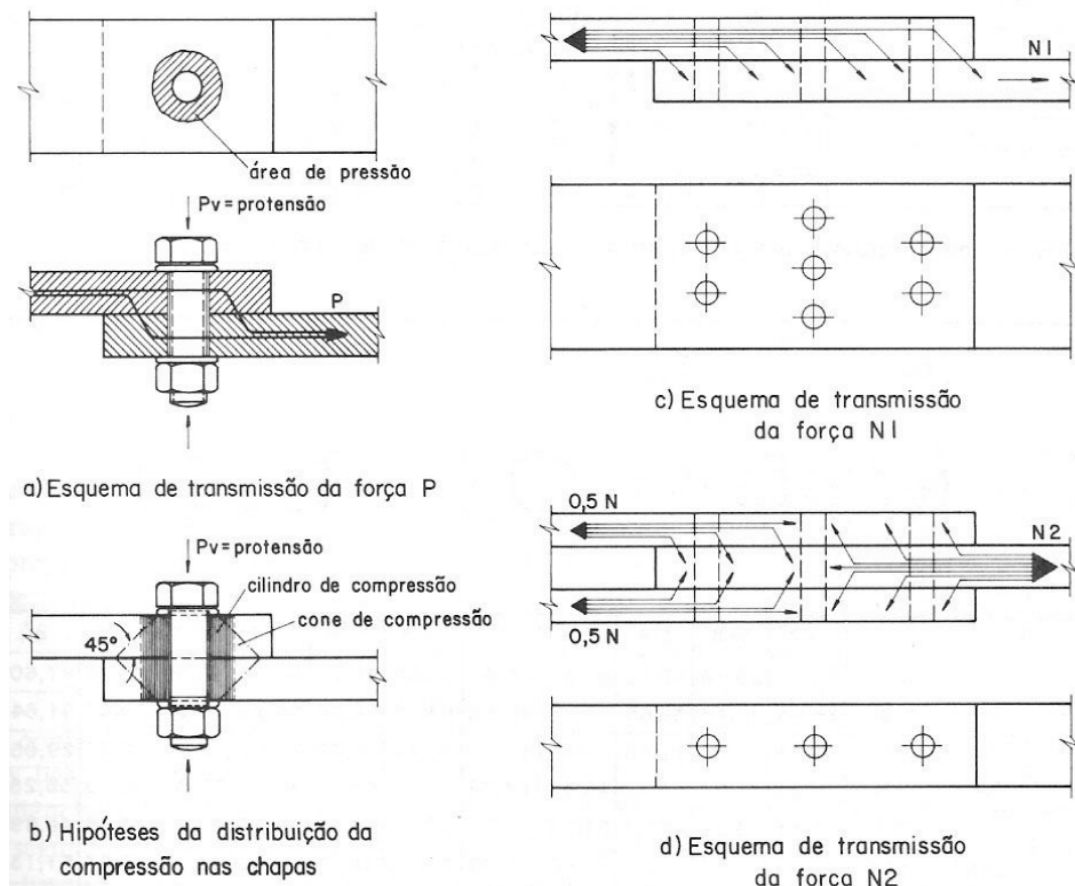


Figura 9.5: Transmissão das cargas em ligação por atrito.

As ligações por atrito são indicadas para carregamentos dinâmicos e para os casos onde o deslizamento da ligação entre as partes conectadas possa afetar o comportamento previsto para a estrutura.

As ligações por contato são indicadas para carregamentos predominantemente estáticos, onde um eventual deslizamento entre as partes conectadas não afete a vida útil dos parafusos e da própria ligação e nem o comportamento global da estrutura.

9.2 Tipos de parafusos

Os tipos de parafusos mais utilizados em estruturas metálicas são os parafusos comuns (normalmente o ASTM A307) e os parafusos de alta resistência (o ASTM A325 ou o ASTM A490).

Os parafusos de alta resistência podem necessitar de protensão na sua instalação (torque de montagem) e necessitam de cuidados especiais em relação às arruelas e às condições de acabamento das superfícies em contato das partes conectadas.

Os parafusos comuns são instalados sem necessidade de protensão e não necessitam de cuidados especiais. Entretanto a resistência destes parafusos é bem inferior à resistência dos parafusos de alta resistência.

O diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada é definido como d_b

9.2.1 Aplicabilidade dos parafusos

Os parafusos de alta resistência são utilizados em ligações de maior responsabilidade enquanto que os parafusos comuns são utilizados em ligações secundárias.

