



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E GEOTÉCNICA

CORTE PURO

HENRIQUE LINDENBERG NETO

2016

Agradecimentos

Apresento os meus agradecimentos ao aluno Pedro César Leão Santos, monitor da disciplina PEF-3301 Resistência dos Materiais e Estática das Construções I, pela digitação, composição e elaboração das figuras deste texto, feitas com muita seriedade e esmero.

Agradeço também os meus colegas Edgard Sant'Anna de Almeida Neto e Henrique de Britto Costa pela revisão do texto e das figuras.

São Paulo, setembro de 2016

Henrique Lindenberg Neto

CORTE PURO

Neste capítulo estuda-se o corte puro, solicitação que se verifica em alguns elementos estruturais particulares, dentre os quais se destacam as ligações de peças estruturais por meio de rebites, parafusos, soldas, chavetas, etc.

Para facilitar a compreensão do que é o corte puro, vai-se introduzi-lo por meio de um exemplo:

EXEMPLO 1

Dimensionar a ligação apresentada na Fig. 1, em que duas chapas tracionadas – chapas 1 e 2 – são unidas por meio de um rebite.

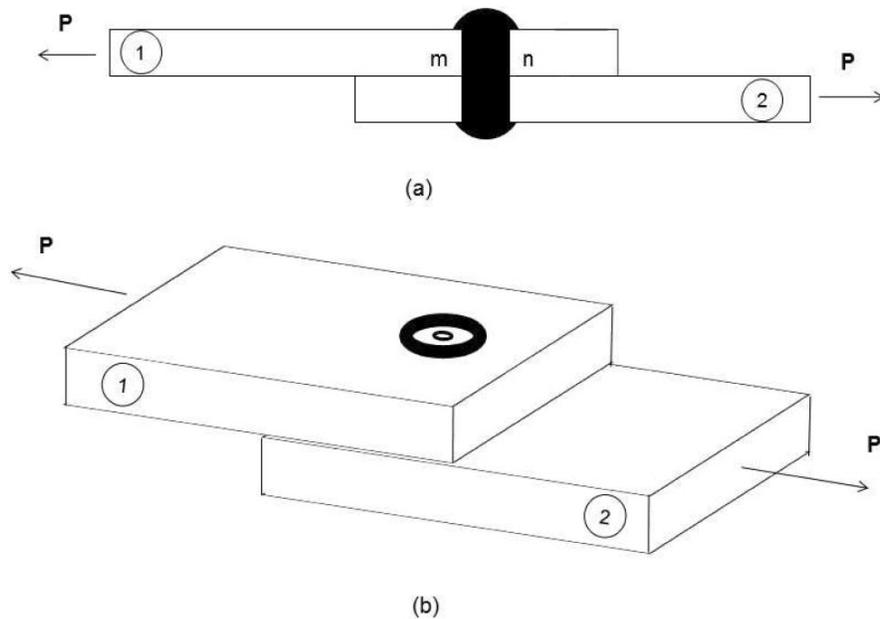


Figura 1

Essa ligação pode se romper de diversas maneiras e o seu dimensionamento deve ser feito de modo que ela apresente segurança com relação a todas estas formas de ruptura.

Devem-se fazer, portanto, diversas verificações de segurança.

A primeira verificação que será feita aqui, a das tensões de cisalhamento no rebite, é a relacionada ao corte puro.

a) Verificação da tensão de cisalhamento no rebite

Como funciona a ligação da Fig. 1?

Caso não existisse o rebite unindo as duas chapas, como indicado na Fig. 2 (a), a aplicação de uma força externa em uma das chapas, por exemplo, na chapa 2, faria com que essa chapa se

deslocasse para a direita, escorregando sob a chapa 1 (Fig. 2 (b)), não se dando, nesse caso, a ligação das duas chapas.

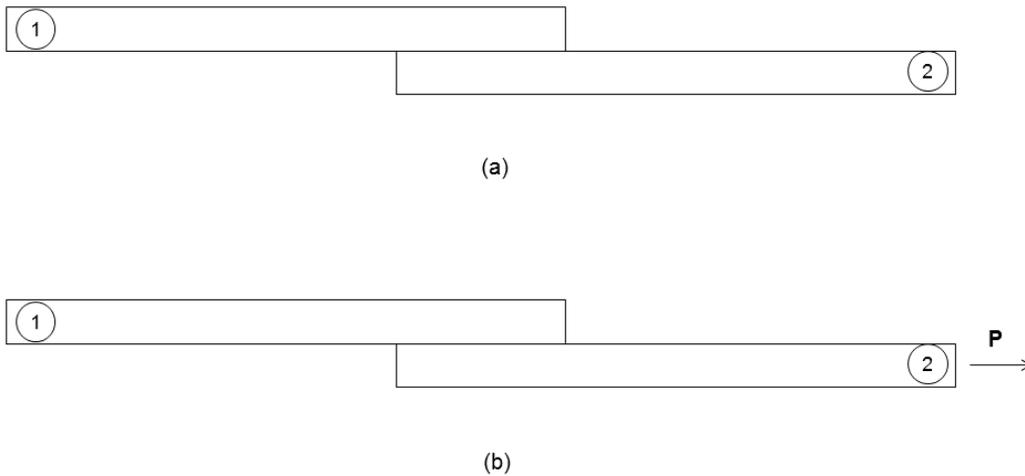


Figura 2

Existindo o rebite, ocorre a efetiva ligação das chapas, pois ele impede o escorregamento de uma chapa em relação à outra.

É bastante intuitivo que, ao aumentar o valor das forças P aplicadas às chapas da ligação da Fig. 1, o rebite acabará por se romper na seção localizada na interface entre as duas chapas, ocorrendo o deslizamento de uma chapa em relação à outra, desfazendo-se assim a ligação (Fig. 3).

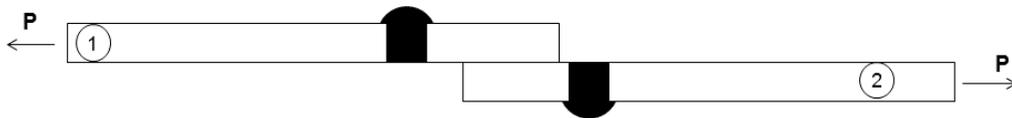


Figura 3

Dá-se o nome de corte puro à solicitação que se tem na seção do rebite em que se dá sua ruptura – a seção $m-n$ da Fig. 1 (a).

Como se observa na Fig. 3, a ruptura se dá pelo fato de ter ocorrido o corte do rebite segundo a seção $m-n$.

É isso que caracteriza o corte puro: ele é a solicitação que tende a produzir o corte da barra, que tende a fazer com que uma das partes da barra escorregue sobre a outra no plano de uma das seções transversais.

Essa é a origem do nome “corte puro”. Existe a tendência de se cortar a barra na seção em que ele se dá.

Tem-se corte puro na seção $m-n$ por dois motivos: pela geometria da ligação e pelos esforços que atuam nas chapas. É a particular combinação de forma e carregamento verificada na ligação da Fig. 1 que leva ao corte puro na seção $m-n$.

Toda vez que se tiver uma geometria e um carregamento tais que haja a tendência de se ter o corte puro e simples de uma barra segundo uma de suas seções transversais, haverá corte puro nessa particular seção.

Estas ideias serão melhor esclarecidas pelos demais exemplos que serão apresentados adiante.

Na Fig. 4 mostra-se a ligação da Fig. 1 separada em duas partes por meio de um corte segundo a seção $m-n$ do rebite, verificando-se que nessa seção se tem uma força cortante de intensidade P .

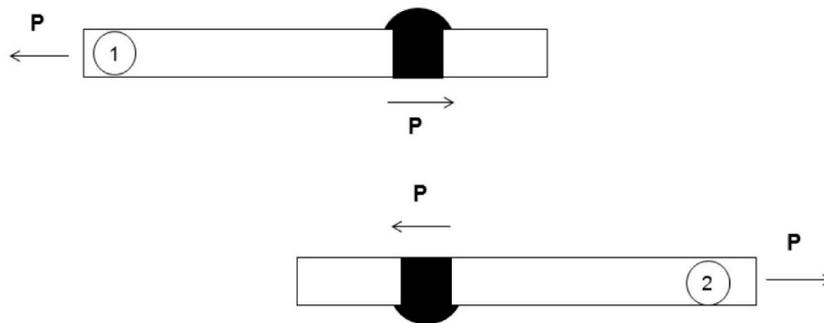


Figura 4

Essa força cortante é o esforço responsável pelo corte puro na seção $m-n$, fazendo com que uma parte do rebite tenda a escorregar sobre a outra.

Admite-se, na Resistência dos Materiais, que todos os pontos da seção $m-n$ colaboram igualmente na transferência dos esforços horizontais, ou seja, admite-se que as tensões de cisalhamento na seção transversal $m-n$ sejam constantes, iguais portanto a:

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (1)$$

onde d é o diâmetro do rebite.

Essas tensões de cisalhamento na seção $m-n$ do rebite estão indicadas na Fig. 5.

