

**BIBLIOGRAFIA TÉCNICA PARA O  
DESENVOLVIMENTO DA  
CONSTRUÇÃO METÁLICA**

***VOLUME - II***

**LIGAÇÕES EM  
ESTRUTURAS  
METÁLICAS**

O setor siderúrgico, através do **Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA**, tem a satisfação de reeditar, para atender ao universo de profissionais envolvidos com o emprego do aço na construção civil, o presente manual, projeto elaborado originalmente pela Cobrapi – Companhia Brasileira de Projetos Industriais (1987), a pedido da Siderbrás.

Segundo de uma série relacionada à Construção em Aço, este manual insere-se nos objetivos do **CBCA**, centro dinâmico de serviços com foco exclusivamente técnico, de contribuir para a promoção do uso do aço na construção, atendendo às necessidades de projetistas, fabricantes de estruturas em aço, construtoras, profissionais liberais, arquitetos, engenheiros, professores universitários, estudantes e entidades de classe que se relacionam com a construção em aço.

<b>1. Introdução .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Ligações .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Classificação das Ligações .....</b>	<b>11</b>
3.1 - SEGUNDO À RIGIDEZ .....	12
3.2 - SEGUNDO OS MEIOS DE LIGAÇÃO .....	13
3.3 - SEGUNDO OS ESFORÇOS SOLICITANTES .....	14
3.4 - LIGAÇÕES DE FÁBRICA E DE CAMPO .....	16
<b>4. Considerações Sobre Soldas .....</b>	<b>17</b>
4.1 – TIPOS DE SOLDA .....	18
4.2 – SOLDAS DE FILETE .....	18
4.3 – SOLDAS DE ENTALHE .....	19
4.4 – TABELAS PARA ESPECIFICAÇÃO DE SOLDA .....	20
<b>5. Considerações Sobre Parafusos .....</b>	<b>21</b>
5.1 – PARAFUSOS COMUM E DE ALTA RESISTÊNCIA .....	22
5.2 – TRANSMISSÃO DOS ESFORÇOS ATRAVÉS DOS PARAFUSOS .....	22
5.3 – MÉTODO DE APERTO: .....	24
5.4 – FUROS PARA PARAFUSOS .....	24
5.5 – RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO .....	24
<b>6. Exemplos de Cálculo .....</b>	<b>25</b>
6.1 – LIGAÇÃO DE PEÇA TRACIONADA .....	26
6.1.1 - CONSIDERAÇÕES .....	26
6.1.2 - VERIFICAÇÃO DAS CANTONEIRAS À TRAÇÃO .....	28
6.1.3 - VERIFICAÇÃO DA CHAPA DE GUSSET À TRAÇÃO .....	28
6.1.4 - VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS .....	28
6.1.5 - SOLDA DA CHAPA DE GUSSET NA VIGA .....	30
6.1.6 - COLAPSO POR RASGAMENTO (NBR 8800, 7.5.3.2) .....	30
6.1.7 - SOLDA DA ALMA NA VIGA NA REGIÃO PRÓXIMA À CHAPA DE GUSSET .....	31
6.2 – LIGAÇÃO APARAFUSADA COM CISALHAMENTO EXCÊNTRICO .....	31
6.2.1 - CONSIDERAÇÕES .....	31
6.2.2 - SOLICITAÇÃO DE PARAFUSOS .....	33
6.2.3 - VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS .....	34
6.2.4 - VERIFICAÇÃO DA CHAPA DE CONEXÃO .....	34
6.2.5 - VERIFICAÇÃO À FORÇA CORTANTE (NBR 8800, 7.5.3) .....	36
6.3 – LIGAÇÃO COM PARAFUSOS TRACIONADOS .....	36
6.3.1 - CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DE ALAVANCA .....	37
6.3.2 - EXEMPLO NUMÉRICO DE LIGAÇÃO COM EFEITO DE ALAVANCA .....	39

6.3.3 - ESFORÇOS NAS MESAS DA VIGA .....	39
6.3.4 - SOLDA DA VIGA COM A CHAPA DE EXTREMIDADE .....	40
6.3.5 - ESFORÇOS NOS PARAFUSOS .....	42
6.3.6 - VERIFICAÇÃO DA CHAPA DE EXTREMIDADE .....	43
6.3.7 - VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS .....	44
6.3.8 - VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE ENRIJECEDORES JUNTO À MESA COMPRIMIDA DA VIGA .....	44
6.3.9 - VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE ENRIJECEDORES NA COLUNA, JUNTO À MESA TRACIONADA DA VIGA .....	45
6.3.10 - VERIFICAÇÃO DA ALMA DA COLUNA AO CISALHAMENTO .....	46
6.3.11 - SOLDA DE COMPOSIÇÃO DA COLUNA .....	46
<b>6.4 – LIGAÇÕES FLEXÍVEIS .....</b>	<b>47</b>
6.4.1 - CONSIDERAÇÕES .....	47
6.4.2 - EXEMPLO NUMÉRICO: LIGAÇÃO FLEXÍVEL COM CANTONEIRAS DE EXTREMIDADE: .....	50
6.4.3 - EXEMPLO NUMÉRICO: LIGAÇÃO FLEXÍVEL COM CHAPA DE EXTREMIDADE: .....	51
<b>6.5 – LIGAÇÕES RÍGIDAS COM GRUPO DE PARAFUSOS TRACIONADOS .....</b>	<b>52</b>
6.5.1 - LIGAÇÕES COM PARAFUSOS A-345 E A-490 .....	55
6.5.2 – LIGAÇÕES COM PARAFUSOS A-307 .....	55
6.5.3 – CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS .....	55
6.5.4 – EXEMPLO NUMÉRICO .....	56
6.5.5 – ESFORÇOS NOS PARAFUSOS .....	56
6.5.6 – VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS .....	57
6.5.7 – DEMAIS VERIFICAÇÕES .....	57
<b>6.6 – LIGAÇÃO DE NÓS DE TRELIÇA COM COLUNAS .....</b>	<b>58</b>
<b>6.7 – LIGAÇÃO DE EMENDA DE VIGAS .....</b>	<b>62</b>
6.7.1 - CONSIDERAÇÕES .....	62
6.7.2 - CÁLCULO DAS ÁREAS DAS TALAS .....	64
6.7.3 - PARAFUSOS DAS TALAS DAS MESAS .....	65
6.7.4 - PARAFUSOS DAS TALAS DA ALMA .....	65
6.7.5 - OUTRAS VERIFICAÇÕES .....	66
<b>6.8 – SOLDA DE COMPOSIÇÃO DE PERFIL SOLDADO .....</b>	<b>66</b>
6.8.1 – CONSIDERAÇÕES .....	67
6.8.2 – VERIFICAÇÃO .....	67
6.8.3 - VERIFICAÇÕES ADICIONAIS NA VIGA .....	67

# ***Capítulo 1***

---

**Introdução**

Assim como no fascículo anterior, Galpões para Usos Gerais, também neste trabalho, torna-se necessária a consulta da NBR 8800 durante a leitura, para perfeito entendimento do mesmo.

No corpo do trabalho, além de uma breve introdução sobre ligações, são apresentados nove exemplos de cálculo de ligações comumente encontradas no projeto de estruturas metálicas.

Para facilitar a marcha de cálculo, é reproduzida no final do fascículo, uma série de tabelas sobre parafusos e soldas.

Também aqui valem as observações feitas anteriormente no fascículo Galpões Para Usos Gerais, com relação às unidades utilizadas:

- Características geométricas das seções expressas em centímetros (cm)
- Forças em quilonewtons (kN)
- Momentos fletores em quilonewtons x cm (kNcm)
- Tensões em quilonewtons / centímetros quadrados ( $\text{kN}/\text{cm}^2$ )

Qualquer colaboração que pudermos receber dos leitores será de muita valia para que possamos, através das sugestões recebidas, aprimorar nossas publicações.

# ***Capítulo 2***

---

**Ligações**

O termo ligação é aplicado a todos os detalhes construtivos que promovam a união de partes da estrutura entre si ou a sua união com elementos externos a ela, como, por exemplo, as fundações.

O conceito é amplo, admitindo diversidade de situações em que é aplicado:

- ligação da alma com mesa em perfil I soldado (fig. 1a)

- ligação de coluna com viga de pórtico (fig. 1b)
- placa de base (fig. 1c)
- emenda de viga I (fig. 1d)
- ligação flexível de viga I com coluna (fig. 1e)
- ligação de peça tracionada (fig. 1f)
- emenda de coluna (fig. 1g)

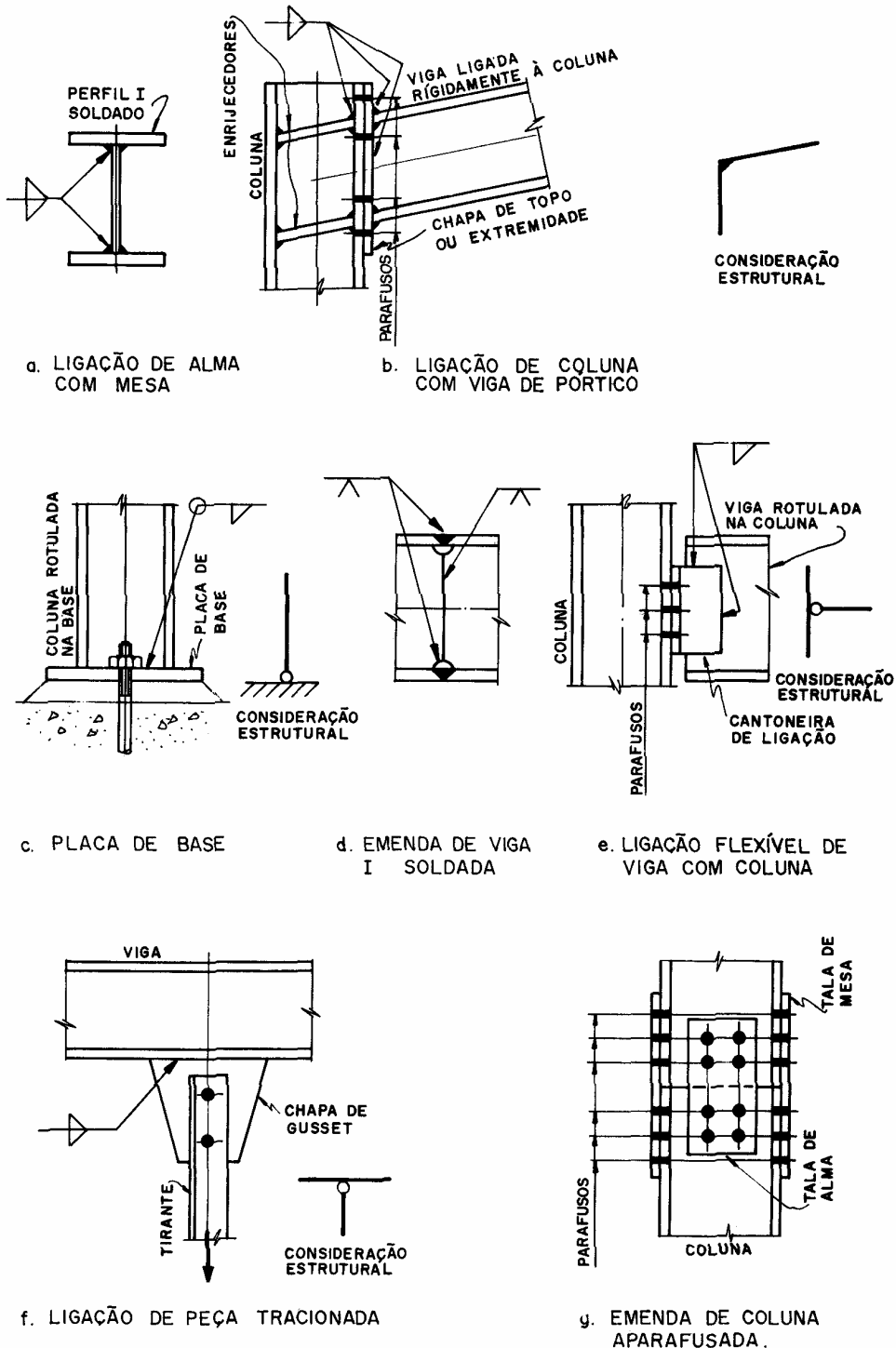


Fig. 1: Alguns Tipos de Ligações



As ligações se compõem dos elementos de ligação e dos meios de ligação.

Os elementos de ligação são todos os componentes incluídos no conjunto para permitir ou facilitar a transmissão dos esforços (fig. 1):

- enrijecedores;
- placa de base;
- cantoneiras;
- chapas de gusset;
- talas de alma e de mesa;
- parte das peças ligadas envolvidas localmente na ligação.