Os parafusos de alta resistência são utilizados em ligações onde atuam cargas elevadas e nas ligações principais de estruturas submetidas a cargas dinâmicas. Devem ser usados soldas ou parafusos de alta resistência com protensão inicial em ligações por contato ou por atrito nos seguintes casos:

- a) Emendas de pilares nas estruturas de andares múltiplos com mais de 40 m de altura;

- b) ligações de vigas com pilares e com quaisquer outras vigas das quais depende o sistema de contraventamento, nas estruturas com mais de 40 m de altura;
- c) ligações e emendas de treliças de cobertura, ligações de treliças com pilares, emendas de pilares, ligações de contraventamentos 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 50 kN;
- d) Ligações de peças sujeitas a ações que produzam impactos ou tensões reversas.

Os parafusos comuns são utilizados em estruturas leves, peças secundárias, plataformas, passadiços, terças, pequenas treliças, etc., em que as cargas são baixas e estáticas.

9.3 Limitações e disposições construtivas

As limitações e disposições de ligações parafusadas definem diretrizes para a furação, o tamanho da ligação e os espaçamentos entre furos.

9.3.1 Conectores longos

No caso de conectores longos, há perda de eficiência devido à flexão do conector. Por conveniência, o cálculo é feito com tensões reduzidas empiricamente, sem considerar a flexão do fuste do conector.

Denomina-se pega do conector o comprimento de seu fuste, entre as faces internas das cabeças.

Exceto nos casos dos parafusos de alta resistência montados com protensão inicial, quando o comprimento de pega excede $5d_b$, a força de cisalhamento resistente de cálculo dos parafusos ou barras redondas rosqueadas deve ser reduzida em 1 % para cada 1,5 mm adicionais de pega.

9.3.2 Ligações de grande comprimento

Em ligações por contato usadas em emendas de barras tracionadas, com comprimento superior a 1270 mm na direção da força externa, a força de cisalhamento solicitante de cálculo e a força solicitante de cálculo à pressão de contato na parede de um furo nos parafusos, respectivamente $F_{v,Sd}$ e $F_{c,Sd}$, devem ser multiplicadas por 1,25 para levar em conta a distribuição não-uniforme da força externa pelos parafusos.

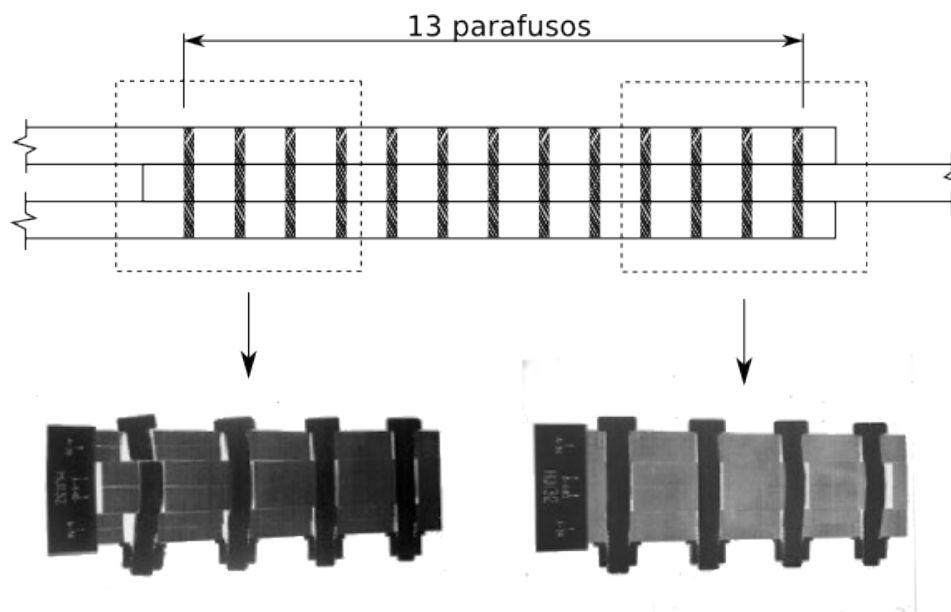


Figura 9.6: Distribuição não uniforme da força pelos parafusos.

9.3.3 Dimensões e uso de furos e arruelas

As dimensões máximas de furos devem obedecer ao indicado na tabela 9.1. No entanto, furos de maiores diâmetros podem ser usados nas placas de apoio de pilares, para levar em conta as tolerâncias de locação

de chumbadores em bases de concreto, usando-se arruelas especialmente dimensionadas para tal situação, soldadas à placa de base.