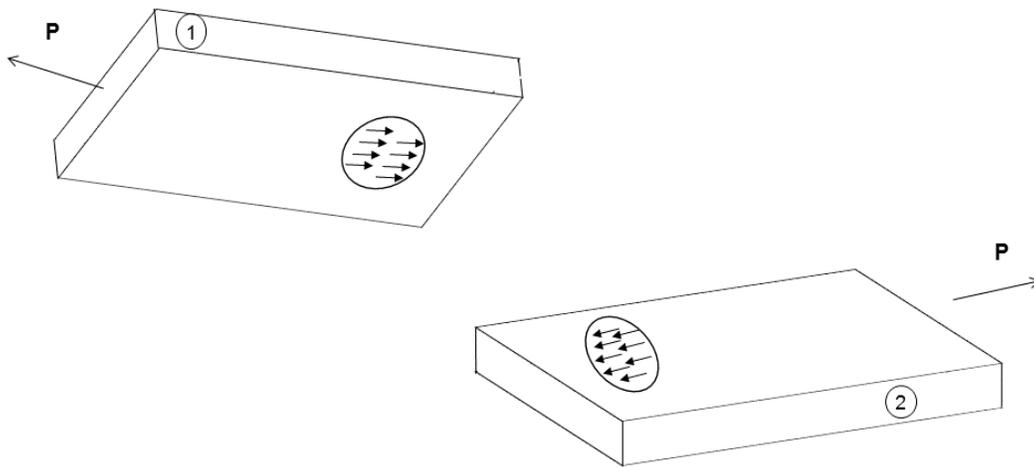


Figura 5

Quando as tensões de cisalhamento no rebite atingem o valor da tensão de ruptura ao cisalhamento do material que o constitui, sobrevém a ruptura do rebite e, conseqüentemente, da ligação.

Talvez nesta parte do capítulo, o leitor esteja colocando em dúvida algumas considerações feitas, por julgar que elas não traduzem fielmente o real comportamento da ligação estudada.

Tem razão o leitor que não se encontra totalmente satisfeito.

Reexaminando a ligação da Fig. 1, verifica-se claramente que ela não está em equilíbrio, pois as forças de tração que atuam nas chapas constituem um binário, cujo momento não se encontra equilibrado.

Esse binário provoca uma rotação da ligação, em decorrência da qual surgem nas chapas forças cortantes e momentos fletores. O equilíbrio do conjunto sobrevém quando o momento das forças de tração é equilibrado pelo momento das forças cortantes e dos momentos fletores.

A configuração de equilíbrio da ligação está mostrada na Fig. 6.

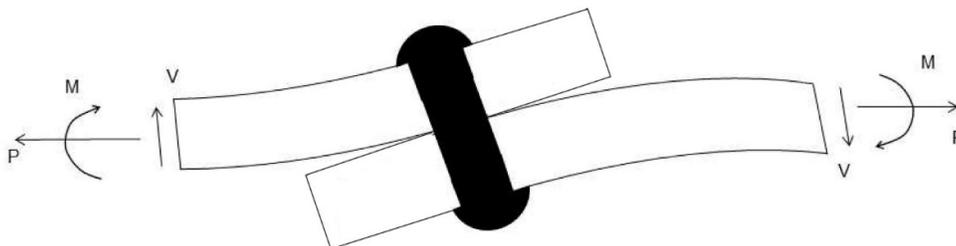


Figura 6

Observa-se que, na seção $m-n$ em que se dá a ruptura do rebite, tem-se, além da força P indicada na Fig. 4, a força V , como se mostra na Fig. 7. Tem-se então na seção de ruptura força cortante e força normal.

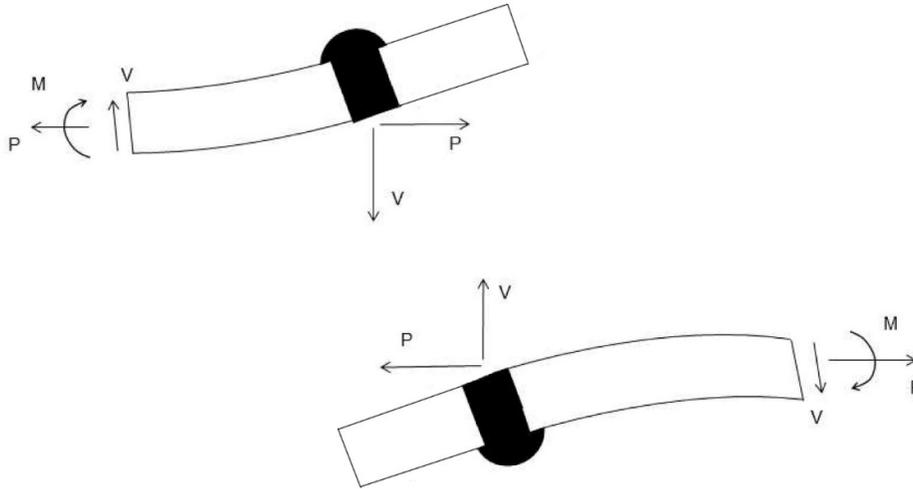


Figura 7

O estudo da ligação real é ainda mais complexo. Na Fig. 8 cada um dos elementos da ligação é apresentado isoladamente.

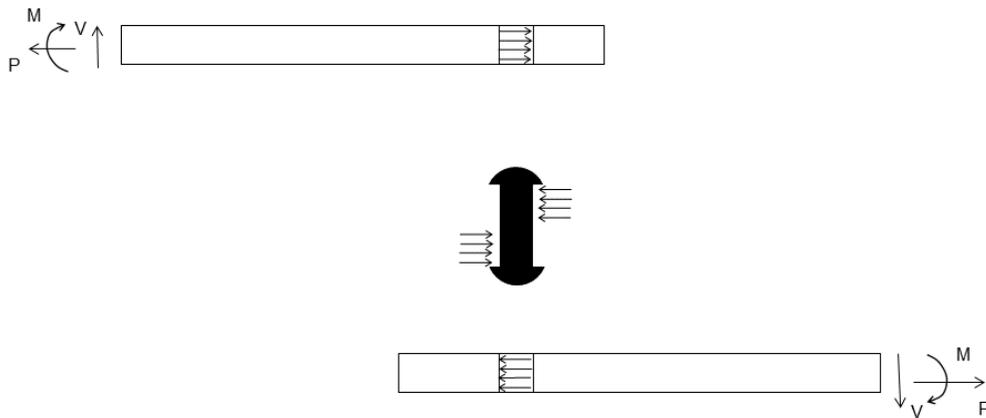


Figura 8

Estão indicados nesta figura os esforços que o rebite aplica nas chapas nas superfícies semicilíndricas de contato entre eles; também estão indicados os esforços que as chapas aplicam no rebite nessas mesmas superfícies de contato entre eles.

Observa-se que os esforços aplicados no rebite constituem um binário, que não se encontra equilibrado. Os esforços que equilibram esse binário são os esforços introduzidos nas cabeças dos rebites pelas chapas, como se mostra na Fig. 9.

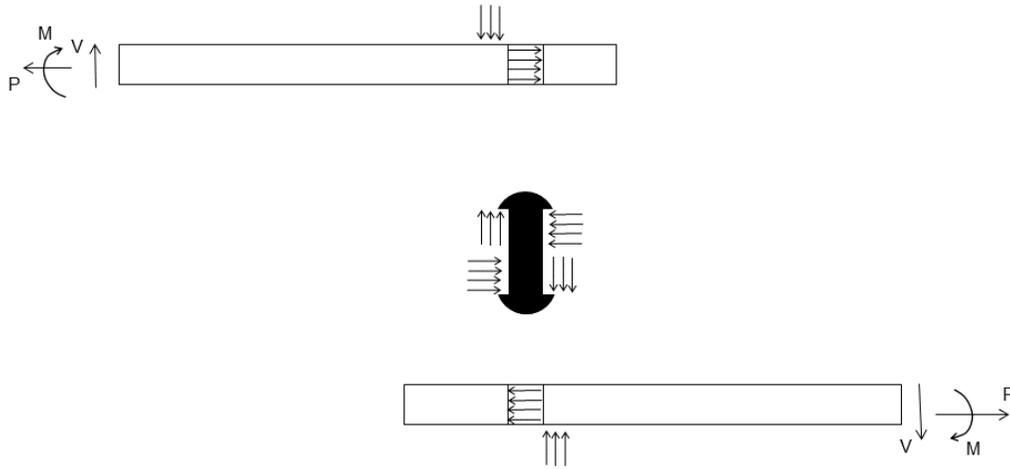


Figura 9

Verifica-se, portanto, que no rebite há força normal, força cortante e momento fletor. Na seção $m-n$, entretanto, tem-se apenas força normal e cortante (momento fletor nulo).

Conclui-se dessas considerações que o estudo rigoroso dos esforços que atuam na ligação em questão é bastante complexo.

Por essa razão, opta-se na Resistência dos Materiais por se fazer um estudo aproximado da ligação, baseado na seguinte hipótese simplificadora: admite-se que o comportamento da ligação depende exclusivamente da força cortante P na seção $m-n$, sem consideração explícita da força normal.

Em decorrência dessa e das demais simplificações feitas, a verificação da segurança da ligação quanto ao cisalhamento do rebite toma uma forma extremamente simples: a ligação será considerada segura se for satisfeita a seguinte condição:

$$\tau = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} \leq \bar{\tau} \quad (2)$$

onde $\bar{\tau}$ é a tensão de cisalhamento admissível do material do rebite.

Dessa expressão, obtém-se o diâmetro do rebite que deve ser utilizado na ligação das duas chapas:

$$d \geq 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \bar{\tau}}} \quad (3)$$

adotando o critério de mínimo custo, chega-se a

$$d = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \bar{\tau}}} \quad (4)$$

É essa expressão que permite determinar o diâmetro d do rebite; nela estão embutidas todas as aproximações e simplificações introduzidas ao se elaborar o modelo matemático dessa ligação. Ela encerra, por exemplo, a hipótese feita de se considerar que as tensões de cisalhamento nas seções transversais do rebite sejam constantes; também encerra a simplificação feita de se admitir que a ruptura do rebite por cisalhamento só depende da força cortante, sem a consideração da força normal.

Como é que esse modelo matemático, apesar de encerrar várias aproximações e simplificações, pode ser utilizado eficazmente no projeto de uma ligação real?