Os meios de ligação são os elementos que promovem a união entre as partes da estrutura para formar a ligação.

Como meios de ligação são utilizados, principalmente, soldas, parafusos e barras roscadas, como os chumbadores.

O cálculo de uma ligação significa a verificação de todas as partes que a compõem: os elementos de ligação e os meios de ligação.

De acordo com a NBR 8800, os elementos de ligação e os meios de ligação deverão ser dimensionados de forma que as suas resistências de cálculo, correspondentes aos estados limites em consideração, sejam maiores que as solicitações de cálculo.

As resistências de cálculo, de modo geral, são calculadas como uma porcentagem especificada da resistência dos elementos ou meios de ligação a um determinado efeito (o estado limite).

As solicitações de cálculo, em consideração a esse mesmo estado limite, são calculadas através da análise da ligação sujeita às ações multiplicadas pelos coeficientes de ponderação.

Como exemplo, a resistência de cálculo do parafuso A-307, trabalhando à tração, considerando o estado limite aplicável, ruptura da parte rosqueada, é 0,75 da resistência do parafuso à tração, ou seja, 39,2 kN.

Vale dizer que a solicitação de cálculo à tração no parafuso (considerando os coeficientes de ponderação) não deverá nunca exceder a esse valor.



# ***Capítulo 3***

---

## **Classificação das Ligações**

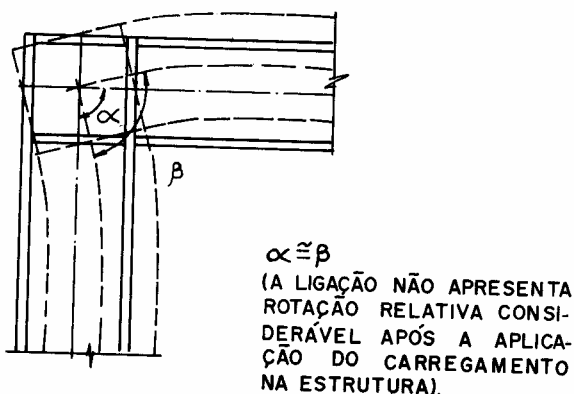
## 3.1 – SEGUNDO A RIGIDEZ

A rigidez das ligações, ou seja, sua capacidade de impedir a rotação relativa local das peças ligadas, é responsável pelo comportamento final da estrutura em termos de rotações e deslocamentos.

Isto quer dizer que, além das barras que compõem a estrutura, também as ligações deverão estar convenientemente concebidas e dimensionadas, sob pena da estrutura não se comportar, em termos de deslocamentos e rotações, conforme desejado.

Dessa forma as ligações deverão ser projetadas conforme as hipóteses feitas para os nós das barras na análise estrutural:

- nos locais onde foram previstas ligações rígidas, deverão ser previstos detalhes que efetivamente impeçam a rotação relativa das partes (figs. 1b e 2a).
- nos locais onde a ligação deve permitir a rotação relativa das partes, os detalhes deverão ser tais que propiciem essa rotação com o mínimo de restrição (figs. 1e e 2 b).



(a) LIGAÇÃO RÍGIDA

De acordo com o grau de impedimento da rotação relativa de suas partes, as ligações são classificadas nos três seguintes tipos:

### LIGAÇÃO RÍGIDA

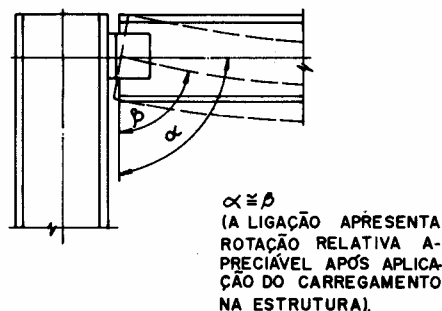
A ligação é tal que o ângulo entre os elementos estruturais que se interceptam permanece essencialmente o mesmo após o carregamento da estrutura, com uma restrição à rotação da ordem de 90 por cento ou mais daquela teórica necessária à ocorrência de nenhuma rotação (fig 2a).

### LIGAÇÃO FLEXÍVEL

Neste caso a restrição à rotação relativa entre os elementos estruturais deve ser tão pequena quanto se consiga obter na prática.

No caso de vigas, sujeitas à flexão simples, por exemplo, a ligação flexível transmite apenas a força cortante.

A ligação é considerada flexível se a rotação relativa entre as partes, após o carregamento, atingir 80 por cento ou mais daquela teoricamente esperada caso a conexão fosse totalmente livre de girar (fig. 2b).



(b) LIGAÇÃO FLEXÍVEL

Fig. 2: Ligações Rígida e Flexível

### LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA

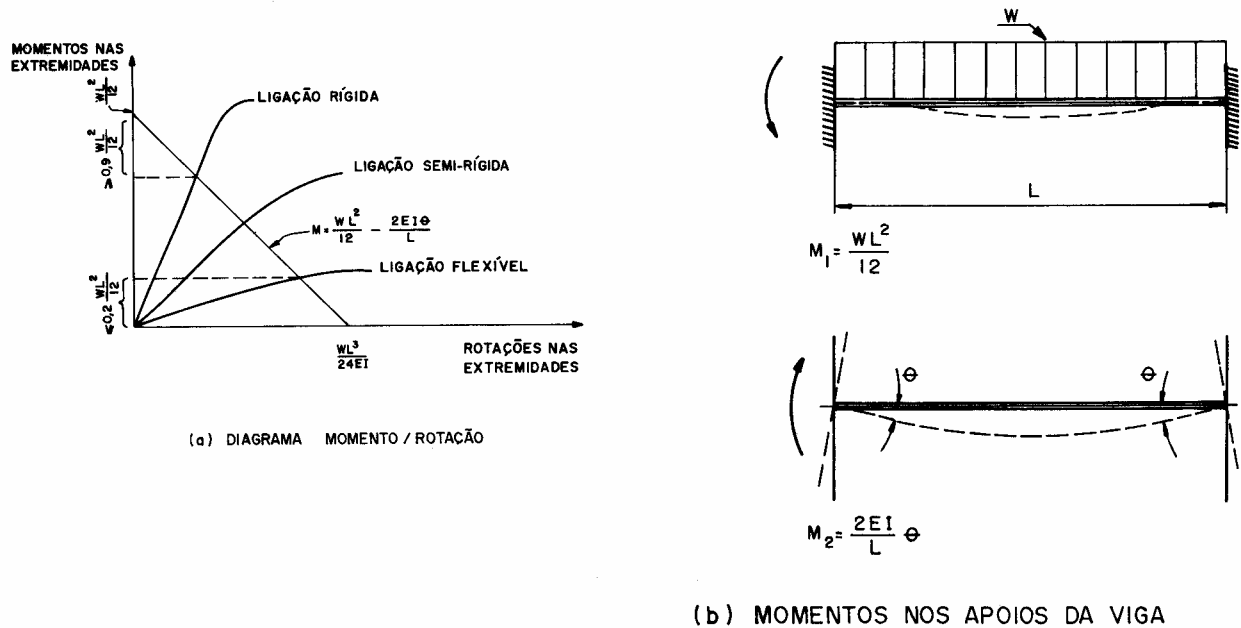
Nesse caso a restrição à rotação está entre 20 e 90 por cento daquela teoricamente necessária para evitar qualquer rotação.

Então o momento transmitido através da conexão não é nem zero (ou próximo de zero) como no caso de ligações flexíveis e nem o momento máximo (ou próximo dele) como no caso de conexões rígidas.

Para que se possa utilizar a ligação semi-rígida, deverá ser conhecida primeiro a relação de dependência entre o momento resistente e a rotação.

As ligações semi-rígidas são raramente utilizadas, devido à dificuldade de se estabelecer esta relação, e não serão abordadas nesse trabalho.

Para apresentar graficamente o comportamento dos três tipos de ligação, pode ser traçado o diagrama Momento/Rotação para diversas ligações, conforme figura 3.



**Fig. 3: Comportamento das Ligações**

Nela estão indicadas as curvas relativas às ligações rígidas, semi-rígidas e flexíveis e também a reta que relaciona momentos e rotações nos apoios para uma viga submetida a carga uniforme.

Para a viga com carga uniforme temos:

- considerando as conexões nas extremidades teoricamente rígidas, o momento nos apoios será (fig. 3b):

$$M_1 = \frac{WL^2}{12}$$

- considerando que a ligação não é teoricamente rígida e permite alguma rotação das seções dos apoios ( $\theta$ ), o alívio de momento nos apoios será (fig. 3b):

$$M_2 = \frac{4EI}{L}\theta - \frac{2EI}{L}\theta = \frac{2EI}{L}\theta$$

- o momento real nos apoios será a soma dos dois valores:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{WL^2}{12} - \frac{2EI}{L}\theta$$

- para  $\theta = 0$  (ligação teoricamente rígida)

$$M = \frac{WL^2}{12}$$

- para  $M = 0$  (ligação teoricamente flexível)

$$M = \frac{WL^3}{24EI}$$

que é a rotação nos apoios da viga biapoiada.

### 3.2 – SEGUNDO OS MEIOS DE LIGAÇÃO

As ligações podem ser soldadas e/ou aparafusadas, sendo que, na maioria das vezes, o cálculo da ligação implica na verificação de grupos de parafusos e de linhas de solda.

Os parafusos devem resistir a esforços de tração e/ou cisalhamento, ao passo que as soldas devem resistir a tensões de tração, compressão e/ou cisalhamento.

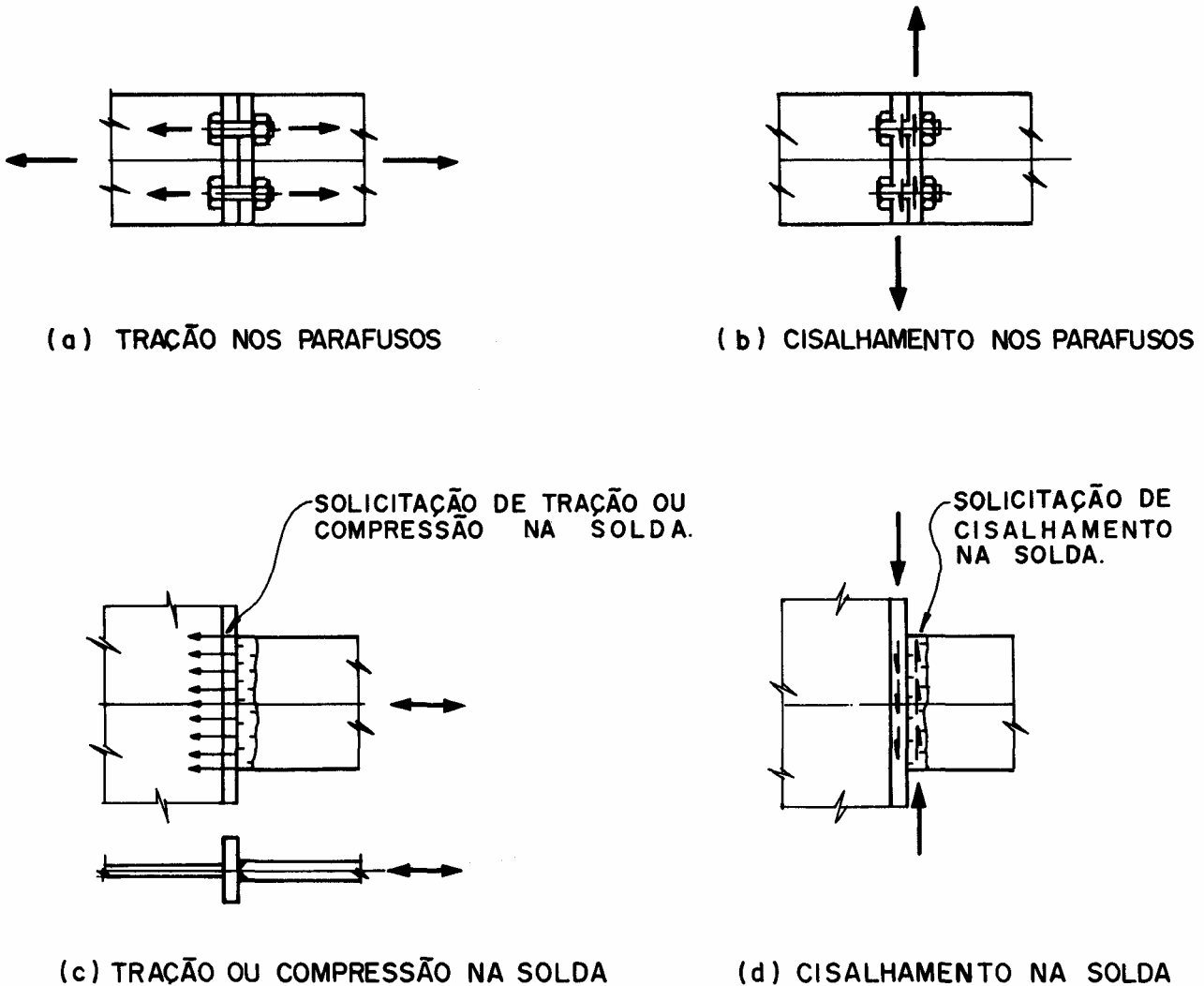
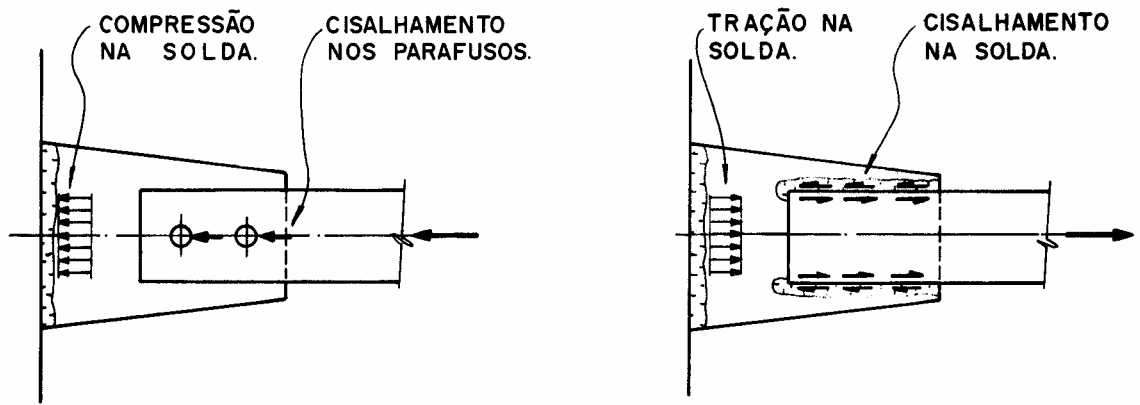