Tabela 9.1: Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas (dimensões em milímetros)

d_b	Diâmetro furo padrão	Diâmetro furo alargado	Dimensões furo pouco alongado	Dimensões furo muito alongado
≤ 24	$d_b + 1,5$	$d_b + 5,0$	$d_b + 1,5 \times d_b + 6,0$	$d_b + 1,5 \times 2,5d_b$
27	28,5	33	28,5 x 35	28,5 x 67,5
≥ 30	$d_b + 1,5$	$d_b + 8,0$	$d_b + 1,5 \times d_b + 9,5$	$d_b + 1,5 \times 2,5d_b$

Nas ligações com furos alargados ou alongados devem ser observados os tipos de ligação permitidos e as limitações indicadas abaixo.

Quando forem usados parafusos ASTM A490 de diâmetro superior a 25,4 mm, em furos alongados ou alargados, nas chapas externas da ligação, devem ser usadas arruelas endurecidas de acordo com a ASTM F436, porém de espessura mínima igual a 8 mm, em lugar das arruelas-padrão.

Limitações furo alargado:

- Ligação somente por atrito;
- Furo em qualquer uma ou em todas as chapas da ligação;
- Arruelas endurecidas, sobre furos alargados em chapas externas da ligação.

Limitações pouco alongado:

- Ligação por atrito ou por contato;
- Ligações por atrito: furo em qualquer uma ou em todas as chapas de ligação. Qualquer posição, independentemente da direção da solicitação em ligações por atrito;
Ligações por contato: em qualquer uma ou em todas as chapas de ligação. Maior dimensão normal à direção da solicitação.
- Sobre furos pouco alongados em chapas externas da ligação devem ser usadas arruelas, que devem ser endurecidas quando os parafusos forem de alta resistência.

Limitações muito alongado:

- Ligação por atrito ou por contato;
- Ligações por atrito: Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Qualquer posição, independentemente da direção da solicitação;
Ligações por contato: Em somente uma das partes da ligação, para a mesma superfície de contato. Maior dimensão normal à direção da solicitação.
- Arruelas de chapa ou barras chatas contínuas, de aço estrutural, com espessura mínima de 8 mm 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 a instalação dos parafusos. Quando for necessário usar arruelas endurecidas, estas serão colocadas sobre aquelas arruelas de chapas ou barras contínuas.

Além das exigências acima sobre as arruelas, adicionalmente devem ser usadas arruelas endurecidas nas seguintes situações:

- Sob o elemento que gira (porca ou cabeça do parafuso) durante o aperto;
- sob o elemento que não gira durante o aperto, no caso de parafusos A490, quando esse elemento assenta sobre um aço estrutural com resistência ao escoamento inferior a 280 MPa.

9.3.4 Espaçamento mínimo entre furos

A distância entre centros de furos-padrão, alargados ou alongados, não pode ser inferior a $2,7 d_b$, de preferência $3 d_b$, sendo d_b o diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada. Além desse requisito, a distância livre entre as bordas de dois furos consecutivos não pode ser inferior a d_b .

9.3.5 Espaçamento máximo entre parafusos

O espaçamento máximo entre parafusos que ligam uma chapa a um perfil ou a outra chapa, em contato contínuo, deve ser determinado como a seguir:

- Em elementos pintados ou não sujeitos à corrosão, o espaçamento não pode exceder 24 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 300 mm;
- em elementos sujeitos à corrosão atmosférica, executados com aços resistentes à corrosão, não pintados, o espaçamento não pode exceder 14 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 180 mm.

9.3.6 Distância mínima de um furo às bordas

A distância do centro de um furo-padrão a qualquer borda de uma parte ligada não pode ser inferior ao valor indicado na tabela 9.2.

No caso de furos alargados ou alongados, A distância do centro de um furo alargado ou alongado a qualquer borda de uma parte ligada não pode ser inferior ao valor indicado para furos-padrão, dado na tabela 9.2, acrescido de βd_b , sendo d_b o diâmetro do parafuso e β definido como a seguir:

$$\beta = \begin{cases} 0,0 & \text{furos alongados na direção paralela à borda considerada} \\ 0,12 & \text{furos alargados} \\ 0,20 & \text{furos pouco alongados na direção perpendicular à borda considerada} \\ 0,75 & \text{furos muito alongados na direção perpendicular à borda considerada} \end{cases} \quad (9.1)$$

Se o comprimento do furo muito alongado for inferior ao dado na tabela 9.1, o produto βd_b pode ser reduzido de uma quantia igual à metade da diferença entre o comprimento dado na tabela e o comprimento real.

Tabela 9.2: Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda, dimensões em milímetros.

d_b	Borda cortada com serra ou tesoura	Borda laminada ou cortada a maçarico
16	29	22
20	35	27
22	38	29
24	42	31
27	50	38
30	53	39
36	64	46
≥ 36	$1,75d_b$	$1,25d_b$

São permitidas distâncias inferiores às dessa tabela, desde que a pressão de contato em furos seja satisfeita.