A resposta a essa pergunta é muito simples: porque a tensão de cisalhamento limite do material do rebite, a partir do qual se determina a tensão de cisalhamento admissível $\bar{\tau}$, é obtida a partir de ensaios de ruptura de ligações reais e calculada com as mesmas hipóteses que levaram à expressão (1).

Nestes ensaios obtém-se a força *limite* P_ℓ , que leva à ruptura da ligação; a partir dessa força, determina-se a tensão de cisalhamento limite do material do rebite por meio de:

$$\tau_\ell = \frac{P_\ell}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (5)$$

Introduzindo o coeficiente de segurança γ , chega-se à tensão admissível

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_\ell}{\gamma} \quad (6)$$

A tensão de cisalhamento admissível $\bar{\tau}$ tem, portanto, respaldo na realidade física, por provir de ensaios de ligações reais.

Compreende-se então porque se pode empregar a verificação (2) no projeto de uma ligação real: nela são comparadas duas tensões de cisalhamento $-\tau$ e $\bar{\tau}$ – obtidas com base nas mesmas hipóteses e por isso comparáveis, que se supõe caracterizarem o comportamento da ligação; como $\bar{\tau}$ provém de ensaios de ligações reais, a verificação (2) interpreta de fato a segurança da ligação quanto à ruptura do rebite por cisalhamento.

Essas considerações mostram o seguinte fato: no estudo do corte puro que está sendo aqui apresentado, mais que procurar traduzir fielmente o comportamento da ligação real, procura-se estabelecer um método de cálculo que possibilite dimensionar a ligação de forma eficiente e segura.

Como se mencionou no início do capítulo, várias são as possíveis causas de ruptura da ligação e a segurança relativamente a todas elas deve ser verificada.

A que se acaba de fazer, da tensão de cisalhamento no rebite, permite determinar seu diâmetro d .

Passa-se agora a uma outra verificação, a da tensão de contato entre o rebite e as chapas.

b) Verificação da tensão de contato entre o rebite e as chapas

Na Fig. 9 estão indicados os esforços que o rebite aplica nas chapas e os esforços que as chapas aplicam no rebite.

Esses esforços são transmitidos de um elemento ao outro pelas superfícies semicilíndricas de contato entre eles, onde atuam as tensões indicadas na Fig. 10; na Fig. 10(a) representam-se as tensões aplicadas na chapa 1 pelo rebite e na Fig. 10(b), as tensões aplicadas no rebite pela chapa 1.

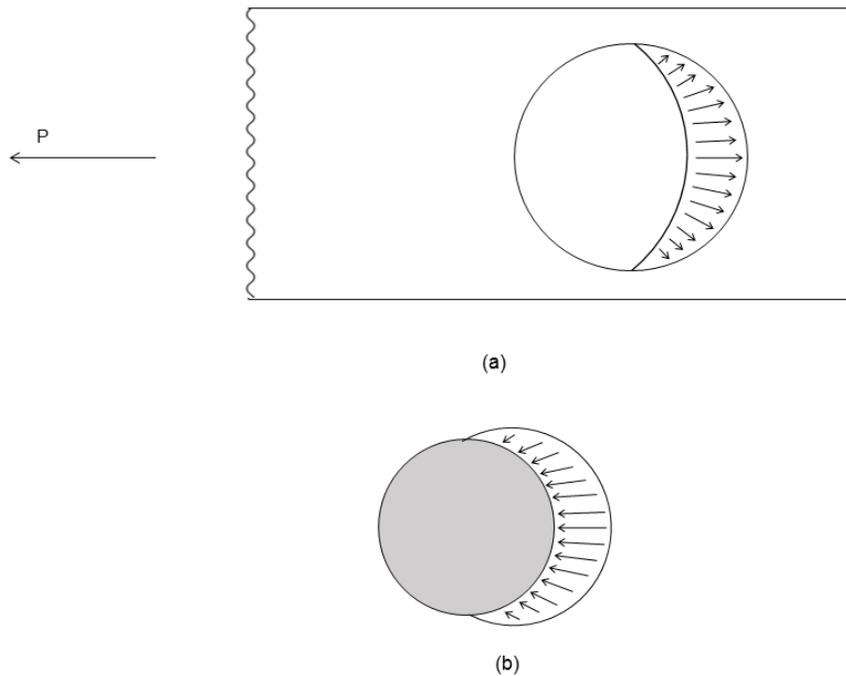


Figura 10

Se essas tensões de contato (também chamadas tensões de esmagamento) forem elevadas, poderá ocorrer o esmagamento da chapa pelo rebite, com o conseqüente deslocamento do rebite, como se indica na Fig. 11.

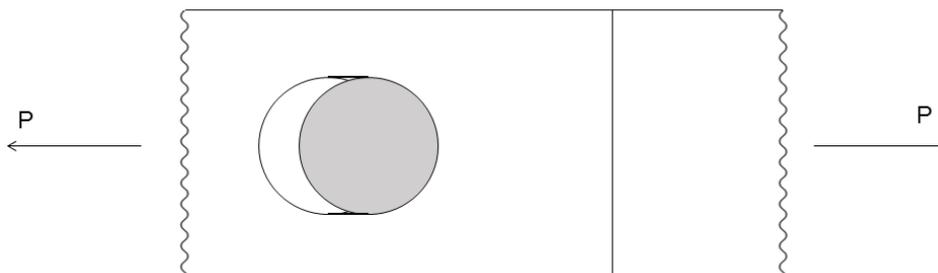


Figura 11

Para evitar esse tipo de ruptura, deve-se limitar o valor das tensões de contato entre o rebite e as chapas.

Sendo a distribuição das tensões de contato representadas na Fig. 10 de difícil determinação, define-se uma tensão de contato convencional, dada por:

$$\sigma_b = \frac{P}{e d} \quad (7)$$

onde e é a espessura da chapa.

Observa-se que a tensão de contato convencional é obtida dividindo-se a força transmitida pelo rebite pela área de projeção da superfície semicilíndrica de contato sobre o plano diametral do rebite (Fig. 12).

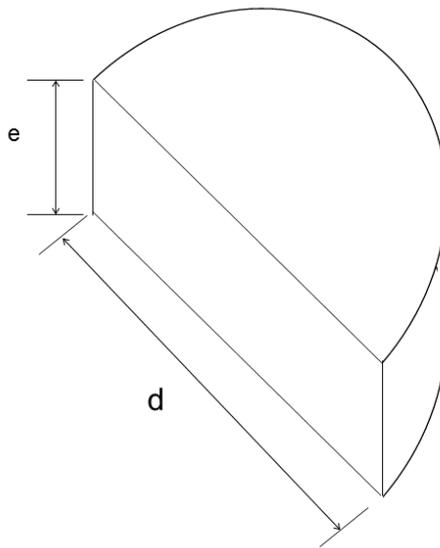


Figura 12

A condição de segurança da ligação quanto ao esmagamento da chapa é dada por

$$\sigma_b = \frac{P}{e d} \leq \bar{\sigma}_b \quad (8)$$

Onde $\bar{\sigma}_b$ é a tensão admissível ao contato do material da chapa.

A tensão admissível ao contato $\bar{\sigma}_b$ é da ordem do dobro da tensão admissível à tração $\bar{\sigma}_t$ do material da chapa:

$$\bar{\sigma}_b \cong 2 \bar{\sigma}_t \quad (9)$$

A espessura e da chapa pode ser obtida a partir de (8):

$$e \geq \frac{P}{d \bar{\sigma}_b} \quad (10)$$

Adotando o critério de mínimo custo, chega-se a

$$e = \frac{P}{d\bar{\sigma}_b} \quad (11)$$

A verificação que se acaba de discutir é a do esmagamento da chapa pelo rebite; poderia dar-se também o esmagamento do rebite pela chapa, como se mostra na Fig. 13.

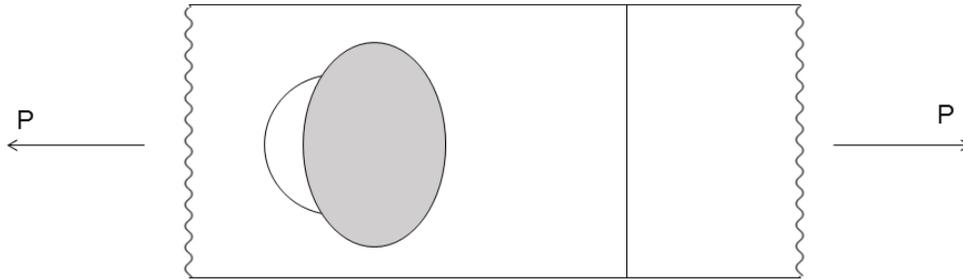


Figura 13

A experiência mostra, entretanto, que nas ligações reais o que ocorre é o esmagamento da chapa pelo rebite, não o contrário.

A verificação da tensão de contato entre o rebite e as chapas permitiu o dimensionamento da espessura e das chapas

Passa-se agora à verificação da tensão de tração nas chapas.

c) Verificação da tensão de tração nas chapas

A verificação da tensão de tração nas chapas permite determinar a sua largura b (Fig. 14).