Fig. 4: Esforços em Parafusos e em Soldas

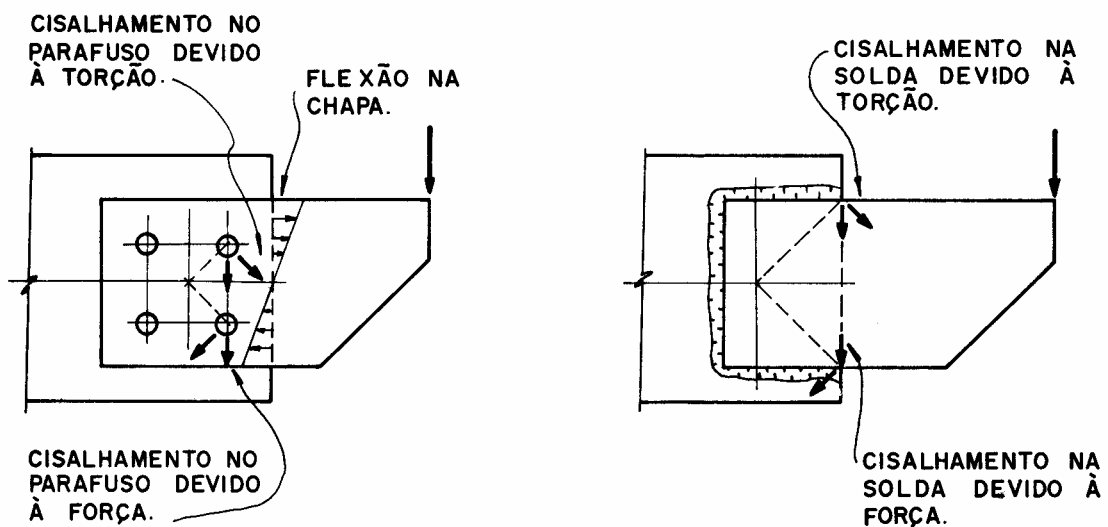
### 3.3 - SEGUNDO OS ESFORÇOS SOLICITANTES

Dependendo dos esforços solicitantes e das posições relativas desses esforços e dos grupos de parafusos ou linhas de solda resistentes, as ligações podem ser dos seguintes tipos básicos:

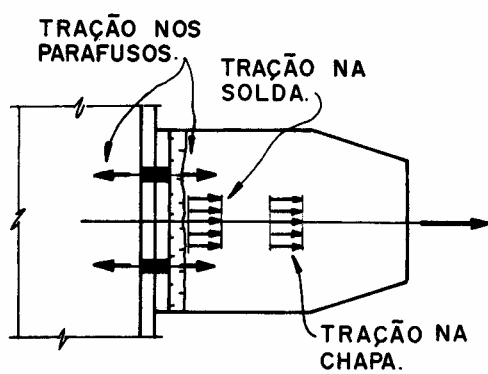
- cisalhamento centrado (fig. 5a);
- cisalhamento excêntrico (fig. 5b);
- tração ou compressão (fig. 5c);
- tração ou compressão com cisalhamento (fig. 5d).



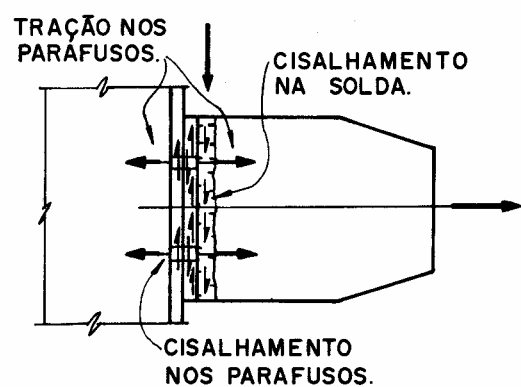
(a) CISALHAMENTO CENTRADO



(b) CISALHAMENTO EXCÊNTRICO



(c) TRAÇÃO CENTRADA



(d) TRAÇÃO COM CISALHAMENTO

Fig. 5: Esforços Solicitantes na Ligação

Os esforços solicitantes podem ainda ser constantes ao longo da vida útil da ligação (estaticamente aplicados) ou variáveis ao longo dela (dinamicamente aplicados). Neste trabalho serão analisadas apenas as ligações submetidas ao primeiro tipo de esforço.

Para ligações submetidas a esforços variáveis ao longo da vida útil, a NBR 8800, anexo M, deverá ser consultada para as verificações adicionais.

### **3.4 - LIGAÇÕES DE FÁBRICA E DE CAMPO**

Nas ligações de fábrica, o meio de ligação utilizado normalmente é a solda.

Nas ligações a serem montadas no campo, utiliza-se preferencialmente os parafusos à solda.

A NBR 8800, item 7.1.10 indica as ligações onde devem ser usados solda ou parafuso de alta resistência e aquelas em que podem ser feitas com parafusos comuns ASTM A-307 ou ISO 4.6.



# ***Capítulo 4***

---

## **Considerações Sobre Soldas**

## 4.1 – TIPOS DE SOLDA

Os principais tipos de cordões de solda utilizados na ligação são os de filete e os de

entalhe de penetração total ou parcial, que estão indicados na Fig. 6.

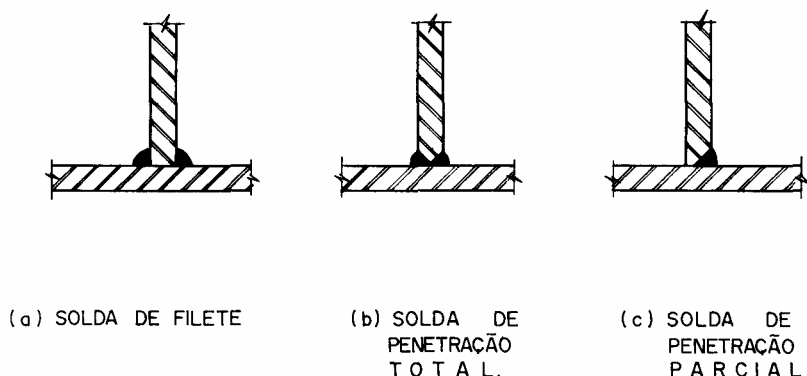


Fig. 6 Tipos Principais de Cordões de Solda

De acordo com a NBR 8800 os processos de soldagem e as técnicas de execução de estruturas soldadas devem ser conforme o “Structural Welding Code” AWS D1.1-82, da American Welding Society, exceção feita aos itens 2.3.4 (garganta efetiva na combinação de solda de filete com solda de penetração parcial), 2.5 (solda de penetração parcial sujeita a tensão normal ao longo de seu eixo longitudinal) e seção 9 (projeto de pontes novas).

## 4.2 – SOLDAS DE FILETE

Para as soldas de filete são feitas as seguintes definições (fig. 7):

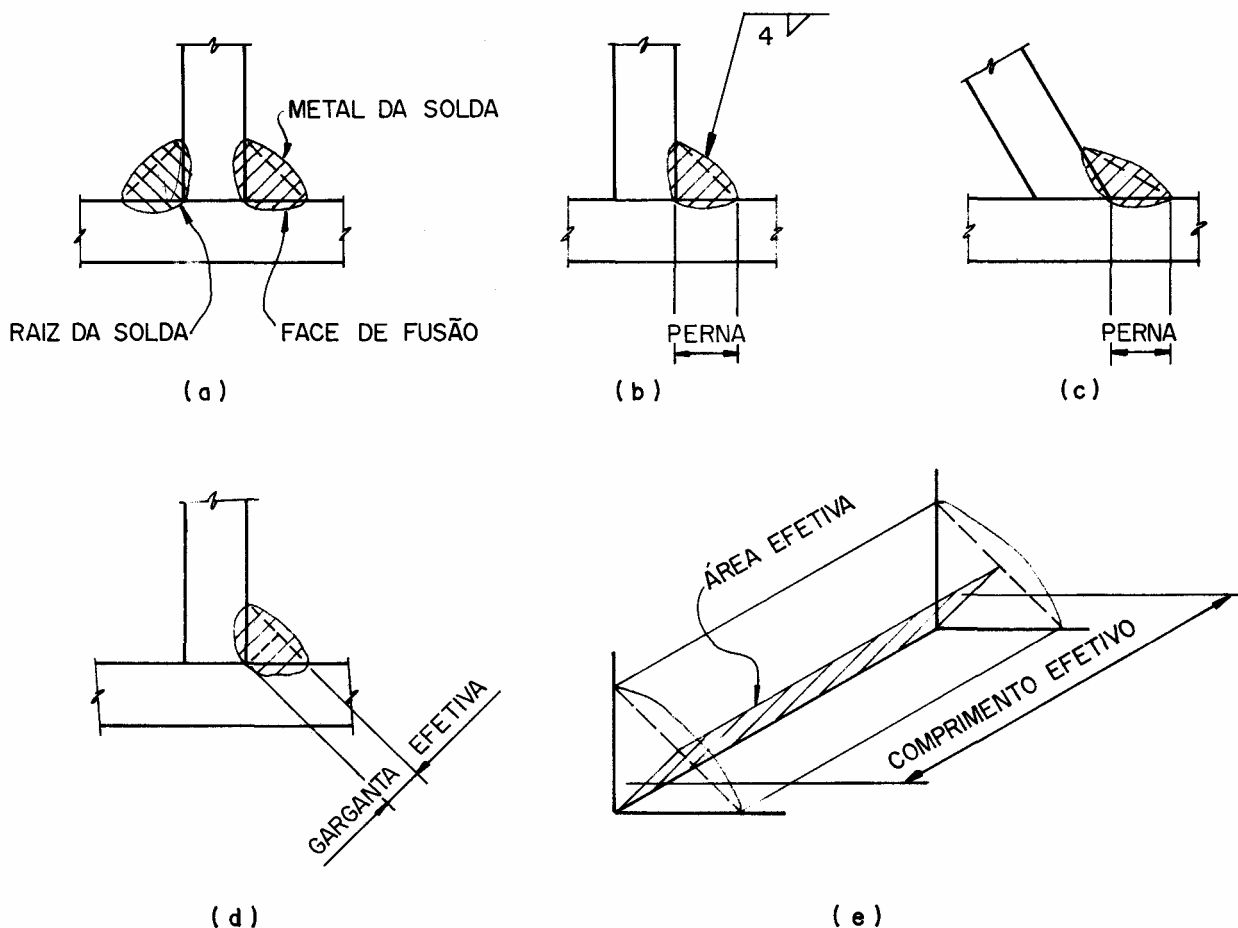
- *face de fusão*: região da superfície original do metal base onde ocorreu a fusão do metal base e do metal da solda (fig. 7a)
- *raiz da solda*: linha comum às duas faces de fusão (fig. 7a)
- *perna do filete*: menor dos lados, medidos nas faces de fusão, do maior triângulo inscrito dentro da seção transversal da solda.