No caso de borda laminada ou cortada a maçarico as distâncias podem ser reduzidas de 3 mm, quando o furo está em um ponto onde a força solicitante de cálculo não exceda 25 % da força resistente de cálculo.

9.3.7 Distância máxima de um parafuso ou barra rosqueada às bordas

Para qualquer borda de uma parte ligada, a distância do centro do parafuso, ou barra redonda rosqueada, mais próximo até essa borda não pode exceder a 12 vezes a espessura da parte ligada considerada, nem 150 mm.

9.3.8 Região mínima sem pintura para ligações por atrito

A região mínima das superfícies classes A e B em contato que deve ficar sem pintura é mostrada esquematicamente na figura 9.7.

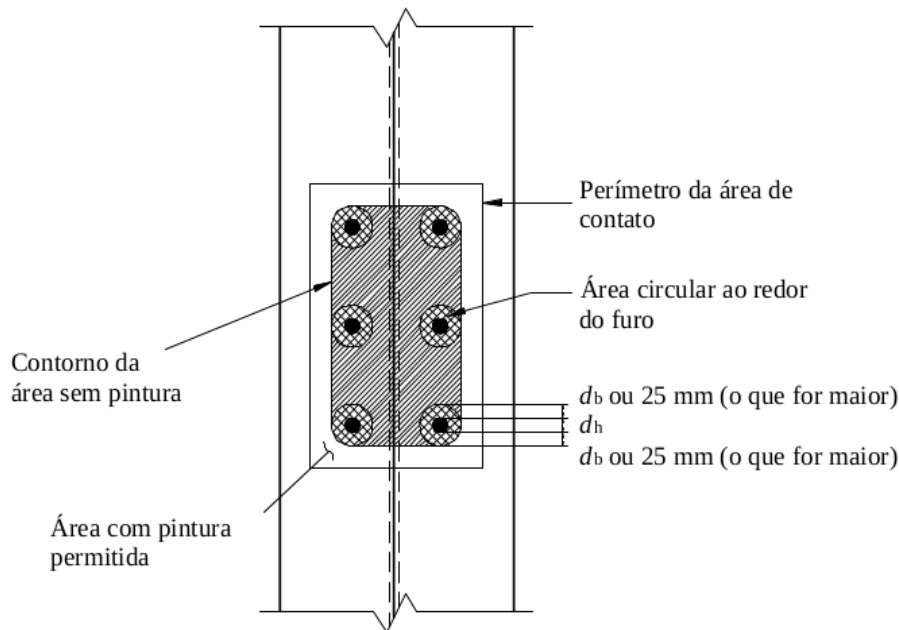


Figura 9.7: Superfícies em contato sem pintura.

9.4 Condições de segurança para ligações

A resistência de uma ligação parafusada depende da natureza da ligação. Devem ser verificadas as condições limites de parafusos e dos elementos de ligação.

9.4.1 Condições de segurança de ligações por contato

A resistência total de uma ligação por contato considera a verificação das condições de segurança nos parafusos, cisalhamento e/ou tração, o que for aplicável, e também da verificação da condição de contato desse parafuso com a borda do furo quando a ligação estiver cisalhando o parafuso.

As condições de segurança que devem ser verificadas em uma ligação por contato depende da natureza da solicitação sobre a ligação.

Ligação por contato submetida a tração

Para uma ligação submetida a tração deve ser verificada a seguinte condição:

$$F_{t,Rd} \geq F_{t,Sd} \quad (9.2)$$

$F_{t,Sd}$ é a força de tração solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada¹;

$F_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada;

Ligação por contato submetida ao cisalhamento

Para uma ligação submetida ao cisalhamento devem ser verificadas as seguintes condições:

$$F_{v,Rd} \geq F_{v,Sd} \quad (9.3)$$

$$F_{c,Rd} \geq F_{c,Sd} \quad (9.4)$$

na qual:

¹Deve-se acrescentar a força de tração solicitante de cálculo o valor da resultante do efeito alavanca quando for o caso.

$F_{v,Sd}$ é a força de cisalhamento solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada;

$F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada;

$F_{c,Rd}$ é a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo por furo;

$F_{c,Sd}$ é a força solicitante de cálculo de cisalhamento por parafuso da ligação;

9.4.2 Condições de segurança de ligações por atrito

A resistência total de uma ligação por atrito considera a verificação das condições de segurança nos parafusos, cisalhamento e/ou tração, o que for aplicável, da verificação da condição de deslizamento entre as partes ligadas no caso de ligação com cisalhamento e também da verificação como uma ligação por contato, caso o atrito entre as partes falhe.