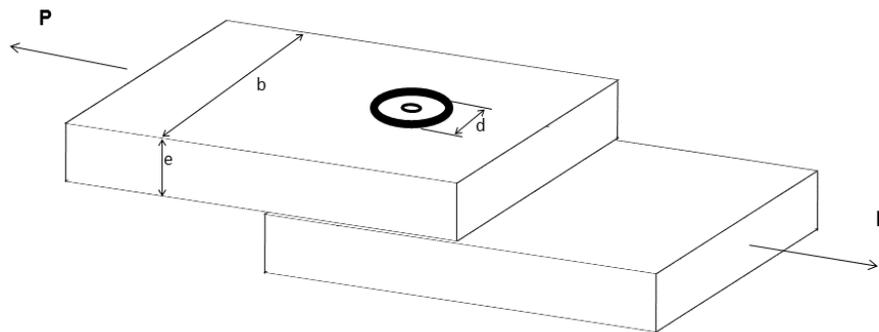


Figura 14

Na Fig. 15 indicam-se os esforços que atuam na chapa 1. As tensões normais na borda esquerda da chapa, que até este momento estavam sendo substituídas por sua resultante P , encontram-se agora explicitamente indicadas. Nesta figura indica-se também, de forma esquemática, o caminhamento dos esforços no interior da chapa 1.

Como se observa na Fig. 15, o furo enfraquece a chapa, ao diminuir suas seções transversais.

A seção transversal de menor área é a que contém o eixo do rebite, e é nela que a chapa pode se romper por tração, como se mostra na Fig. 16.

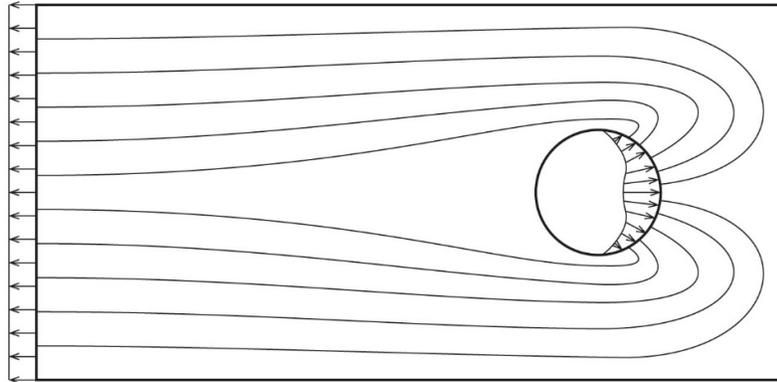


Figura 15

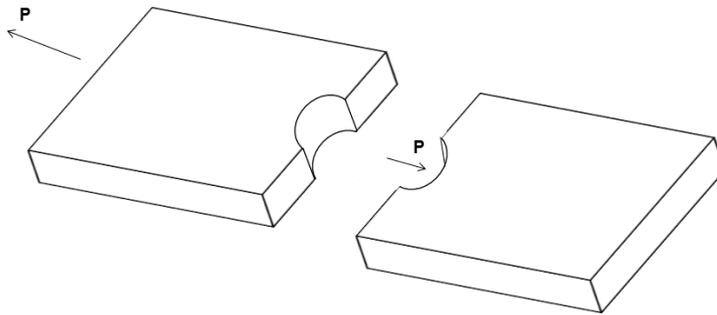


Figura 16

Admitindo que as tensões de tração nessa seção mais solicitada sejam uniformemente distribuídas, tem-se como condição de segurança da chapa quanto à ruptura por tração:

$$\sigma = \frac{P}{e(b-d)} \leq \bar{\sigma}_t \quad (12)$$

Onde b é a largura da chapa, d , o diâmetro do rebite e e , a espessura da chapa; $\bar{\sigma}_t$ é a tensão admissível à tração do material da chapa.

Na Fig. 17 indicam-se as tensões nessa seção mais solicitada à tração

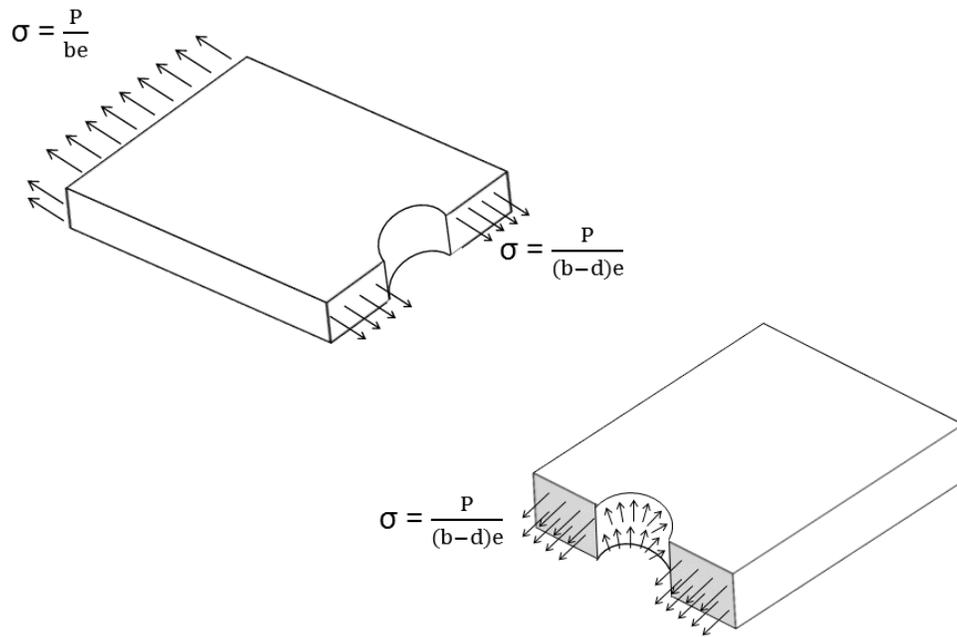


Figura 17

A largura b das chapas é obtida a partir de (12):

$$b = d + \frac{P}{\bar{\sigma}_t e} \quad (13)$$

Verifica-se que, na ligação de chapas tracionadas, o furo enfraquece as chapas. O mesmo não se dá na ligação de chapas comprimidas, como se observa na Fig. 18, em que se indica o caminhamento dos esforços internos nesse caso:

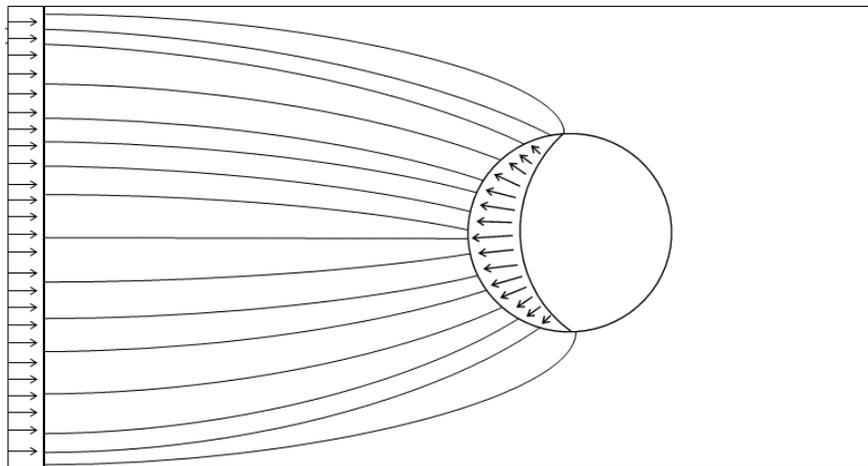


Figura 18

Como o furo não enfraquece as chapas, a condição de segurança da ligação quanto à ruptura por compressão das chapas coincide com a condição de segurança clássica das barras comprimidas:

$$\sigma = \frac{P}{b e} \leq \bar{\sigma}_c \quad (14)$$

onde b é a largura das chapas, e é a sua espessura e $\bar{\sigma}_c$ é a tensão admissível à compressão de seu material.

A largura b das chapas é dada por:

$$b = \frac{P}{\bar{\sigma}_c e} \quad (15)$$

Quando se tem ligações de barras comprimidas, as outras duas verificações de segurança – da tensão de cisalhamento no rebite e da tensão de contato entre o rebite e as chapas – são feitas exatamente da mesma forma que no caso das ligações de barras tracionadas.

d) Verificação da tensão de cisalhamento nas chapas

Existe ainda outra verificação de segurança que deve ser feita, a da tensão de cisalhamento nas chapas

Se a distância c entre o centro do rebite e a borda das chapas for pequena, o rebite cortará as chapas.

Na Fig. 19(a) estão assinalados os planos em que se dará o corte da chapa 1; na Fig. 19(b) o modo de ruptura dessa chapa encontra-se indicado em perspectiva.

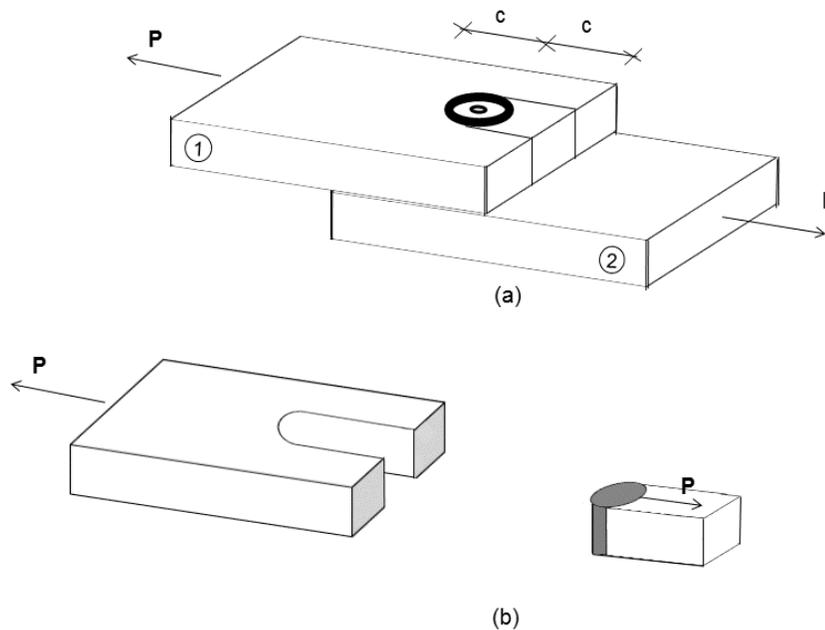


Figura 19

Nos planos longitudinais em que se dá a ruptura da chapa há corte puro, e nele atuam as tensões de cisalhamento mostradas na Fig. 20.