Normalmente os dois lados do triângulo são iguais, conforme as figuras 7b e 7c.

O filete de solda é especificado através da dimensão de sua perna. Assim na figura 7b é especificado um filete com a perna de 4mm.

- *garganta efetiva*: é a distância entre a raiz da solda e o lado externo do triângulo inscrito.
- *comprimento efetivo da solda*: é o comprimento da linha que liga os pontos médios das gargantas efetivas ao longo do filete (fig. 7e).
- *área efetiva,  $A_w$* : é a área considerada como resistência da solda, igual à garganta efetiva multiplicada pelo comprimento efetivo (fig. 7e).
- *área teórica da face de fusão,  $A_{MB}$* : é a área considerada como de resistência no metal base junto à solda, igual à perna do filete multiplicada pelo comprimento efetivo.
- *disposições de projeto*: para maiores detalhes quanto às considerações de projeto de soldas de filete, tais como compatibilidade entre o metal da solda e o metal base, resistências de cálculo de soldas, limitações das soldas de filete e outras, a NBR 8800 deverá ser consultada.

As aplicações das disposições da NBR 8800 serão mostradas nos exemplos de projeto de ligações a serem analisados.



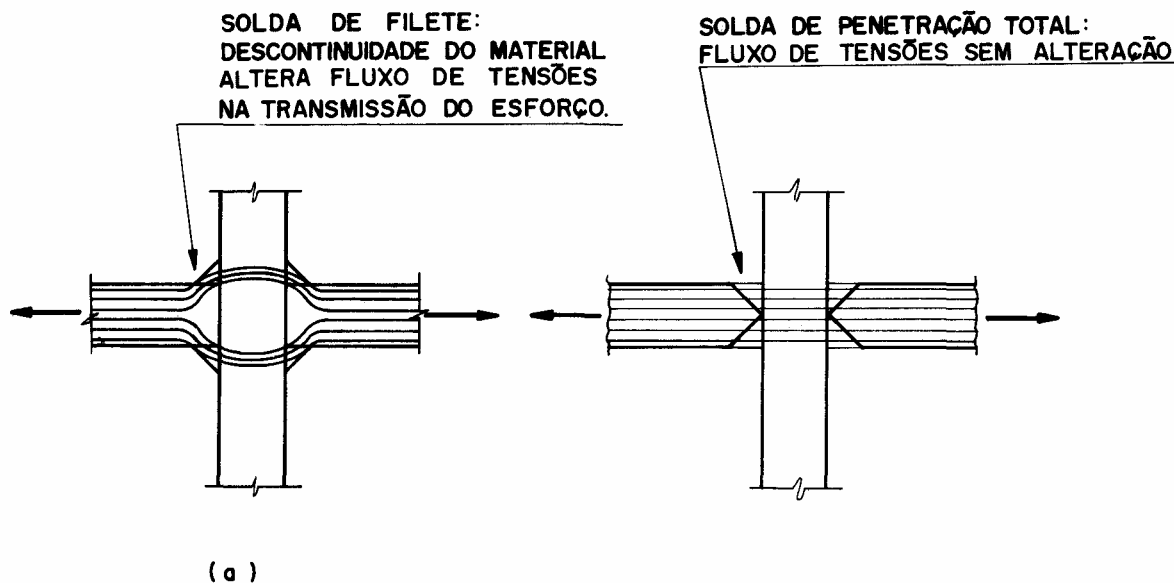
**Fig. 7: Soldas de Filete**

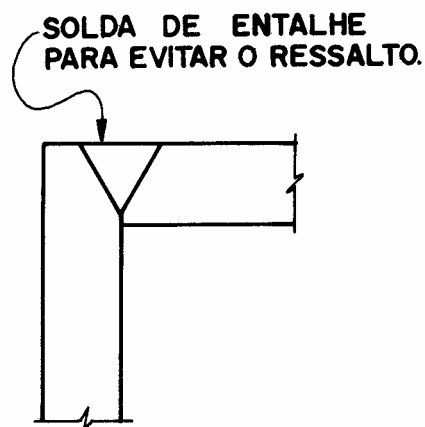
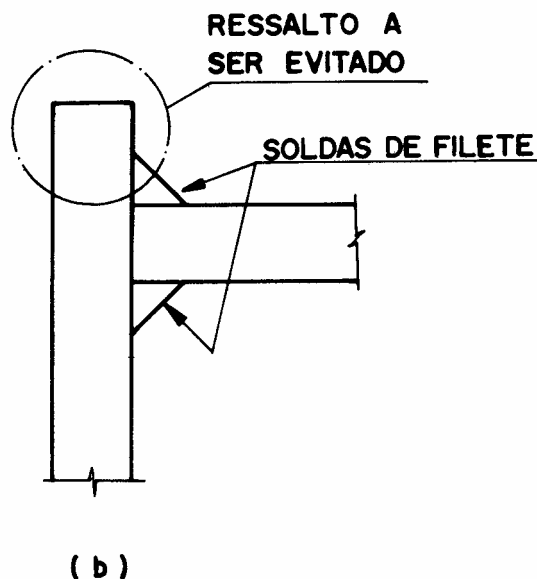
### 4.3 – SOLDAS DE ENTALHE

As soldas de entalhe de penetração total (ou parcial) são utilizadas quando se deseja manter a continuidade total (ou parcial) da espessura do elemento conectado para a transmissão do esforço através da ligação ou quando, por

questões construtivas, a solda de filete não puder ser empregada (figs. 8a e 8b).

A solda de filete é geralmente mais econômica que a de entalhe por não necessitar do trabalho de chanfro nas chapas.





As seguintes definições e notações feitas para as soldas de entalhe (fig 8c):

$\alpha$  = ângulo do chanfro

S = profundidade do chanfro

f = nariz do chanfro

r = raio do chanfro

R = abertura da raiz

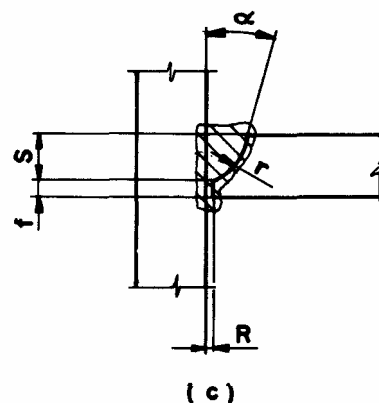


Fig. 8: Soldas de Entalhe

- *garganta efetiva*: a garganta efetiva de uma solda de entalhe de penetração total é a menor espessura das chapas conectadas;

para soldas de penetração parcial, a NBR 8800 deverá ser consultada.

- *comprimento efetivo*: é o comprimento real da solda que, no caso da solda de entalhe, deve coincidir com a largura da peça ligada;
- *área efetiva*: é o produto da garganta efetiva pelo comprimento efetivo;
- *disposições de projeto*: para demais considerações de projeto, tais como limitações aplicáveis, resistências de cálculo etc, a NBR 8800 deverá ser consultada.

#### 4.4 - TABELAS PARA ESPECIFICAÇÃO DE SOLDA

Visando facilitar o projeto das ligações soldadas, o MANUAL BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, VOL III, apresenta uma série de tabelas contendo a simbologia de soldagem, exemplos de soldas e as juntas soldadas pré-qualificadas, que são isentas de testes e certificados de garantia de qualidade, quando os materiais e os procedimentos utilizados forem conforme a AWS D.1.1.

# ***Capítulo 5***

---

## **Considerações Sobre Parafusos**

### 5.1- PARAFUSOS COMUM E DE ALTA RESISTÊNCIA

Os parafusos utilizados nas construções metálicas são normalmente o comum (sendo o mais utilizado o ASTM A-307) e os de alta resistência (especialmente o ASTM A-325 e o ASTM A-490).

Os parafusos de alta resistência são montados com protensão (torque especificado de montagem) e requerem cuidados especiais com relação às arruelas e ao acabamento das superfícies em contato das partes ligadas.

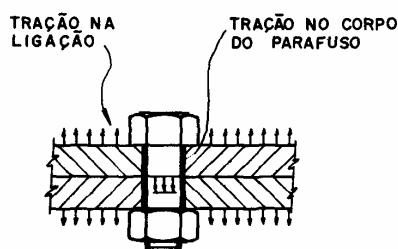
Os parafusos comuns são montados sem especificação de torque de montagem e não requerem aqueles cuidados especiais.

Os parafusos de alta resistência são usados em ligações de mais responsabilidade enquanto os comuns são utilizados em ligações não estruturais ou secundárias.

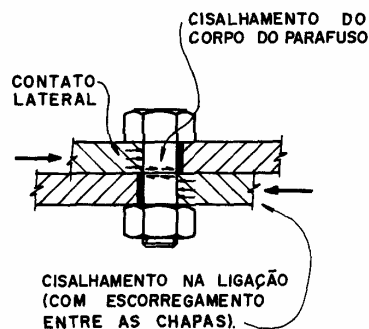
A NBR 8800, na seção 7.1.10, especifica a aplicabilidade dos parafusos de acordo com a ligação.

### 5.2 - TRANSMISSÃO DOS ESFORÇOS ATRAVÉS DOS PARAFUSOS

Nos parafusos comuns os esforços de tração são transmitidos diretamente através de tração no corpo do parafuso e os esforços de cisalhamento são transmitidos por cisalhamento do corpo do parafuso e o contato de sua superfície lateral com a face do furo, devido ao deslizamento entre as chapas ligadas (fig. 9).



(a) TRACÃO



(b) CISALHAMENTO

**Fig 9 Transmissão dos Esforços em Parafusos Comuns**

Nos parafusos de alta resistência, montados com protensão, as superfícies de contato das chapas ficam firmemente pressionadas umas contra as outras através dos “cones de pressão” (fig 10-a)

Simplificadamente ele pode ser considerado como um cilindro de pressão, constituído por regiões circulares das chapas, altamente comprimidas, com o parafuso no centro, altamente tracionado (figs. 10a e 10b).

Dessa forma, o mecanismo de transmissão de esforços é tal que, por questões de elasticidade e pela grande área do cilindro de pressão e pequena área do parafuso, o esforço de tração é absorvido no sistema através da diminuição de pressão do cilindro e pequeno aumento de tração no parafuso (fig. 10c).

Sendo  $\alpha'$  a relação entre a área do parafuso e a área do cilindro de pressão e P o esforço externo de tração aplicado na ligação, é demonstrado que o esforço de protensão no parafuso é acrescido de  $\left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)(P)$  enquanto o cilindro de pressão tem sua pressão reduzida por uma força igual a  $\left(\frac{1}{1+\alpha}\right)(P)$ .

Como  $\alpha$  é um valor pequeno, o acréscimo de tração no parafuso é bem inferior à força que reduz a pressão no cilindro.

Para valores das protensões de montagem dos parafusos ver a tabela 19 da NBR 8800 reproduzida no anexo (tabela 1.1).

Os esforços de cisalhamento nas ligações com parafusos de alta resistência são transmitidos ou por atrito, devido à pressão entre as partes ligadas, nas chamadas ligações por atrito, ou por contato do corpo do parafuso com as paredes do furo, com cisalhamento do

corpo do parafuso, nas chamadas ligações por contato.

De acordo com a NBR 8800, as duas formas de transmissão de esforço não podem ser superpostas, sendo a resistência última do parafuso independente do atrito entre as partes.

A protensão dada quando da montagem dos parafusos é a mesma para ligações por atrito e por contato.