A condição de segurança de ligações por atrito também depende da natureza da solicitação sobre a ligação.

Ligação por atrito submetida a tração

Para uma ligação submetida a tração deve ser verificada a seguinte condição:

$$F_{t,Rd} \geq F_{t,Sd} \quad (9.5)$$

$F_{t,Sd}$ é a força de tração solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada²;

$F_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada;

Ligação por atrito submetida ao cisalhamento

Para uma ligação submetida ao cisalhamento devem ser verificadas as seguintes condições:

$$F_{f,Rd} \geq F_{f,Sd} \quad (9.6)$$

$$F_{v,Rd} \geq F_{v,Sd} \quad (9.7)$$

$$F_{c,Rd} \geq F_{c,Sd} \quad (9.8)$$

na qual:

$F_{f,Rd}$ a força resistente de cálculo da região de um parafuso ao deslizamento;

$F_{f,Sd}$ é a força solicitante de cálculo de cisalhamento por parafuso da ligação;

$F_{v,Sd}$ é a força de cisalhamento solicitante de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada;

$F_{v,Rd}$ é a força de cisalhamento resistente de cálculo por parafuso ou barra redonda rosqueada;

$F_{c,Rd}$ é a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo por furo;

$F_{c,Sd}$ é a força solicitante de cálculo de cisalhamento por parafuso da ligação;

9.5 Resistências

O cálculo dos valores das resistências definidas para a verificação das condições de segurança nas ligações é definido a seguir.

9.5.1 Resistências dos parafusos

As resistências necessárias para as verificações dos parafusos são dadas quando o mesmo está solicitado ao cisalhamento e/ou a tração.

²Deve-se acrescentar a força de tração solicitante de cálculo o valor da resultante do efeito alavanca quando for o caso.

Resistência de um parafuso ao cisalhamento

A força de cisalhamento resistente de cálculo de um parafuso ou barra redonda rosqueada é, por plano de corte, igual a:

$$F_{v,Rd} = \frac{C_{pc} A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (9.9)$$

na qual:

f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso ou barra redonda rosqueada à tração;

A_b é a área bruta de um parafuso, baseada no diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada, d_b , que vale $A_b = 0,25\pi d_b^2$;

C_{pc} é um coeficiente que depende de onde passa o plano de corte no parafuso e do tipo do parafuso.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação, $C_{pc} = 0,4$.

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte não passa pela rosca, $C_{pc} = 0,5$

Resistência de um parafuso a tração

A força de tração resistente de cálculo de um parafuso tracionado é dada por:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,75 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (9.10)$$

na qual:

f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso ou barra redonda rosqueada à tração;

A_b é a área bruta de um parafuso.

No caso de barras redondas rosqueadas:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,75 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{A_b f_y}{\gamma_{a1}} \quad (9.11)$$

9.5.2 Resistência à pressão de contato do parafuso com a borda do furo

A força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo, já levando em conta o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo extremo e a borda, é dada por:

$$F_{c,Rd} = \frac{C_{pl} \ell_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{C_{fp} d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \quad (9.12)$$

onde:

ℓ_f é a distância, 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;

t é a espessura da parte ligada;

f_u é a resistência à ruptura do aço da parede do furo;

C_{pl} é um coeficiente de resistência da parte ligada função do tipo do furo e da condição da ligação em relação ao estado limite de serviço;

C_{fp} é um coeficiente de resistência do fuste do parafuso função do tipo do furo e da condição da ligação em relação ao estado limite de serviço.

Os valores do coeficiente de resistência da parte ligada, C_{pl} , e do coeficiente de resistência do fuste do parafuso, C_{fp} , são os seguintes:

$C_{pl} = 1,2$ e $C_{fp} = 2,4$ no caso de furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força e quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto;

$C_{pl} = 1,5$ e $C_{fp} = 3,0$ no caso de furos-padrão, furos alargados, furos pouco alongados em qualquer direção e furos muito alongados na direção da força e quando a deformação no furo para forças de serviço não for uma limitação de projeto;

$C_{pl} = 1,0$ e $C_{fp} = 2,0$ no caso de furos muitos alongados na direção perpendicular à da força.

9.5.3 Resistência ao deslizamento na região de um parafuso

O projeto de ligações por atrito com parafusos de alta resistência precisa levar em conta se o deslizamento é um estado limite de serviço ou um estado limite último.

Nas ligações com furos alargados e furos pouco alongados ou muito alongados com alongamentos paralelos à direção da força aplicada, o deslizamento deve ser considerado estado limite último.

Nas ligações com furos-padrão e furos pouco alongados ou muito alongados com alongamentos transversais à direção da força aplicada, o deslizamento deve ser considerado estado limite de serviço.