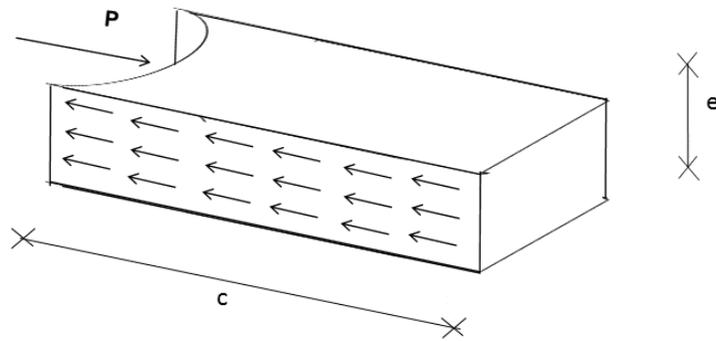


Figura 20

Essas tensões são iguais a

$$\tau = \frac{P}{2 c e} \quad (16)$$

logo a condição de segurança da ligação quanto ao corte das chapas pelo rebite é dada por:

$$\tau = \frac{P}{2 c e} \leq \bar{\tau} \quad (17)$$

onde $\bar{\tau}$ é a tensão admissível ao cisalhamento do material da chapa; o valor de c se obtém de (17):

$$c = \frac{P}{2 \bar{\tau} e} \quad (18)$$

A verificação da tensão de cisalhamento do material das chapas permite, portanto, dimensionar a distância c entre o centro do rebite e a borda transversal das chapas.

Com esta última verificação, completa-se o dimensionamento da ligação mostrada na Fig. 1, tendo-se determinado todas as dimensões das chapas 1,2 e do rebite que as une.

A junta examinada no Exemplo 1 recebe o nome de junta por superposição, pois uma chapa é colocada sobre a outra.

Estuda-se no próximo exemplo uma junta de topo, em que as chapas a serem ligadas são colocadas uma na frente da outra, empregando-se chapas auxiliares – chamadas chapas cobrejunta – para uni-las.

EXEMPLO 2

Duas chapas tracionadas são unidas por meio de rebites, como se mostra na Fig. 21.

Dimensionar a ligação:

São dados:

$$d = 1,0 \text{ cm}$$

$$\bar{\tau}_{rebite} = 16 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{t,chapa} = 12 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{b,chapa} = 24 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\tau}_{chapa} = 9 \text{ kN/cm}^2$$

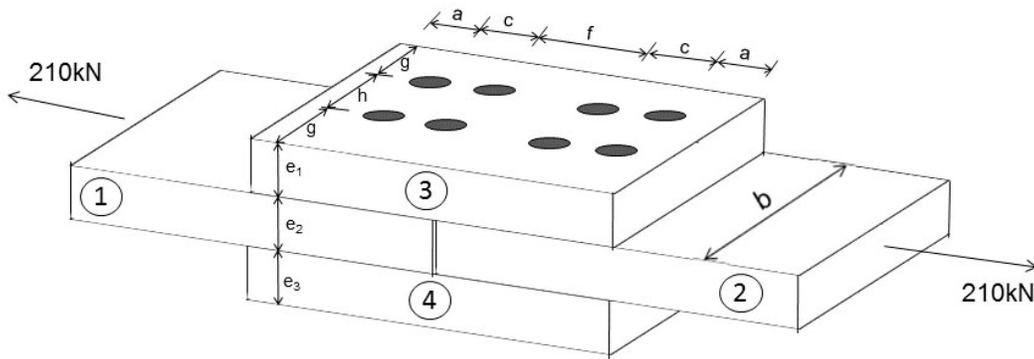


Figura 21

Tem-se neste exemplo uma junta de topo, em que duas chapas tracionadas – as chapas 1 e 2 – são ligadas por meio de rebites, empregando-se para isso duas chapas auxiliares – as chapas 3 e 4.

No Exemplo 1, a força aplicada em uma das chapas, por exemplo a chapa 2, era transferida diretamente à chapa 1 pelo rebite.

Neste Exemplo 2, a transferência de esforços da chapa 2 à chapa 1 se faz de forma indireta: ao tentar se deslocar, a chapa 2 leva consigo as chapas 3 e 4, às quais está ligada por rebites; as chapas 3 e 4 tendem então a deslocar-se levando junto a chapa 1, na qual também se ligam os rebites; estando a chapa 1 também vinculada, impede-se o movimento do conjunto, que fica equilibrado, dando-se assim a transferência de esforços da chapa 2 à chapa 1.

As duas ligações têm, portanto, comportamentos bastante distintos.

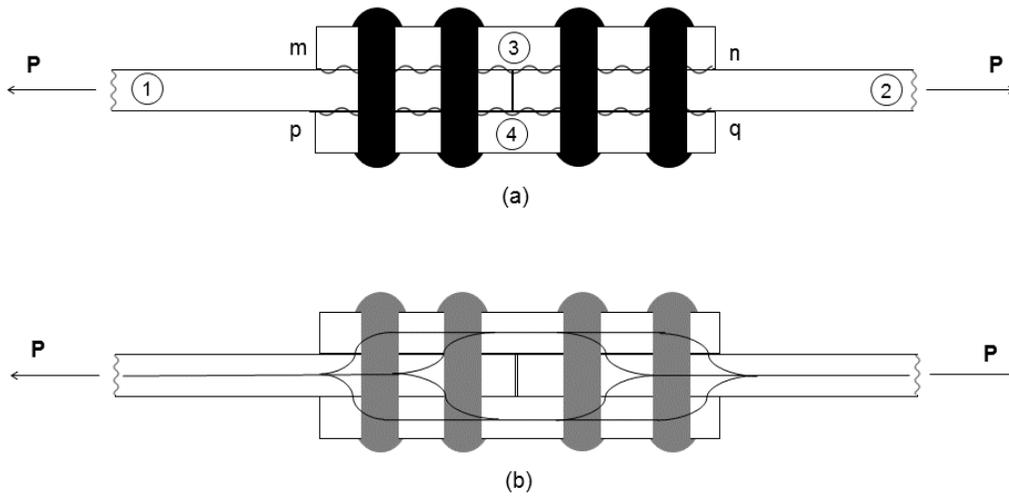
Passa-se agora ao dimensionamento da ligação, que será feito de forma a se ter segurança com relação aos diferentes modos de ruptura possíveis:

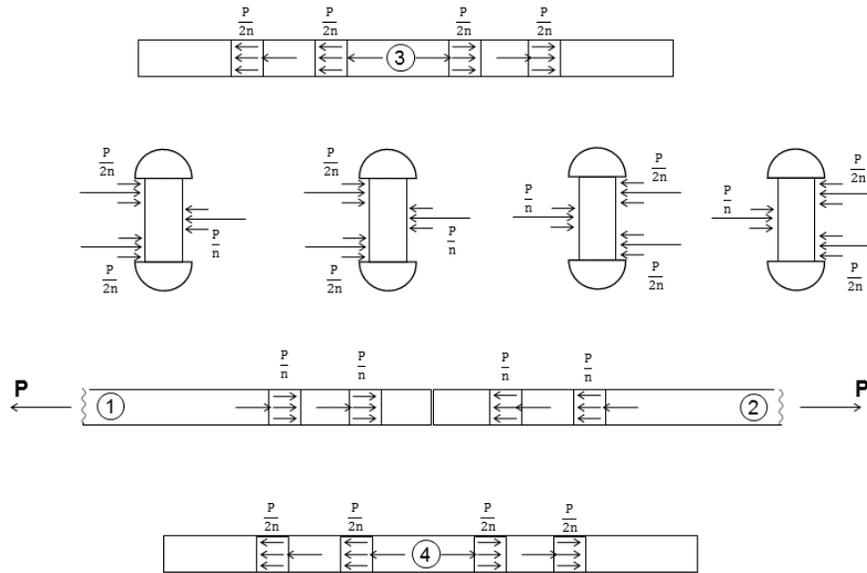
a) Verificação da segurança da ligação quanto ao corte dos rebites

Na Fig. 22(a) mostra-se um corte longitudinal da ligação; na Fig. 22(b) apresentam-se as linhas de caminhamento dos esforços desde a chapa 2 até a chapa 1; na Fig. 22(c) mostram-se isoladamente cada um dos elementos da ligação e os esforços que neles atuam, estando representadas as tensões de contato entre os rebites e as chapas e indicadas as resultantes destas tensões; na Fig. 22(d) mostram-se as chapas separadas por um corte dos rebites nas seções situadas nas interfaces $m-n$ e $p-q$ das chapas 1 e 2 com as chapas 3 e 4, sendo indicadas as forças que atuam nas seções em que foram cortados os rebites.

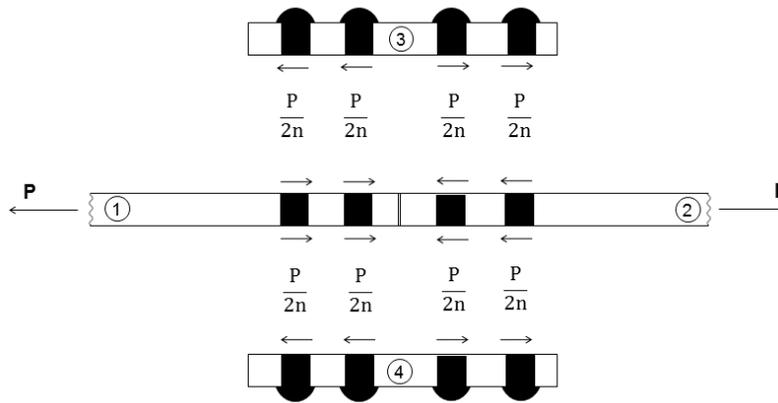
Admite-se, na Fig. 22, que n rebites unam a chapa 2 às chapas 3 e 4, e que outros n rebites unam a chapa 1 às chapas 3 e 4, num total, portanto, de $2n$ rebites na ligação.