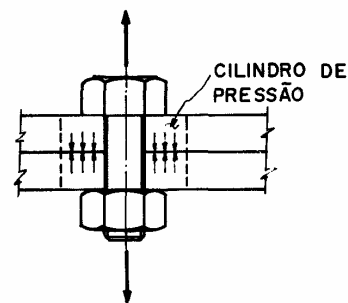
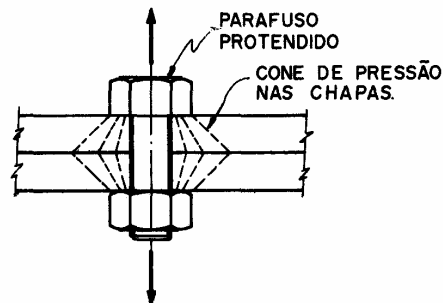
A diferença entre elas está no acabamento exigido para as superfícies de deslizamento das chapas e no desempenho, em função do carregamento, ao longo da vida útil:

- a ligação por contato é indicada para carregamentos predominantemente estáticos, onde o eventual deslizamento

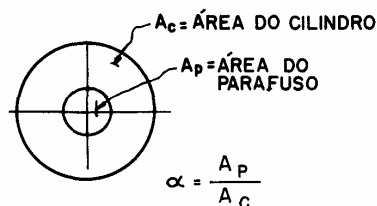
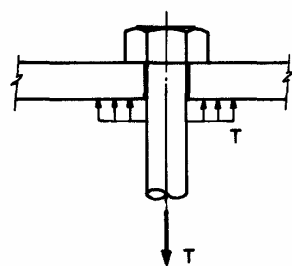
entre as partes ligadas não afeta a vida útil dos parafusos e da própria ligação e nem o comportamento global da estrutura;

- a ligação por atrito é indicada para carregamentos dinâmicos e para os casos em que qualquer deslizamento entre as partes ligadas possa afetar o comportamento previsto para a estrutura.

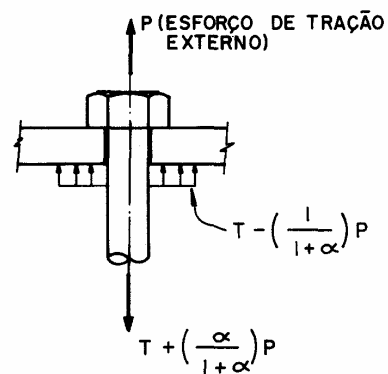
A tabela 15 da NBR 8800 apresenta as condições das superfícies parafusadas para que a ligação possa ser considerada por atrito bem como apresenta os correspondentes coeficientes de atrito para essa consideração.



(a) CONE E CILINDRO DE PRESSÃO



(b) PARAFUSO PROTENDIDO ANTES DO ESFORÇO EXTERNO



(c) PARAFUSO PROTENDIDO APÓS O ESFORÇO EXTERNO.

**Fig. 10 – Transmissão dos Esforços Através do Parafuso de Alta Resistência**

Em ambas as ligações, além dos parafusos, deverão ser verificados o esmagamento do furo, o rasgamento entre os furos e entre o furo e a borda da chapa (fig. 11); tratando-se de estados limites últimos, todas as verificações deverão ser feitas para as solicitações de cálculo, que são aquelas afetadas do coeficiente  $\gamma$  de ponderação das ações.

No caso da ligação por atrito deverá ser verificada adicionalmente a resistência ao deslizamento para ações nominais nos parafusos (sem o coeficiente  $\gamma$ ) por ser este um estado limite de utilização, exceto que, se o efeito da carga permanente for favorável, esta deve ser multiplicada por 0,75.

Para efeito de cálculo, as tensões atuantes de tração e cisalhamento nos parafusos são determinadas com base na área nominal do parafuso,  $\frac{\pi d^2}{4}$ . Nas resistências de cálculo é levada em conta a redução devida à rosca.

### 5.3 – MÉTODOS DE APERTO:

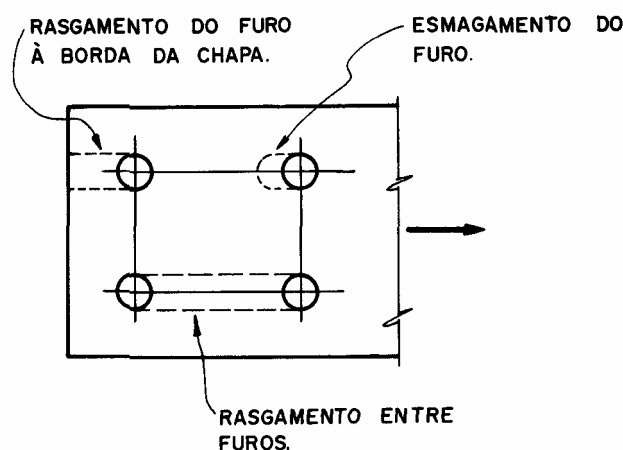
Para métodos de aperto dos parafusos de alta resistência, inspeção das juntas aparafusadas e considerações de ordem geral, ver item 7.7 da NBR 8800.

### 5.4 – FUROS PARA OS PARAFUSOS

A NBR 8800 prevê quatro tipos de furos para parafusos: padrão, alargado, pouco alongado e muito alongado.

O tipo mais usual, e que será abordado aqui, é o padrão, com diâmetro igual ao diâmetro do parafuso mais 1,5mm, no caso de parafuso milimétrico, ou diâmetro do parafuso mais 1/16", no caso de parafuso em polegada.

Para dimensões e usos dos demais furos a NBR 8800, item 7.3.4, deverá ser consultada.



**Fig. 11: Verificação na Chapa Devido à Presença de Furos**

### 5.5 – RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO

As resistências de cálculo dos parafusos são indicadas na NBR 8800, conforme se segue:

Ligação por contato e por atrito:

- resistência à tração: item 7.4.2.2.
- resistência à força cortante: item 7.3.2.3
- resistência à pressão de contato: item 7.3.2.4.
- resistência à tração e força cortante combinadas: item 7.3.2.5.

Ligação por atrito:

- força cortante combinada ou não com tração: item 7.3.3.2.

Para outros estados limites aplicáveis e as resistências de cálculo correspondentes, ver a NBR 8800.

A verificação das ligações será mostrada, para alguns casos usuais, nos exemplos de cálculo.

Informações complementares sobre o projeto de ligações utilizando a NBR 8800, serão obtidas no capítulo VIII do livro "Elementos das Estruturas de Aço" de Gilson Queiroz.



# ***Capítulo 6***

---

## **Exemplos de Cálculo**

Os exemplos de cálculo de ligações, mostrados a seguir, são comumente encontrados no projeto de estruturas metálicas.

Serão analisados detidamente, tanto na verificação dos elementos quanto dos meios de ligação.

Outras ligações, não cobertas pelos exemplos, deverão ser analisadas de maneira semelhante, através da utilização apropriada da NBR 8800.

Na prática o dimensionamento das ligações é simplificado, através da redução do número de verificações, com base no conhecimento e na experiência anterior e pela utilização de tabelas de ligações padronizadas, ou mesmo de programas de computador.

Dessa forma, o trabalho das extensas verificações mostradas nos exemplos a seguir, é sensivelmente reduzido.

### 6.1 – LIGAÇÃO DE PEÇA TRACIONADA

Calcular a ligação mostrada na figura 12. O esforço indicado é a solicitação de cálculo (incluindo o coeficiente de segurança).

aço ASTM A36,  $f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ ,  $f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$

eletrodos de solda E70-XX

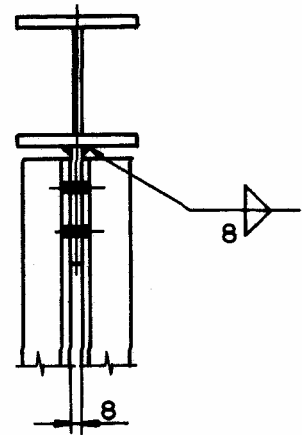
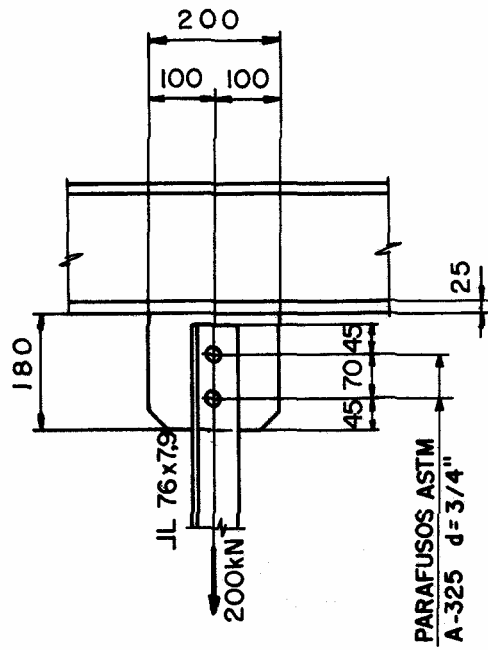
parafusos ASTM A 325,  $d = 19\text{mm}$  (3/4")

conexão por contato

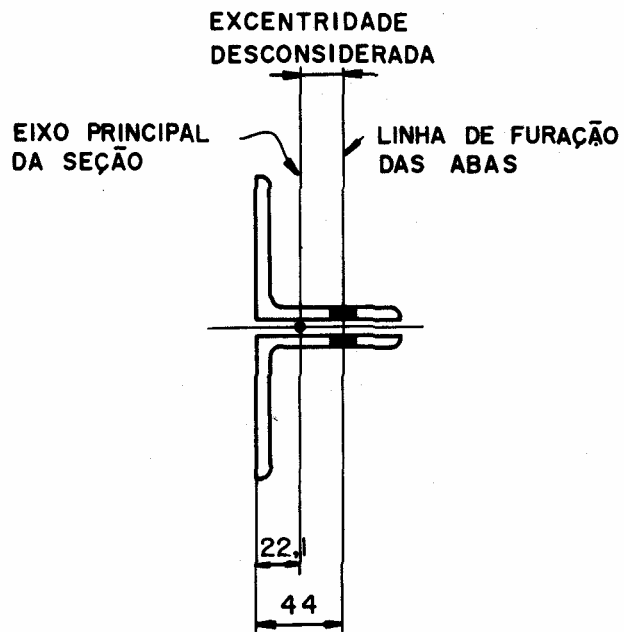
carga de 200 kN estaticamente aplicada.

#### 6.1.1 – CONSIDERAÇÕES

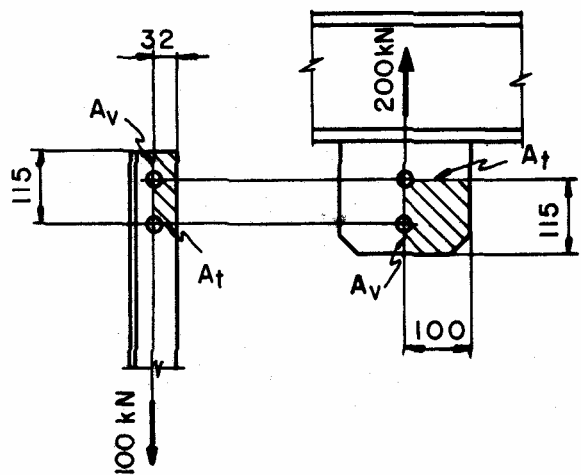
O esforço de tração atua centrado em relação ao grupo de parafusos; a pequena excentricidade existente entre o eixo principal das cantoneiras e a linha de furação das abas é normalmente desconsiderada no cálculo. (fig. 12b) (NBR 8800 – 7.1.7.2).



(a) EXEMPLO DE CÁLCULO



(b) EXCENTRICIDADE NA CANTONEIRA



(c) COLAPSO POR RASGAMENTO

Fig. 12: Ligação de Peça Tractionada

### 6.1.2 – VERIFICAÇÃO DAS CANTONEIRAS À TRAÇÃO

#### a) verificação da esbeltez:

será considerado que a esbeltez do conjunto de cantoneiras já foi verificada e é menor que 300, número máximo para peças tracionadas (NBR 8800, 5.2.6).

#### b) cálculo da área líquida efetiva (NBR 8800, 5.1.1.3):

##### - diâmetro do furo:

diâmetro do parafuso + 1,6mm =  
= 19 + 1,6 = 20,6mm (NBR 8800, tabela 16)

##### - largura bruta da cantoneira (NBR 8800, 5.1.1.1): deverá ser descontada 1 vez a espessura da cantoneira, 7,9 mm.; a aba da cantoneira é 76mm.

$$2 \times 7,6 - 0,79 = 14,4 \text{ cm}$$

##### - área líquida da cantoneira, $A_n$ :

no cálculo de  $A_n$  deve ser descontada a área do furo; o seu diâmetro é considerado 2mm maior, conforme NBR 8800, 5.1.1.2:

$$A_n = [14,4 - (2,06 + 0,2)] \times 0,79 = 9,6 \text{ cm}^2$$

##### - área líquida efetiva $A_e$ : (NBR 8800 5.1.1.3)

$$A_e = C_t \times A_n$$

$C_t = 0,75$ , para todas as barras com ligações aparafusadas com dois parafusos na direção da solicitação:

$$A_e = 0,75 \times 9,6 = 7,2 \text{ cm}^2$$

#### c) estados limites (NBR 8800, 5.2.3)

##### - escoamento da seção bruta:

$\phi_t A_g f_y$ , com  $A_g = 2 \times 11,5 = 23,0 \text{ cm}^2$  (área bruta das duas cantoneiras, então:  
 $\phi_t A_g f_y = 0,9 \times 23,0 \times 25 = 517,5 \text{ kN}$

##### - ruptura da seção líquida efetiva:

$\phi_t A_g f_u = 0,75 \times 2 \times 7,2 \times 40 = 432 \text{ kN}$ , que governa a verificação por ser menor.