Deslizamento é um estado limite último

Nas situações em que o deslizamento é um estado limite último, a força resistente de cálculo de um parafuso ao deslizamento, $F_{f,Rd}$, deve ser igual ou superior à força cortante solicitante de cálculo no parafuso, calculada com as combinações últimas de ações. O valor da força resistente de cálculo é dado por:

$$F_{f,Rd} = \frac{1,13\mu C_h F_{Tb} n_s}{\gamma_e} \left(1 - \frac{F_{t,Sd}}{1,13 F_{Tb}} \right) \quad (9.13)$$

sendo:

μ é o coeficiente médio de atrito, definido a seguir:

$\mu = 0,35$ para superfícies classe A, isto é, superfícies laminadas, limpas, isentas de óleos ou graxas, sem pintura, e para superfícies classe C, isto é, superfícies galvanizadas a quente com rugosidade aumentada manualmente por meio de escova de aço (não é permitido o uso de máquinas);

$\mu = 0,50$ para superfícies classe B, isto é, superfícies jateadas sem pintura;

$\mu = 0,20$ para superfícies galvanizadas a quente.

C_h é um fator de furo, igual a:

$C_h = 1,00$ para furos-padrão;

$C_h = 0,85$ para furos alargados ou pouco alongados;

$C_h = 0,70$ para furos muito alongados.

F_{Tb} é a força de protensão mínima por parafuso, conforme tabela 9.3;

n_s é o número de planos de deslizamento;

γ_e é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,20 para combinações normais, especiais ou de construção e 1,00 para combinações excepcionais;

$F_{t,Sd}$ é a força de tração solicitante de cálculo por parafuso, caso exista³. Se não existir deve ser considerada como zero;

³Deve-se acrescentar a força de tração solicitante de cálculo o valor da resultante do efeito alavanca quando for o caso.

Deslizamento é um estado limite de serviço

Nas situações em que o deslizamento é um estado limite de serviço, a força resistente nominal de um parafuso ao deslizamento, $F_{f,Rk}$, deve ser igual ou superior à força cortante solicitante característica, calculada com as combinações de ações raras de serviço, ou, simplificada, tomada igual a 70 % da força cortante solicitante de cálculo. O valor da força resistente nominal é dado por:

$$F_{f,Rk} = 0,8\mu C_h F_{Tbn_s} \left(1 - \frac{F_{t,Sk}}{0,80 F_{Tb}} \right) \quad (9.14)$$

sendo:

$F_{t,Sk}$ é a força de tração solicitante característica no parafuso, calculada com as combinações de ações raras de serviço, ou, simplificada, tomada igual a 70 % da força de tração solicitante de cálculo.

Todas as considerações feitas relacionadas a acabamento de superfície permanecem válidas.

Tabela 9.3: Força de protensão mínima em parafusos ASTM.

d_b	A325 F_{Tb} [kN]	A490 F_{Tb} [kN]
16	91	114
20	142	179
22	176	221
24	205	257
27	267	334
30	326	408
36	475	595

9.6 Efeito alavanca

Na determinação da força de tração solicitante de cálculo em parafusos e barras redondas rosqueadas, deve-se levar em conta o efeito de alavanca, produzido pelas deformações das partes ligadas, figura 9.8.

Caso não se façam análises mais rigorosas, pode-se considerar que o efeito de alavanca tenha sido adequadamente considerado se for atendida pelo menos uma das exigências a seguir:

- Na determinação das espessuras das chapas das partes ligadas (t_1 e t_2 - ver figura ??), for empregado o momento resistente plástico ($M_{pl} = Z f_y$) e a força de tração resistente de cálculo dos parafusos ou barras redondas rosqueadas for reduzida em 33 %;
- Na determinação das espessuras das chapas das partes ligadas (t_1 e t_2 - ver figura ??), for empregado o momento resistente elástico ($M_e = W f_y$) e a força de tração resistente de cálculo dos parafusos ou barras redondas rosqueadas for reduzida em 25 %.

Quando uma carga de tração centrada é aplicada num grupo de parafusos pode ocorrer que a carga em cada parafuso seja maior do que a carga dividida pelo número de parafusos. Isto ocorre porque a deformação dos elementos de ligação pode produzir esforços internos que se somam à carga aplicada em cada parafuso. Seja o caso do perfil T da figura 9.8 b), o qual é um componente da ligação da figura 9.8 a): se a ligação da mesa do perfil T com a mesa da coluna é feita por meio de quatro parafusos é de se esperar que a carga por parafuso seja igual a $P/4$. Entretanto, devido à deformação das partes conectadas, a carga em cada parafuso pode ser significativamente maior.