Admite-se, também, que todos os rebites que ligam a chapa 2 às chapas 3 e 4 trabalhem igualmente, isto é, que cada um deles transmita a mesma força da chapa 2 às chapas 3 e 4; o mesmo se supõe com relação aos rebites que ligam a chapa 1 às chapas 3 e 4.





(c)



(d)

Figura 22

A vista explodida da Fig. 22(c) mostra claramente como se dá a transferência de esforços entre os diferentes elementos da ligação, e como se dá o equilíbrio de cada um deles.

Observa-se, nas Figs. 22 (c) e (d), que metade da força P aplicada na chapa 2 é transferida para a chapa 3 e a outra metade, para a chapa 4, passando dessas chapas para a chapa 1.

Nota-se, ainda, que, ao contrário do que ocorria no exemplo anterior, os rebites estão agora submetidos a um carregamento simétrico, não se dando aqui a rotação da ligação verificada no Exemplo 1, mostrada na Fig. 6.

Essa é uma vantagem das juntas de topo com relação às juntas por superposição, pois, não ocorrendo a rotação da ligação, não surgem nas chapas e nos rebites os esforços secundários analisados no exemplo anterior.

Ao se aumentar o valor da força P aplicada às chapas, ocorrerá a ruptura da ligação por escorregamento das chapas, como se mostra na Fig. 23.

Para que ocorra o escorregamento das chapas 1 e 2, é preciso que cada um dos rebites que as unem às chapas 3 e 4 se rompa em duas seções transversais, as seções situadas nas interfaces $m-n$ e $p-q$ das chapas 1 e 2 com as chapas 3 e 4.

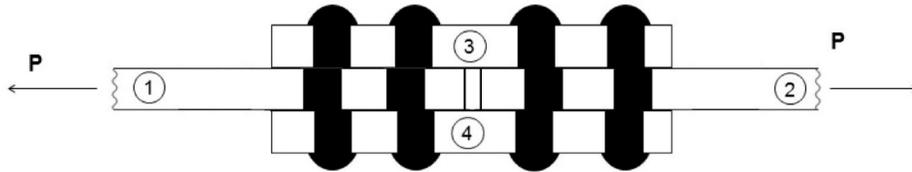


Figura 23

No Exemplo 1, a ruptura da ligação se dá pelo corte de uma única seção do rebite, a seção $m-n$ da Fig. 1(a). Diz-se, neste caso, que se tem cisalhamento simples do rebite; o rebite possui uma única seção resistente, pela qual passa toda a força transferida pelo rebite.

Neste Exemplo 2, a ruptura da ligação se dá pelo corte de duas seções dos rebites, as seções $m-n$ e $p-q$ da Fig. 22(a). Diz-se, neste caso, que se tem o cisalhamento duplo do rebite; o rebite possui duas seções resistentes, e por cada uma delas passa metade da força total transferida pelo rebite.

Nessas seções resistentes do rebite a sollicitação é de corte puro, pois nelas existe a tendência de uma parte do rebite escorregar sobre a outra no plano da seção transversal.

O corte puro nessas seções é caracterizado pelas forças cortantes $V=P/2n$ que as sollicitam (Fig. 22(d)), e a condição de segurança da ligação quanto ao corte dos rebites é expressa por:

$$\tau = \frac{V}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{P}{2n \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{2P}{n \pi d^2} \leq \bar{\tau}_{rebite} \quad (19)$$

de onde se tira o número n de rebites que devem ser utilizados em cada lado da ligação:

$$n \geq \frac{2P}{\pi d^2 \bar{\tau}_{rebite}} \quad (20)$$

Com os dados numéricos do problema, obtém-se:

$$n \geq \frac{2 \cdot 210}{\pi \cdot 1,0^2 \cdot 16} = 8,4 \quad (21)$$

Adota-se $n = 9$

Como neste exemplo o tipo de rebite a ser utilizado na ligação é conhecido, a verificação da segurança relativamente ao corte dos rebites permite determinar o número de rebites que devem ser empregados.

b) Verificação da segurança da ligação quanto ao esmagamento das chapas

Na Fig.22(c) mostram-se as forças de contato entre os rebites e as chapas.

A condição de segurança relativamente ao esmagamento das chapas 3 e 4, com espessura e_1 é:

$$\sigma_b = \frac{P}{2n e_1 d} \leq \bar{\sigma}_b \quad (22)$$

A condição de segurança relativamente ao esmagamento das chapas 1 e 2, com espessura e_2 é:

$$\sigma_b = \frac{P}{n e_2 d} \leq \bar{\sigma}_b \quad (23)$$

Dessas expressões, decorre:

$$e_1 \geq \frac{P}{2n d \bar{\sigma}_b} = \frac{210}{2 \cdot 9 \cdot 1,0 \cdot 24} = 0,49 \text{ cm} \quad (24)$$

e

$$e_2 \geq \frac{P}{n d \bar{\sigma}_b} = \frac{210}{9 \cdot 1,0 \cdot 24} = 0,97 \text{ cm} \quad (25)$$

Adotam-se para as espessuras os valores

$$e_1 = 0,5 \text{ cm} \quad (26)$$

e

$$e_2 = 1,0 \text{ cm} \quad (27)$$

c) Verificação da segurança da ligação quanto à ruptura das chapas por tração

Já se comentou que os furos enfraquecem as chapas, pois diminuem suas seções transversais.

Para fazer o dimensionamento das chapas à tração, deve-se, portanto, conhecer a disposição dos rebites na ligação, para que se possa considerar a diminuição da área provocada pelos furos.

Opta-se, neste exemplo, por dispor os nove rebites de cada lado da ligação em três filas com três rebites em cada uma, como se mostra na Fig. 24.

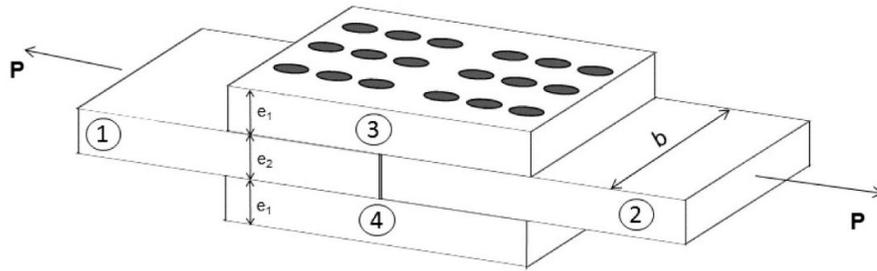


Figura 24

Faz-se agora a verificação da chapa 3 à tração. Na Fig. 25 apresentam-se as forças que nela atuam:

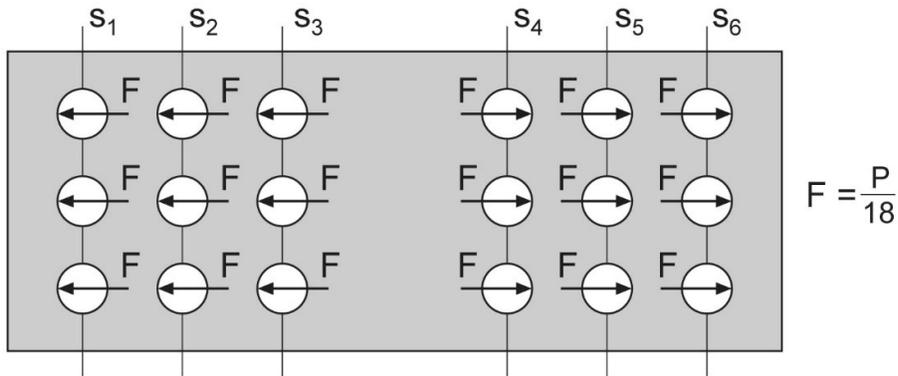


Figura 25

Nas seções transversais mais enfraquecidas pelos furos, têm-se as seguintes forças normais de tração:

- Seções S_1 e S_6 : $N = 3 \frac{P}{18} = \frac{P}{6} = \frac{210}{6} = 35 \text{ kN}$
- Seções S_2 e S_5 : $N = 6 \frac{P}{18} = \frac{P}{3} = \frac{210}{3} = 70 \text{ kN}$
- Seções S_3 e S_4 : $N = 9 \frac{P}{18} = \frac{P}{2} = \frac{210}{2} = 105 \text{ kN}$

O dimensionamento da chapa 3 à tração deve ser feito, portanto, para as seções S_3 e S_4 :

$$\sigma_t = \frac{\frac{P}{2}}{(b - 3d) e_1} \leq \bar{\sigma}_t \quad (28)$$

decorrendo

$$b \geq \frac{P}{2 \bar{\sigma}_t e_1} + 3d \quad (29)$$

Com os dados numéricos do problema, tem-se:

$$b \geq \frac{210}{2 \cdot 0,5 \cdot 12} + 3 \cdot 1,0 = 20,5 \text{ cm} \quad (30)$$

Essa verificação se aplica também à chapa 4, pois, por simetria, as chapas 3 e 4 têm exatamente o mesmo funcionamento.

O valor que será adotado para b ainda não pode ser definido, pois depende também da verificação das chapas 1 e 2 à tração, já que se deseja que todas as chapas da ligação possuam a mesma largura.