#### d) verificação:

a solicitação de cálculo é 200 kN, valor menor que a resistência de cálculo afetada do coeficiente de segurança, 432kN: as cantoneiras passam com folga à tração.

### 6.1.3 – VERIFICAÇÃO DA CHAPA DE GUSSET À TRAÇÃO

#### a) cálculo das áreas

##### - área bruta da chapa de gusset;

$A_g = 20 \times 0,8 = 16 \text{ cm}^2$ , considerando-se que toda a área do gusset seja efetiva à tração na seção bruta.

##### - área líquida:

$$A_n = [20 - (2,06 + 0,2)] \times 0,8 = 14,2 \text{ cm}^2$$

#### b) estados limites:

##### - escoamento da seção bruta

$$\phi_t \times A_g \times f_y = 0,9 \times 16 \times 25 = 360 \text{ kN}$$

##### - ruptura da seção líquida efetiva:

$$\phi_t \times A_e \times F_u = 0,75 \times 14,2 \times 40 = 426 \text{ kN}$$

O primeiro valor governa a verificação, por ser menor.

#### c) verificação:

200kN < 360kN, ok.

### 6.1.4 – VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS

Deverá ser analisada a resistência do parafuso ao corte e à pressão de contato:

#### a) corte do parafuso (NBR 8800, 7.3.2.3)

##### - verificação da pega:

a soma das espessuras das duas abas da cantoneira com a do gusset deve ser menor que 5 d (NBR 8800, 7.3.5).

$$0,79 + 0,79 + 0,8 = 2,4 \text{ cm} < 5 \times 1,9 \text{ cm}, \text{ ok}$$

- resistência do parafuso ao corte:

$$\phi_v R_{nv} = \phi_v \times 0,42 \times A_p \times f_u, \text{ com:}$$

$\phi_v = 0,65$ , para parafusos ASTM A 325, planos de corte da ligação passando pela rosca e  $A_p = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 1,9^2}{4} = 2,84 \text{ cm}^2$ ,

área bruta do parafuso que pode ser retirada diretamente da tabela 1.2 deste trabalho.

$f_u = 82,5 \text{ kN/cm}^2$ , tabela 23 NBR 8800, para o ASTM A 325 com  $d \leq 25,4 \text{ mm}$ .

$\phi_v R_{nv} = 0,65 \times 0,42 \times 2,84 \times 82,5 = 64,0 \text{ kN}$ ; como são dois planos de corte para os parafusos, um para cada cantoneira, a resistência ao corte será:

$64 \times 2 = 128 \text{ kN}$ , por parafuso

- b) *resistência à pressão de contato nos furos* (NBR 8800, 7.3.2.4)

a verificação será feita para os furos na chapa de gusset que é crítica com relação às cantoneiras, que trabalham em conjunto.

- disposições construtivas (válida para as cantoneiras e chapas de gusset):

distância entre centros de furos padrão maior que  $2,7 d$  (NBR 8800, 7.3.6):

$2,7 \times 1,9 = 5,1 \text{ cm} < 7 \text{ cm}$ , conforme fig. 12; ok

distância do centro de furos padrão à borda: tabela 18 NBR 8800.

$d = 19 \text{ mm}$ , borda cortada com serra;

a distância mínima é de  $32 \text{ mm}$ , menor que  $45 \text{ mm}$ , ok.

distância máxima à borda (NBR 8800, 7.3.8):

deve ser menor que 12 vezes a espessura da cantoneira ( $12 \times 7,9 = 94,8 \text{ mm}$ ) e que  $150 \text{ mm}$ , o que realmente acontece:

$45 < 94,8$  e  $45 < 150$ ;

- pressão de contato com rasgamento entre dois furos consecutivos (NBR 8800, 7.3.2.4)

$$\phi R_n = 0,75 R_n$$

$$\text{com } R_n = \alpha A_b f_u$$

$$\alpha = \frac{s}{d} - 2 \leq 2,4, \text{ com:}$$

$s = 7,0 \text{ cm}$ , distância entre centros de furos

$d = 1,9 \text{ cm}$ , diâmetro do parafuso

$\eta_1 = 0,5$ , para furo padrão, conforme tabela 13 da NBR 8800;

$$\alpha = \frac{7}{1,9} - 0,5 = 3,2 \text{ que deve ser } \leq 2,4.$$

$$\therefore \alpha = 2,4$$

- pressão de contato para rasgamento entre furo e borda:

idem fórmula anterior, com

$$\alpha = \left( \frac{e}{d} \right) - \eta_2 \leq 2,4$$

$e = 4,5 \text{ cm}$ , distância entre a linha de centro do furo e a borda da capa

$\eta_2 = 0$ , para furo padrão, conforme tabela 13

$$\alpha = \frac{4,5}{1,9} - 0 = 2,4 \text{ cm}$$

$$\therefore \text{será usado } \alpha = 2,4.$$

$A_b$  = área efetiva para pressão de contato (NBR 8800, 7.3.1.1)

$$A_b = 1,9 \times 0,8 = 1,52 \text{ cm}^2$$

$f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$  para o ASTM A-36;

então,

$$\phi R_n = \phi \alpha A_b f_u =$$

$$= 0,75 \times 2,4 \times 1,52 \times 40 = 109 \text{ kN},$$

para um parafuso;

como esse valor é menor que o anteriormente achado para a resistência ao corte,  $126 \text{ kN}$ , ele deve ser usado.

As resistências de cálculo do parafuso ao corte e esmagamento podem ser obtidas diretamente das tabelas reproduzidas nesta publicação:

- resistência ao corte (tabela 1.4.b): com  $d = \frac{3}{4}$ ", parafuso ASTM A 325 e rosca situada no plano de corte:

$$\phi_v R_{nv} = 64,19 \text{ kN},$$

valor próximo do calculado anteriormente,  $64 \text{ kN}$ .

- resistência à pressão de contato (tabelas 1.5.a e b) considerando o aço ASTM A-36, parafusos  $d = \frac{3}{4}$ " e a espessura da chapa de gusset de 8 mm: para rasgamento entre dois furos, com  $s = 70$  mm:

$$\phi R_n = 13,72 \times 8 = 109,76 \text{ kN}$$

para rasgamento entre furo e borda, com  $e = 45$  mm,

$\phi R_n = 13,50 \times 8 = 108,0 \text{ kN}$  que é o menor valor e coincide com o valor calculado anteriormente, 109 kN.

- verificação:

como são dois parafusos resistindo ao esforço de 200 kN, o esforço por parafuso é 100 kN, menor que 109 kN.

### 6.1.5 – SOLDA DA CHAPA DE GUSSET NA VIGA

- a) solda mínima:

a solda da chapa de gusset na mesa da viga, será de filete.

A espessura mínima para a solda de filete será função da chapa mais espessa a ser soldada, no caso a espessura da mesa, 25 mm.

De acordo com a tabela II da NBR 8800, reproduzida nesta publicação (tabela (2,3), a espessura mínima para a solda de filete, no caso de chapa de 25 mm é 8 mm  $\therefore$  serão usados filetes de 8 mm conforme indicado na fig. 12.

- b) solicitação da solda:

de acordo com a NBR 8800, a "solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas".

No caso a solda será solicitada apenas pela força de tração de 200 kN; considerando os dois filetes de 200 mm, a força na solda por cm de filete é

$$\frac{200}{2 \times 20} = 5 \text{ kN/cm de filete.}$$

- c) estados limites (tabela 18, NBR 8800)

a verificação é feita comparando a resultante vetorial de forças, com a resistência do filete ao cisalhamento, conforme os dois estados limites:

- escoamento do metal base:

$$\phi R_n = 0,9 \times 0,6 \times A_{MB} \times f_y$$

$A_{MB}$  = área teórica da face de fusão, igual a  $0,8 \times 1 \text{ cm}^2$  para um filete de 8 mm de perna e comprimento 1 cm;

$$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2 \text{ para o ASTM A-36}$$

$$\phi R_n = 0,9 \times 0,6 \times 0,8 \times 25 = 10,8 \text{ kN/cm}$$

- ruptura do metal da solda:

$$\phi R_n = 0,75 \times 0,6 \times A_w \times F_w$$

$A_w$  = área efetiva da solda (fig. 7e) igual a  $0,8 \times 1 \times 0,707 \text{ cm}^2$  para 1 cm de cordão de 8 mm de perna,

$F_w = 48,5 \text{ kN/cm}^2$ , resistência do metal da solda para o E70, tabela 9 NBR 8800;

$$\begin{aligned} \phi R_n &= 0,75 \times 0,6 \times 0,8 \times 1,0 \times 0,707 \times 48,5 = \\ &= 12,3 \text{ kN/cm} \end{aligned}$$

a verificação será feita para o menor dos dois valores de  $\phi R_n$ , 10,8 kN/cm.

Este valor pode ser obtido diretamente da tabela 2.4, Resistências de Cálculo  $\phi R_n$  por Milímetro de Filete de Solda (kN/mm) reproduzida nesta publicação.

Para aço com  $f_y = 250 \text{ MPa}$ , eletrodo E70XX e filete de 8 mm, a resistência do cordão é 1,08 kN/mm ou 10,8 kN/cm, conforme calculado anteriormente.

- d) verificação:

$$5 \text{ kN/cm} < 10,8 \text{ kN/cm} \therefore$$

o dimensionamento da solda está folgado, mas terá que ser usado o filete de 8 mm como solda mínima para a chapa de 25 mm, conforme visto anteriormente.

### 6.1.6 – COLAPSO POR RASGAMENTO (NBR 8800, 7.5.3.2)

As possibilidades de colapso por rasgamento nas cantoneiras e na chapa de gusset estão indicadas na fig. 12c.

- estados limites:

deverão ser considerados a ruptura por cisalhamento para a área líquida de rasgamento e escoamento por cisalhamento para área bruta de rasgamento:

*ruptura:*

$$\phi R_n = 0,75 \times 0,6 \times f_u = 0,75 \times 0,6 \times 40 \\ = 18 \text{ kN/cm}^2$$

*escoamento:*

$$\phi R_n = 0,9 \times 0,6 \times f_y = 0,9 \times 0,6 \times 25 = \\ = 13,5 \text{ kN/cm}^2$$

- solicitações de rasgamento na cantoneira (considerando as áreas de tração como de cisalhamento):

- área bruta de rasgamento:

$$(3,2 + 11,5)0,79 = 11,6 \text{ cm}^2$$

então, considerando a força para cada cantoneira, 100 kN,

$$\frac{100}{11,6} = 8,62 \text{ kN/cm}^2 < 13,5 \text{ kN/cm}^2, \text{ ok}$$

- área líquida de rasgamento, descontando os dois furos para parafuso  $d = \frac{3}{4}$ :  $\frac{3}{4} + \frac{1}{16} = 2,06 \text{ cm}$

$$(3,2 + 11,5 - 2 \times 2,06)0,79 = 8,36 \text{ cm}^2$$

então

$$\frac{100}{8,36} = 12,0 \text{ kN/cm}^2 < 18 \text{ kN/cm}^2, \text{ ok}$$

- solicitações de rasgamento na chapa de gusset.

- área bruta de rasgamento

$$(10 + 11,5) \times 0,8 = 17,2 \text{ cm}^2$$

então, considerando a força de cálculo de 200 kN para o gusset:

$$\frac{200}{17,2} = 11,6 \text{ kN/cm}^2 < 13,5 \text{ kN/cm}^2, \text{ ok}$$

- área líquida de rasgamento, descontando também os dois furos:

$$(10 + 11,5 - 2 \times 2,06)0,8 = 13,9 \text{ cm}^2$$

então

$$\frac{200}{13,9} = 14,4 \text{ kN/cm}^2 < 18 \text{ kN/cm}^2, \text{ ok}$$

### 6.1.7 – SOLDA DA ALMA NA VIGA NA REGIÃO PRÓXIMA À CHAPA DE GUSSET.

A solda da alma na mesa deverá resistir, além dos esforços de cisalhamento provenientes do carregamento da viga, o esforço localizado de 200 kN aplicado pelo gusset.

No exemplo foi admitido que essa solda resiste a essas solicitações.