A figura 9.9 mostra o perfil T deformado sob a ação da carga P. Percebe-se que a mesa do perfil T atua como uma alavanca nos parafusos. Este efeito é chamado de Efeito de Alavanca (prying action). Se o flange do perfil T é muito rígido este efeito não ocorre, porém se o flange for relativamente flexível o esforço no parafuso pode aumentar consideravelmente.

Além da rigidez do flange outros fatores afetam o efeito de alavanca no parafuso, dentre os quais destacam-se a capacidade de deformação do parafuso e a posição do parafuso na mesa do perfil T (dimensões a e b na figura 9.8 b).

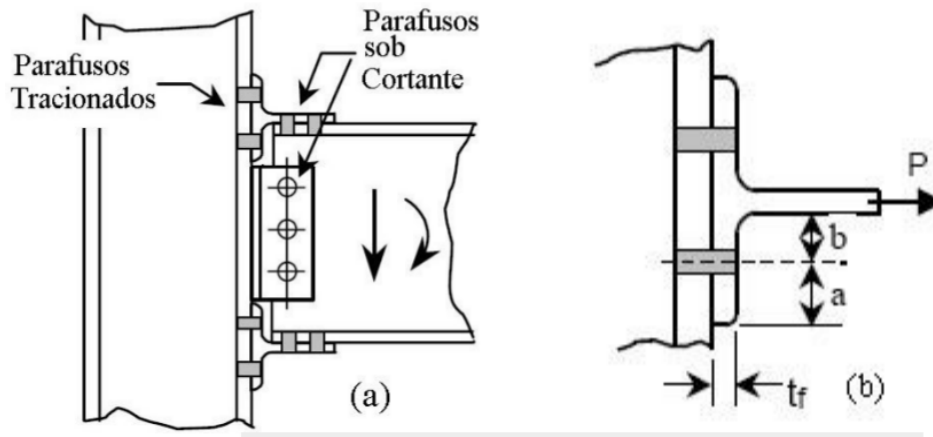


Figura 9.8: Ligação de um perfil T com a mesa de uma coluna.

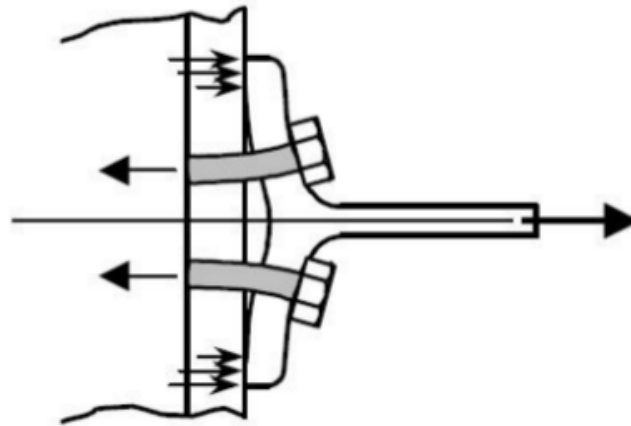


Figura 9.9: Perfil T deformado sob a ação de carga.

Na figura 9.10 está representada a geometria do modelo de cálculo do efeito de alavanca adotado pelo AISC. A dimensão b deve ser tão pequena quanto possível (normalmente o suficiente para entrar a chave de porca) para minimizar a força de alavanca Q .

A carga final em cada parafuso, $F_{t,Sd}$ considerando-se o efeito alavanca é dada por:

$$F_{t,Sd} = \frac{N_{t,Sd}}{n_p} \left[1 + \frac{\alpha \delta}{(1 + \alpha \delta)} \frac{b}{a} \right] \quad (9.15)$$

na qual:

$N_{t,Sd}$ é a solicitação de tração da ligação de cálculo;

n_p é o número de parafusos tracionados na ligação;

α é a relação entre o momento gerado pelo efeito alavanca no parafuso, M_2 , e o momento gerado pelo efeito alavanca na face da alma do perfil, M_1 :

$$\alpha = \frac{M_2}{M_1}$$

δ é a relação entre a área líquida do perfil, calculada de acordo com 4.3.1, e a área bruta, e vale:

$$\delta = \frac{A_e}{A_g}$$

a e b são as distâncias dadas na figura 9.11.