Na Fig. 26 apresenta-se a chapa 1 e as forças que nela atuam.

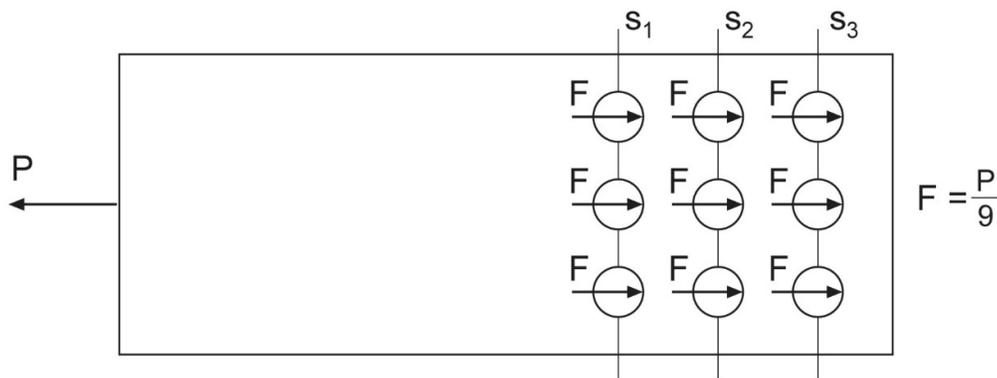


Figura 26

O dimensionamento da chapa 1 deve ser feito para a seção S_1 , onde a força normal de tração é igual a P :

$$\sigma_t = \frac{P}{(b - 3d) e_2} \leq \bar{\sigma}_t \quad (31)$$

logo

$$b \geq \frac{P}{\bar{\sigma}_t e_2} + 3d = \frac{210}{1,0 \cdot 12} + 3 \cdot 1,0 = 20,5 \text{ cm} \quad (32)$$

Pela simetria da ligação, observa-se que essa verificação se aplica também à chapa 2.

Nota-se que as duas limitações inferiores para b , dadas por (30) e (32), coincidem. Esse resultado já era esperado, pois apesar de a força normal máxima da chapa 1 ser o dobro da chapa 3, sua espessura e_2 é também exatamente o dobro da espessura e_1 , da chapa 3.

Adota-se, então,

$$b = 20,5 \text{ cm} \quad (33)$$

A verificação da segurança da ligação quanto à ruptura das chapas por tração permitiu dimensionar a largura b das chapas.

Falta agora determinar a exata posição em que se deve colocar os rebites, isto é, determinar as distâncias entre os rebites e entre os rebites e as bordas das chapas.

d) Verificação da segurança da ligação quanto ao corte das chapas.

Na Fig. 27 mais uma vez mostra-se a chapa 1. A distância i entre o centro dos rebites e a borda transversal da chapa é determinada de forma a haver segurança quanto ao corte da chapa pelos rebites.

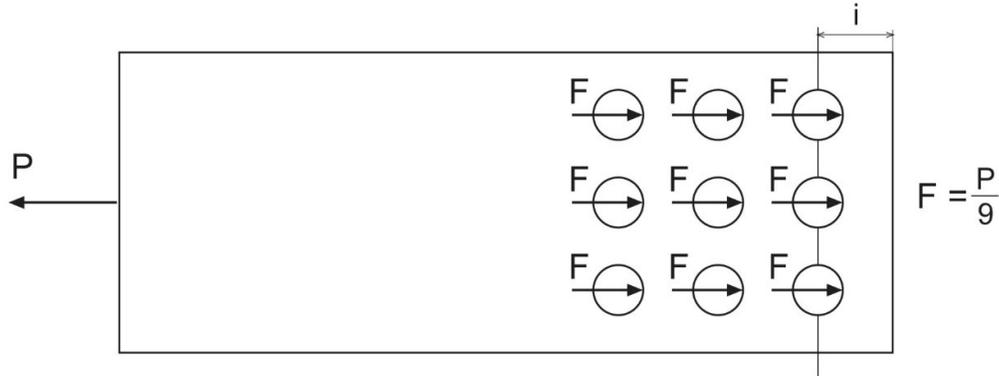


Figura 27

A condição de segurança a ser satisfeita é:

$$\tau = \frac{\frac{F}{2}}{i e_2} \leq \bar{\tau}_{chapa} \quad (33)$$

logo

$$i \geq \frac{F}{2 e_2 \bar{\tau}_{chapa}} \quad (34)$$

Neste exemplo, chega-se a:

$$i = \frac{210}{2 \cdot 9 \cdot 1,0 \cdot 9} = 1,30 \text{ cm} \quad (35)$$

Pela simetria da ligação, essa deve ser também a distância entre os centros dos rebites e a borda transversal da chapa 2.

Não é difícil verificar que, também no caso das chapas cobre-junta 3 e 4, as distâncias a indicadas na Fig. 21, entre os centros dos rebites e as bordas transversais das chapas, devem ser a dada por (35).

Para que o dimensionamento da ligação fique completo, falta determinar a distância g entre os centros dos rebites e as bordas longitudinais das chapas, e as distâncias c e h entre os centros dos rebites.

Sabe-se, da verificação das chapas à tração, que:

$$2g + h = b = 20,5 \text{ cm} \quad (36)$$

Essa condição, que procura garantir a segurança da ligação quanto à completa separação das chapas por tração, não é suficiente para impedir rupturas por tração localizadas, que poderão ocorrer se os rebites forem colocados muito próximos das bordas longitudinais das chapas.

Na Fig. 28 mostra-se o caminhamento dos esforços em uma chapa de uma ligação em que são utilizados apenas dois rebites colocados muito próximos das bordas.

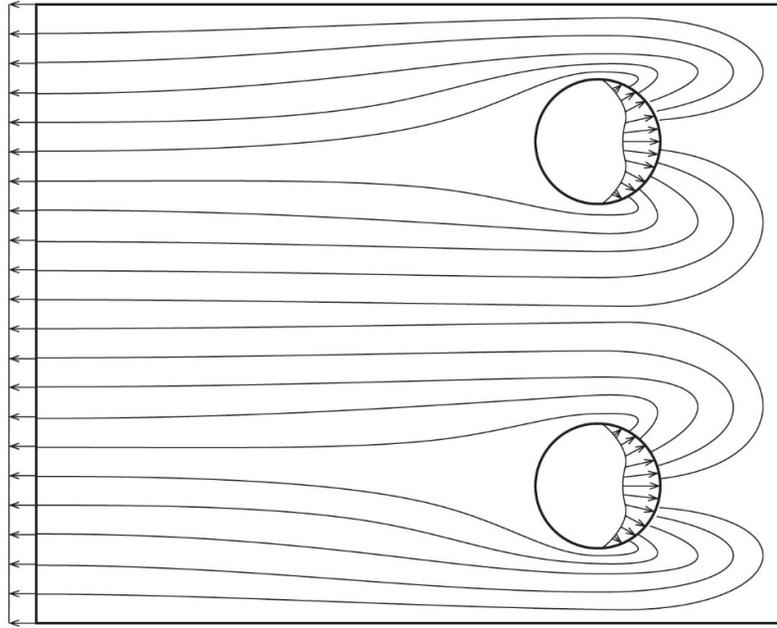


Figura 28

Observa-se nesta figura que há uma grande concentração de tensões nos trechos da chapa situados entre os rebites e as bordas longitudinais, podendo ocorrer a ruptura localizada da chapa nestas regiões, como se mostra na Fig. 29.



Figura 29

Para garantir que haja segurança da ligação quanto a esse tipo de ruptura localizada, deve-se deixar entre os centros dos rebites e as bordas longitudinais das chapas uma distância igual ou superior a um mínimo considerado seguro.

As normas de projeto e execução das estruturas de aço fornecem os valores dessas distâncias mínimas a serem respeitadas; no caso da norma brasileira, essa distância mínima depende do diâmetro do rebite, variando de $1,25d$ a $1,50d$.

Por simplicidade, adotar-se-á aqui como distância mínima $1,5d$ em todos os casos, qualquer que seja o diâmetro do rebite.

Neste Exemplo 2, tem-se então:

$$g \geq 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ cm} \quad (37)$$

Além da distância mínima entre os centros dos rebites e as bordas longitudinais das chapas, as normas também estipulam qual deve ser a distância mínima entre os centros dos rebites e as bordas transversais das chapas e qual deve ser a distância mínima entre os centros de dois rebites vizinhos.

A distância mínima entre os centros dos rebites e as bordas transversais das chapas, como já se examinou, deve garantir a segurança da ligação quanto ao corte das chapas pelos rebites.

A norma brasileira não faz distinção entre as bordas das chapas, e estipula uma única distância mínima a ser deixada entre os centros dos rebites e as bordas das chapas, quaisquer que elas sejam: longitudinais, transversais, ou mesmo oblíquas.

Esse mínimo, como se comentou há pouco, varia de $1,25d$ a $1,50d$, tendo-se adotado, simplificada, $1,5d$ como seu valor.

No caso deste exemplo, tem-se, então, de acordo com a Norma Brasileira:

$$a = i \geq 1,5 \cdot d = 1,5 \text{ cm} \quad (38)$$

A adoção do mínimo estipulado pelas normas garante a segurança da ligação quanto ao corte das chapas pelos rebites, e dispensa que se faça explicitamente essa verificação de segurança.

No presente exemplo, essa verificação havia sido feita, tendo-se chegado a:

$$a = i \geq 1,3 \text{ cm} \quad (39)$$

tendo-se adotado:

$$a = i = 1,3 \text{ cm} \quad (40)$$

valor que é bastante próximo ao determinado pela Norma Brasileira.