## 6.2 – LIGAÇÃO APARAFUSADA COM CISALHAMENTO EXCÊNTRICO

Calcular a ligação mostrada na figura 13. O esforço indicado é a solicitação de cálculo (incluindo o coeficiente de segurança).

aço ASTM A-36

eletrodo de solda E70-XX

parafusos ASTM A-325,  $d = 7/8$ "

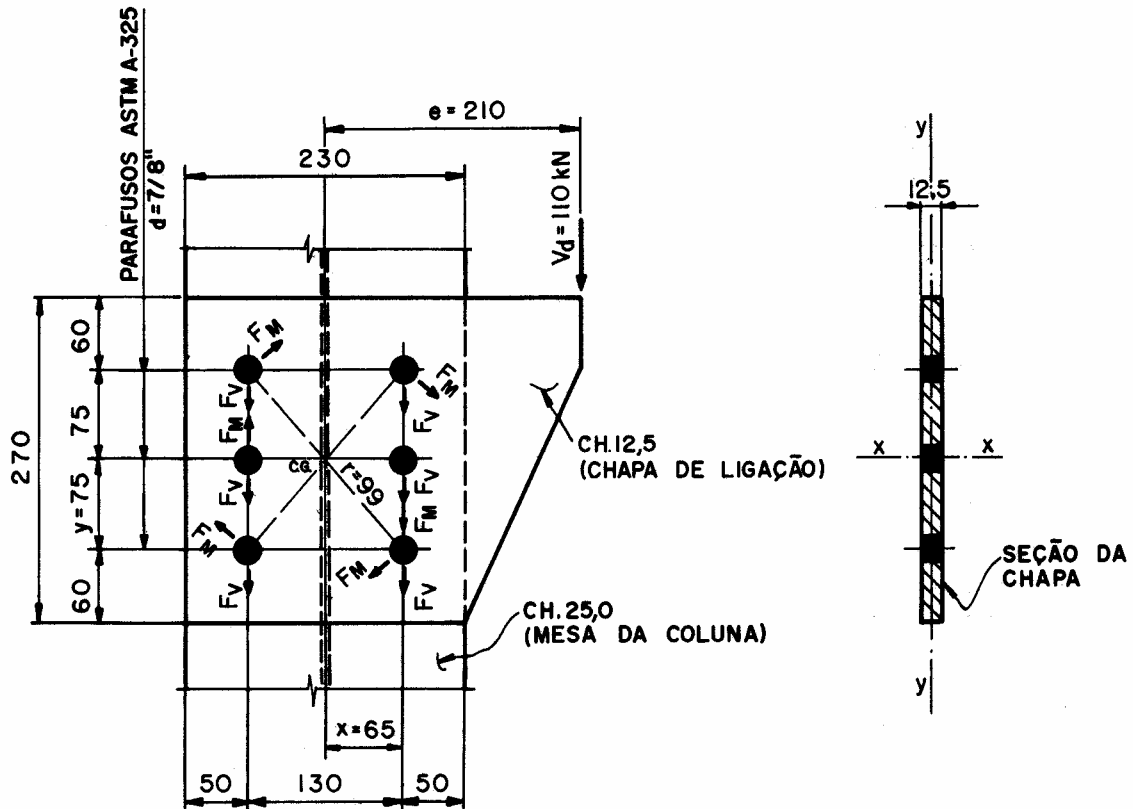
conexão por atrito

### 6.2.1 – CONSIDERAÇÕES

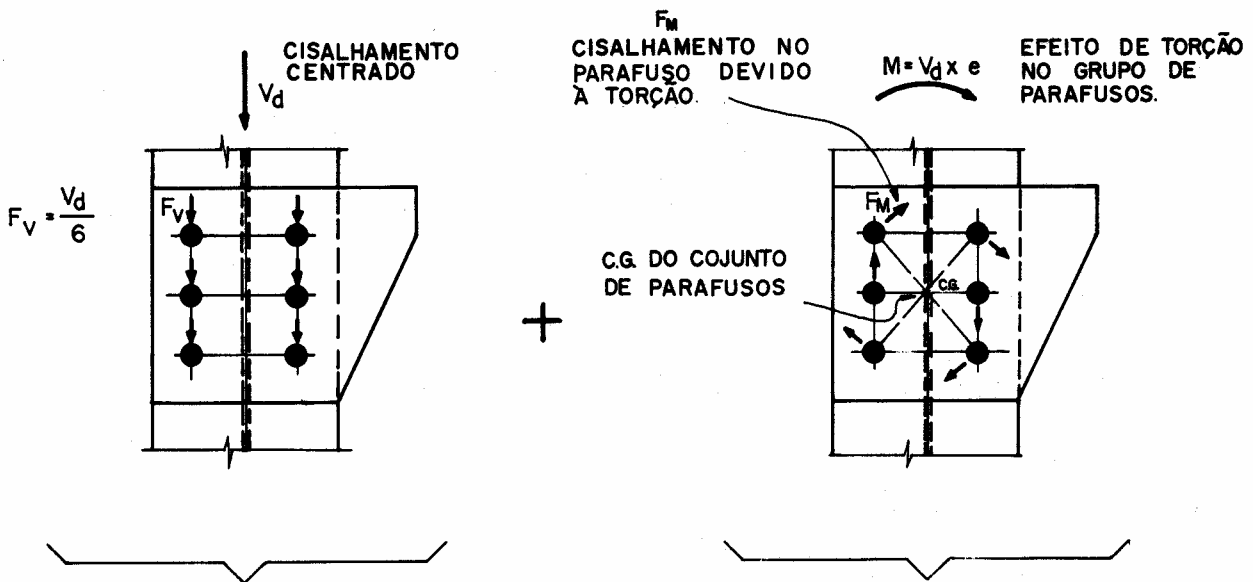
O método usual de dimensionamento de ligações com cisalhamento excêntrico é o elástico, a seguir aplicado:

Os esforços nos parafusos são obtidos pela superposição dos dois efeitos:

- a) esforço vertical de 110 kN atuando no centro de gravidade do conjunto, originando esforço de cisalhamento igual nos seis parafusos (figura 13b).

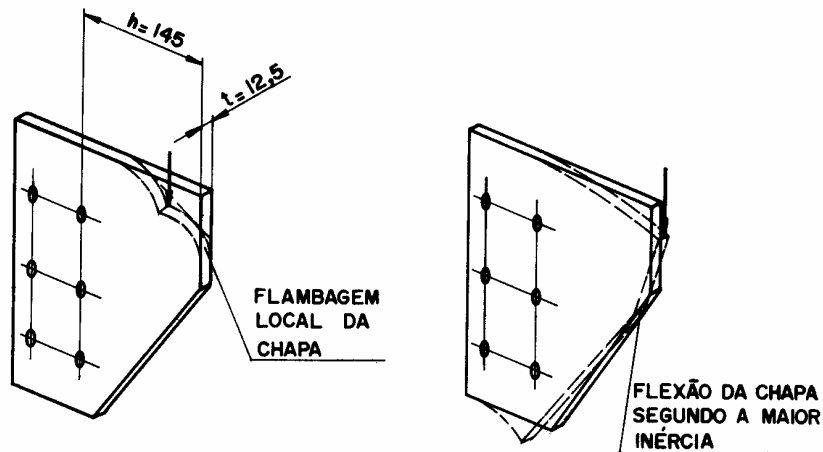


(a) DIMENSÕES GEOMÉTRICAS.



(b) CONSIDERAÇÃO DOS ESFORÇOS NOS PARAFUSOS.





(C) VERIFICAÇÃO DA CHAPA DA LIGAÇÃO

Fig. 13 Ligação Aparafusada com Cisalhamento Excêntrico

b) momento torçor cisalhando o conjunto de parafusos, admitindo-se as seguintes hipóteses:

- as placas da ligação são perfeitamente rígidas e os parafusos perfeitamente elásticos.
- a rotação da ligação produz deformação por cisalhamento nos parafusos que são proporcionais e normais ao raio que vai do C.G. do conjunto de parafusos ao parafuso considerado.

Surgem as forças  $F_M$  indicadas na fig. 13 (b).

$$F_M = \frac{M \times r}{\sum r^2}$$

$r = 9,9$  cm, distância do parafuso ao CG do conjunto;

$$F_M = \frac{2310 \times 9,9}{478,5} = 47,8 \text{ kN}, \text{ perpendicular ao raio } r \text{ conforme figura 13.}$$

- esforço resultante no parafuso:

considerando os esforços  $F_M$  e  $F_v$ , os parafusos mais solicitados são os dois extremos do lado da carga de 110 kN, conforme fig 13.

### 6.2.2 – SOLICITAÇÃO DE PARAFUSOS

a) devido ao esforço vertical:

$$F_v = \frac{110}{6} = 18,3 \text{ kN}$$

b) devido ao momento:

- $M = 110 \times e = 110 \times 21,0 = 2310 \text{ kNm}$
- momento polar de inércia do conjunto de parafusos, considerando que eles tenham área unitária:

$$\begin{aligned} \sum r^2 &= \sum (x^2 + y^2) = \\ &= 4(6,5^2 + 7,5^2) + 2(6,5^2) = \\ &= 478,5 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- esforço no parafuso mais solicitado pelo momento:

os quatros parafusos mais distantes do CG são os mais solicitados (fig. 13a):

As componentes de  $F_M$  são:

Horizontal:

$$F_M \times \frac{75}{99} = \frac{47,8 \times 75}{99} = 36,2 \text{ kN}$$

Vertical:

$$F_M \times \frac{65}{99} = \frac{47,8 \times 65}{99} = 31,4 \text{ kN}$$

resultante no parafuso:

$$R = \sqrt{36,2^2 + (31,4 + 18,3)^2} = 61,5 \text{ kN}$$

### 6.2.3 – VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS

#### a) corte do parafuso (NBR 8800, 7.3.2.3)

- verificação da pega (NBR 8800, 7.3.5) espessura da chapa da ligação mais espessura da mesa da coluna =  $12,5 + 25 = 37,5$  mm, é menor que  $5 \times d = 5 \times 22,2 = 112,5$  mm, ok.

- resistência do parafuso ao corte:

pela tabela 1.4.b, considerando parafuso ASTM A-325 com  $d = 7/8''$  e a rosca situada no plano de corte, a resistência ao corte é:

$$\phi_v R_{nv} = 87,38 \text{ kN.}$$

#### b) resistência à pressão de contato nos furos (NBR 8800, 7.3.2.4)

o cálculo será feito para a chapa da ligação que é menos espessa que a mesa da coluna e tem as mesmas distâncias entre centros de furos e bordas.

considerando as tabelas 1.5.a e b para AÇO ASTM A-36, parafusos  $d = 7/8''$  e espessura de chapa de 12,5 mm, a resistência à pressão de contato é,

- para rasgamento de contato entre dois furos, com  $s = 75$  mm,  $\phi R_n = 12,5 \times 16 = 200$  kN
- para rasgamento entre furo e borda com  $e = 50$  mm,  $\phi R_n = 12,5 \times 15 = 187,5$  kN, que é o menor dos dois valores, sendo o dimensionamento governado pelo valor anteriormente achado,  $\phi_v R_{nv} = 87,38$  kN, que ainda é menor.
- verificação:

a solicitação de cálculo no parafuso, 61,5 kN é menor que a resistência de cálculo, 87,38 kN, ok.

#### c) resistência ao deslizamento (NBR 8800, 7.3.3.2):

como a ligação é por atrito, ela deverá ser verificada também ao efeito de deslizamento. Conforme visto anteriormente, como este é um estado limite de utilização, o esforço no parafuso a ser considerado é o nominal;

admitindo que o coeficiente  $\gamma$  de ponderação das ações seja 1,4, a solicitação nominal do parafuso será:

$$\frac{61,5}{1,4} = 43,9 \text{ kN}$$

A resistência ao deslizamento deverá ser: (NBR 8800, 7.3.3.2)

$$\phi_v R_{nv} = \phi_v \mu \xi (T_b - T), \text{ com } \phi_v = 1$$

$T_b = 173$  kN para parafuso com  $d = 7/8''$ , igual ao esforço de protensão na montagem do parafuso, conforme tabela 19 – NBR 8800, também reproduzida neste trabalho (tabela 1.1).

$T = 0$ , força de tração no parafuso, inexistente no caso, pois o parafuso é submetido apenas ao cisalhamento;

$\mu = 0,28$ , coeficiente de atrito para superfícies laminadas e limpas de óleo e graxa, conforme tabela 15 – NBR 8800.

$\xi = 1$ , fator de redução para furo padrão.

Então,

$$\phi_v R_{nv} = 1,0 \times 0,28 \times 1(173) = 48,4 \text{ kN}$$

Este valor pode ser achado diretamente na tabela 1.6, onde estão indicados os valores de  $\phi_v R_{nv}$  para parafusos ASTM A-325 e A-490 submetidos apenas ao cisalhamento e com  $\mu = 0,28$  e  $\xi = 1$ . Para ASTM A-325 e  $d = 7/8''$  o valor é 48,44 kN, conforme anteriormente calculado.