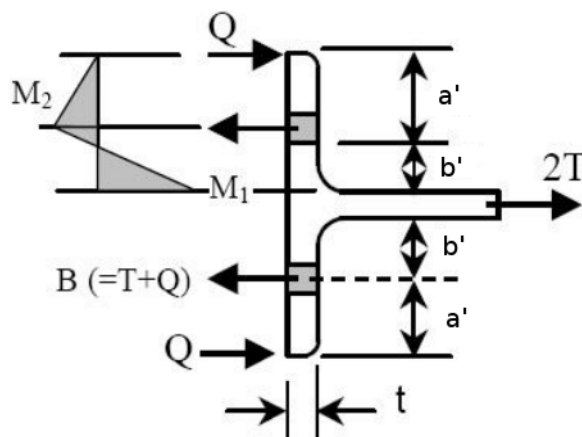


Figura 9.10: Nomenclatura para Efeito de Alavanca.

Adicionalmente, a dimensão a não pode ser inferior à dimensão b (figura 9.11).

A determinação da resistência da ligação requer o conhecimento de α , que identifica a relação entre M_1 e M_2 .

Se $\alpha = 1,0$ então há rótulas plásticas nos pontos onde ocorrem M_1 e em M_2 , e a força de alavanca é máxima. Esse valor pode ser adotado à favor da segurança.

Se $\alpha = 0,0$ não existe efeito de alavanca.

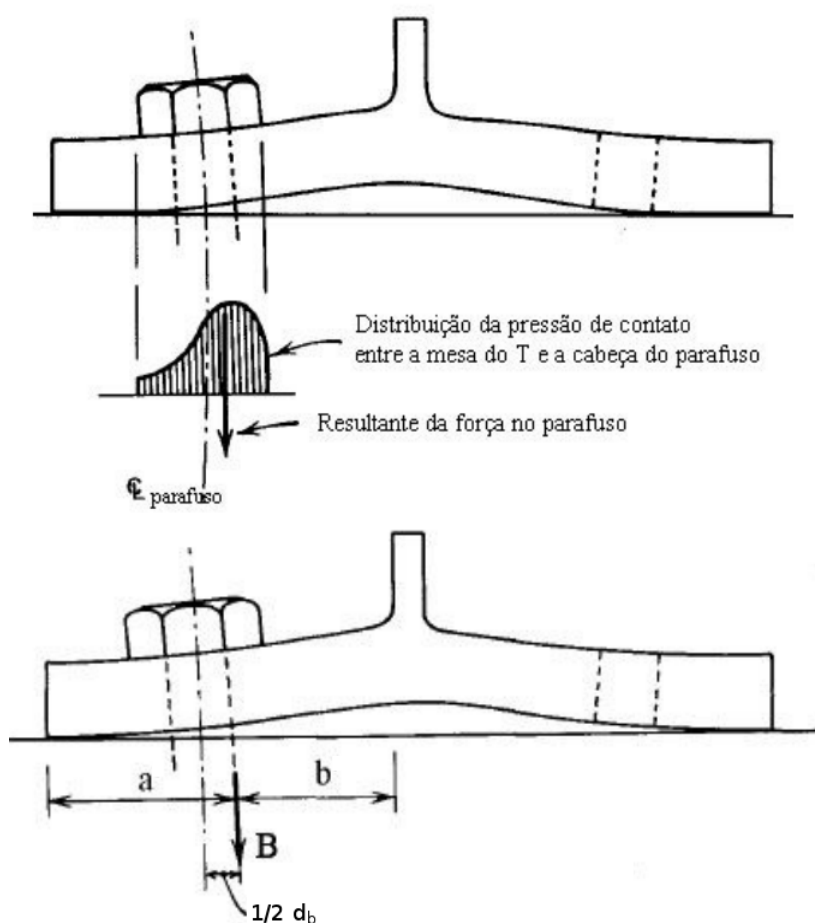


Figura 9.11: Influência da deformação do flange na locação da resultante da força no parafuso.

9.7 Colapso por rasgamento

Para o estado limite de colapso por rasgamento, a força resistente é determinada pela soma das forças resistentes ao cisalhamento de uma ou mais linhas de falha e à tração em um segmento perpendicular. Esse estado limite deve ser verificado junto a ligações em extremidades de vigas com a mesa recortada para encaixe e em situações similares, tais como em barras tracionadas e chapas de nó (algumas situações típicas são mostradas na figura 10.21). A força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento é dada por:

$$F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}}(0,6f_uA_{nv} + C_{ts}f_uA_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}}(0,6f_yA_{gv} + C_{ts}f_uA_{nt}) \leq F_{Sd} \quad (9.16)$$

na qual:

A_{nv} é a área líquida sujeita a cisalhamento, determinada de acordo com 4.3.1;

A_{nt} é a área líquida sujeita à tração, determinada de acordo com 4.3.1;

A_{gv} é a área bruta sujeita a cisalhamento;

C_{ts} é igual a 1,0 quando a tensão de tração na área líquida for uniforme, e igual a 0,5 quando for não-uniforme.