De forma a satisfazer a norma, passa-se a adotar neste exemplo:

$$a = i = 1,5 \text{ cm} \quad (41)$$

Dimensionar a ligação de topo da Fig. 32, em que duas barras de madeira são unidas por meio de duas peças de aço.

São dados:

$$\bar{\tau}_{madeira} = 6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{t,madeira} = 10 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{b,madeira} = 20 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\tau}_{aço} = 12 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{t,aço} = 15 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{b,aço} = 30 \text{ kN/cm}^2$$

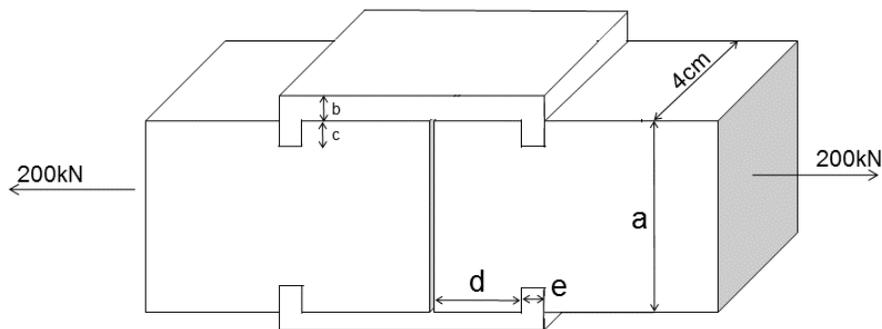


Figura 32

Na Fig. 33 indicam-se separadamente os quatro elementos da ligação:

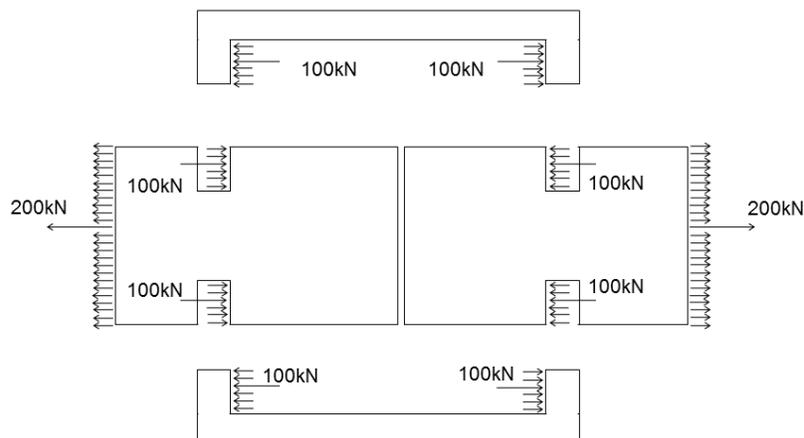


Figura 33

As verificações de segurança necessárias são:

a) Verificação da segurança da ligação quanto ao corte das barras de madeira

Na Fig. 34 mostram-se as seções em que se pode dar a ruptura das barras de madeira por corte puro (seções S_1)

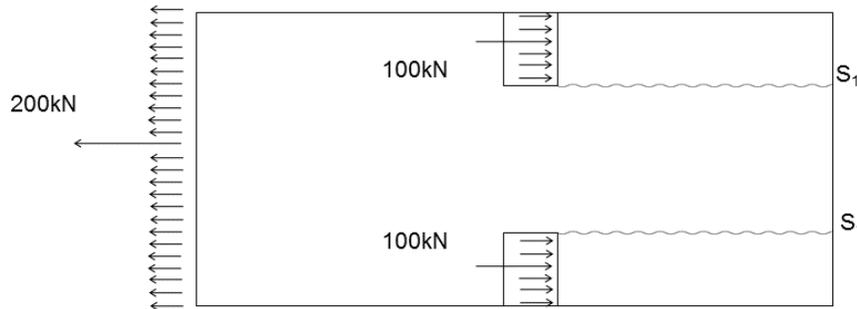


Figura 34

A condição de segurança da ligação quanto ao corte das barras de madeira é:

$$\tau = \frac{100}{4d} \leq \bar{\tau}_{madeira} = 6 \quad (52)$$

de onde se obtém:

$$d \geq \frac{100}{4.6} = 4,2 \text{ cm} \quad (53)$$

Adota-se:

$$d = 4,2 \text{ cm} \quad (54)$$

b) Verificação da segurança da ligação quanto ao esmagamento das barras de madeira

Tem-se neste problema dois materiais em contato: madeira e aço. A segurança quanto ao esmagamento deve ser obviamente verificada para o menos resistente deles, a madeira.

A condição de segurança da ligação quanto ao esmagamento das barras de madeira pelas peças de aço é:

$$\sigma_b = \frac{100}{4c} \leq \bar{\sigma}_{b,madeira} = 20 \quad (55)$$

decorrendo:

$$c \geq \frac{100}{4.20} = 1,3 \text{ cm} \quad (56)$$

Adota-se:

$$c = 1,3 \text{ cm} \quad (57)$$

c) **Verificação da segurança da ligação quanto à ruptura das barras de madeira por tração**

A ruptura das barras de madeira por tração pode se dar em uma das seções transversais enfraquecidas pelas ranhuras em que são encaixadas as peças de aço (seção S_2 da Fig. 35)

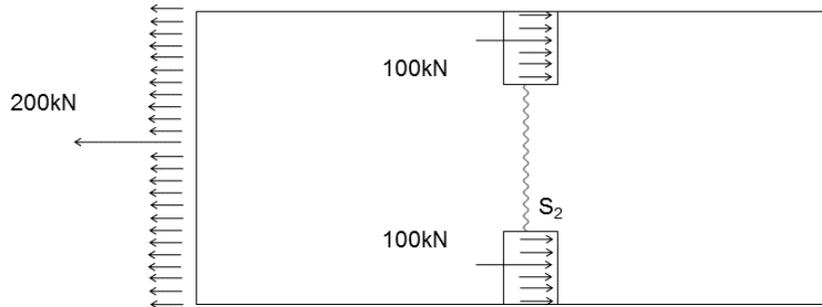


Figura 35

A condição de segurança relativamente à ruptura da barra por tração é:

$$\sigma_t = \frac{200}{4(a - 2c)} \leq \bar{\sigma}_{t,madeira} = 10 \quad (58)$$

de onde decorre:

$$a \geq \frac{200}{4 \cdot 10} + 2c = 5 + 2 \cdot 1,3 = 7,6 \text{ cm} \quad (59)$$

Adota-se:

$$a = 7,6 \text{ cm} \quad (60)$$

d) **Verificação da segurança da ligação quanto ao corte das peças de aço**

As peças de aço podem romper-se por corte puro nas seções S_3 indicadas na Fig. 36:

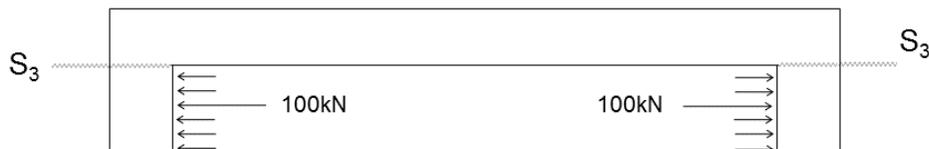


Figura 36

A condição de segurança relativamente ao corte das peças de aço é:

$$\tau = \frac{100}{4e} \leq \bar{\tau}_{aço} = 12 \quad (61)$$

de onde se tem:

$$e \geq \frac{100}{4.12} = 2,1 \text{ cm} \quad (62)$$

Adota-se:

$$e = 2,1 \text{ cm} \quad (63)$$

e) Verificação da segurança quanto à ruptura das peças de aço por tração

As peças de aço podem romper-se por tração em qualquer seção transversal S_4 representada na Fig. 37.

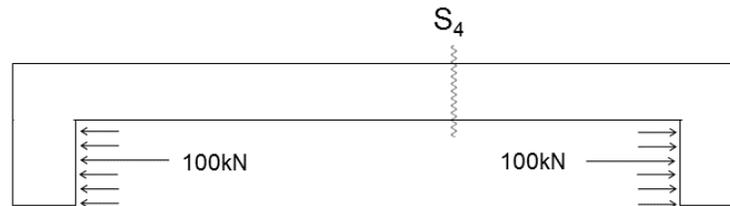


Figura 37

A condição de segurança relativamente à ruptura das peças de aço por tração é:

$$\sigma_t = \frac{100}{4 b} \leq \bar{\sigma}_{t,aço} = 15 \quad (64)$$

decorrendo:

$$b \geq \frac{100}{4.15} = 1,7 \text{ cm} \quad (65)$$

Adota-se:

$$b = 1,7 \text{ cm} \quad (66)$$

Estão feitas todas as verificações de segurança necessárias, e encontra-se dimensionada a ligação. Na Fig. 38 estão mostradas todas as dimensões obtidas.

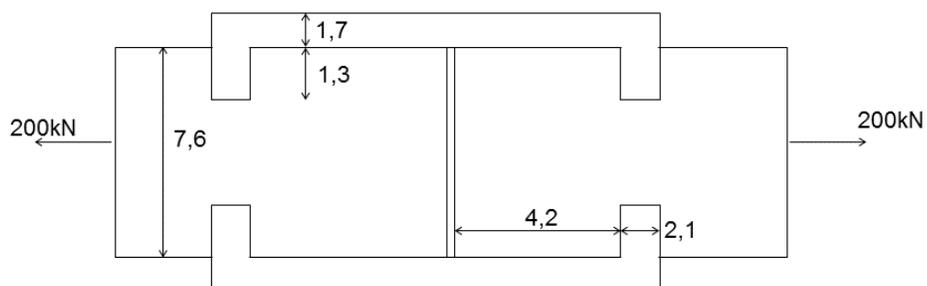


Figura 38