- verificação:

a solicitação nominal de cálculo, 43,9 kN, é menor que a resistência ao deslizamento e a conexão fica verificada a este efeito.

### 6.2.4 – VERIFICAÇÃO DA CHAPA DE CONEXÃO

- flambagem local da chapa:

em geral o detalhe construtivo da ligação é projetado de modo a impedir a flambagem local da chapa, mostrada na fig. 13c.

No caso será considerado que esse impedimento não existe.

Como aproximação para verificação da flambagem local da chapa, a tabela 1 da NBR 8800 pode ser usada.

Deverá ser  $\frac{h}{t} \leq 0,55 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 16$  para o aço

A-36.

$h = 145\text{mm}$ , distância da borda livre da chapa à 1ª coluna de parafusos;

$t = 12,5\text{mm}$ , espessura da chapa;

$$\frac{h}{t} = \frac{14,5}{1,25} = 11,6 < 16, \text{ ok}$$

• verificação da chapa à flexão

A fig. 13c mostra o efeito da flexão na chapa; ela será analisada como uma viga de seção retangular fletida com relação ao eixo de maior inércia, conforme NBR 8800, 5.4.5.

A seção da chapa considerada é a que contém a 1ª coluna de parafusos (fig. 13a). Se no lugar da chapa de ligação for utilizado, por exemplo um perfil  $[\text{ ]}$ , dependendo da solicitação de cálculo, pode ser dispensada a verificação à flexão.

Características da seção da chapa:

- diâmetro efetivo do furo (NBR 8800, 5.1.1.2)

$$2,2 + 0,16 + 0,2 = 2,56 \text{ cm}$$

- momento de inércia da seção segundo y:

$$I_y = \frac{27 \times 1,25^3}{12} = 4,39 \text{ cm}^4$$

- momento de inércia da seção segundo X, descontando integralmente os furos, do lado da segurança:

$$I_x = \frac{1,25 \times 27^3}{12} - 2(1,25 \times 2,56 \times 7,5^2) = 1690 \text{ cm}^4$$

- módulo resistente elástico:

$$W_x = \frac{1690}{13,5} = 125 \text{ cm}^3$$

- área da seção:

$$A = 1,25 \times 27 = 33,8 \text{ cm}^2$$

- raio de giração segundo y:

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 0,36 \text{ cm}$$

- momento de inércia à torção

$$I_T = \frac{27 \times 1,25^3}{3} = 17,6 \text{ cm}^4$$

- módulo resistente plástico, descontados os furos:

$$z = \frac{27^2 \times 1,25}{4} - 2 \times 7,5 \times 1,25 \times 2,56 = 180,0 \text{ cm}^3$$

- valor de  $L_p$ , comprimento destravado limite para que ocorra a plastificação da seção:

$$\begin{aligned} L_p &= \frac{0,13 E r_y}{M_{pl}} \sqrt{I_T \times A} = \\ &= \frac{0,13 \times E \times r_y}{Z f_y} \sqrt{I_T \times A} = \\ &= \frac{0,13 \times 20500 \times 0,36}{180,0 \times 25} \sqrt{17,6 \times 33,8} = 5,2 \text{ cm} \end{aligned}$$

- valor de  $L_r$ , comprimento do trecho sem contenção lateral, correspondente ao momento  $M_r$ :

$$\begin{aligned} L_r &= \frac{1,95 C_b E r_y}{M_r} \sqrt{I_T A} = \\ &= \frac{1,95 C_b E r_y}{W_x f_y} \sqrt{I_T A} \end{aligned}$$

$C_b = 1$ , no caso de balanço:

$$\begin{aligned} L_r &= \frac{1,95 \times 1 \times 20500 \times 0,36}{125 \times 25} \sqrt{17,6 \times 33,8} = 112,3 \text{ cm} \end{aligned}$$

- comparação de  $L_b$  com  $L_p$  e  $L_r$ :

como a chapa não é contida lateralmente na extremidade em que atua a carga,  $L_b$  será tomado igual a duas vezes a largura  $h$ ,

$$L_b = 14,5 \times 2 = 29 \text{ cm}$$

$$L_p = 5,2 < L_b = 29,0 \text{ cm} < L_r = 112,3$$

- momento resistente

$$M_n = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}$$

$$M_n = Zf_y - (Zf_y - W_x f_y) \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}$$

$$M_n = 180 \times 25 - (180 \times 25 - 125 \times 25) \frac{29 - 5,2}{112,3 - 5,2} = 4194,4 \text{ kNcm}$$

- verificação:

solicitação de cálculo:

$$M_d = V_d \times 14,5 = 110 \times 14,5 = 1595 \text{ kNcm};$$

$$\phi_b M_n = 0,9 \times 4194,4 = 3775 \text{ kNcm};$$

$$M_d < \phi_b M_n, \text{ ok}$$

### 6.2.5 – VERIFICAÇÃO À FORÇA CORTANTE (NBR 8800, 7.5.3)

Não há problema de flambagem da chapa devido à força cortante porque o valor de  $h/t < 16$ .

- área líquida efetiva de cisalhamento na seção da chapa que não contém os furos (NBR 8800, 5.1.1.4):

$$0,67 \times A_g = 0,67 \times 27 \times 1,25 = 22,6 \text{ cm}^2$$

- área líquida efetiva de cisalhamento na seção que contém os furos:

serão descontados os furos, considerando o diâmetro nominal dos mesmos (NBR 8800, 5.1.1.4)  $22 + 1,6 = 23,6$ :

$$0,67A_g = 0,67 (27 \times 1,25 - 3 \times 1,25 \times 2,36) = 16,7 \text{ cm}^2$$

- solicitação de cálculo na seção da chapa que não contém os furos:

$$\frac{110}{22,6} = 4,9 \text{ kN/cm}^2$$

- solicitação de cálculo na seção da chapa que contém os furos:

$$\frac{110}{16,7} = 6,6 \text{ kN/cm}^2$$

- resistências de cálculo ao cisalhamento:

na seção que não contém os furos:

$$\phi R_n = 0,9 \times 0,6 \times f_y = 0,9 \times 0,6 \times 25 = 13,5 \text{ kN/cm}^2$$

na seção que contém os furos:

$$\phi R_n = 0,75 \times 0,6 \times f_u = 0,75 \times 0,6 \times 40 = 18 \text{ kN/cm}^2$$

- verificação:

as solicitações de cálculo são menores que as respectivas resistências de cálculo  $\therefore$  a chapa está verificada à força cortante.

### 6.3 – LIGAÇÃO COM PARAFUSOS TRACIONADOS

Nas ligações com parafusos de alta resistência submetidos à tração, deverá ser feita a verificação de flexão da chapa aparafusada e dos parafusos levando em conta o “efeito alavanca”.

Este efeito consiste no acréscimo de tração no parafuso e um efeito adicional de flexão na chapa de ligação devido à restrição da deformação desta chapa, conforme fig. 14.

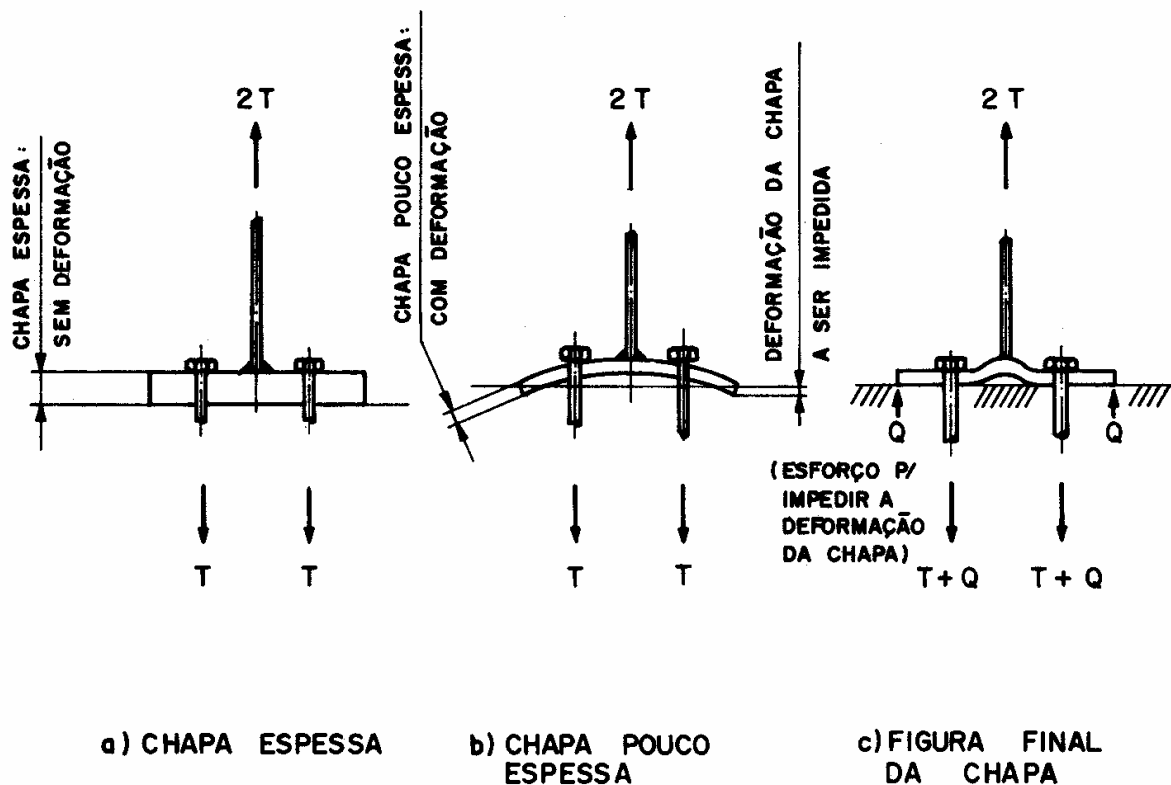


Fig. 14 Efeito de Alavanca

Se a chapa é espessa, ela praticamente não apresenta deformação por flexão sob ação da carga (fig. 14a), diferentemente do que acontece com chapas menos espessas, que tendem a se deformar sob a ação daquela carga, conforme a fig. 14b.

A outra parte da ligação impede a deformação das extremidades da chapa, originando o aparecimento da força adicional Q de tração nos parafusos, que induz flexão na chapa de ligação, conforme fig. 14c.

### 6.3.1 – CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DE ALAVANCA

São definidas as seguintes grandezas para análise do efeito de alavanca, conforme figura 15:

- largura tributária para cada parafuso: soma das duas larguras efetivas de resistência da chapa, de cada lado do parafuso, conforme definido a seguir (grandeza p na fig. 15):

- largura efetiva entre dois parafusos: o menor dos dois valores:

$$e_1/2 \text{ ou } (b + \frac{d}{2})$$

- largura efetiva entre o parafuso externo e a extremidade da chapa: o menor dos dois valores:

$$e_2 \text{ ou } (b + \frac{d}{2})$$

- resistência de cálculo à flexão da chapa na seção  $\alpha\alpha$ :

de acordo com a NBR 8800, 5.4.1.3.1 a resistência nominal à flexão da chapa será dada por  $1,25 W f_y$  (que é menor que  $Z f_y = \frac{pt^2}{4} f_y$ ):

então a resistência de cálculo é:

$$M_\alpha = \phi_b M_n = 0,9 \times 1,25 p \frac{t^2}{6} f_y = \frac{pt^2 f_y}{5,33}$$

- distância da linha de centro do parafuso à extremidade da chapa, dimensão “a” e distância à alma do T da ligação, dimensão b. Caso se tenha  $a > 1,25b$ , deve ser usado  $a = 1,25 b$  nos cálculos.

- momento na seção  $\beta\beta$  da chapa:

a seção  $\beta\beta$  é considerada deslocada de  $d/2$  a partir do centro do furo na direção da seção  $\alpha\alpha$ , onde “ $\alpha$ ” é o diâmetro do parafuso.

$$M_2 = Q (a + 0,5d) = Qa'$$

- o momento fletor  $M_\alpha$  age na largura p de chapa;

o momento  $M_2$  age na largura  $p-d'$   $\therefore$  é definida a grandeza  $\delta = \frac{p-d'}{p}$ , com:

$d'$  = dimensão do furo paralela a “p”.

- condição de resistência:

$M_2 \leq \delta M_\alpha$ , de onde se define a grandeza  $\alpha$  como relação entre o momento fletor de cálculo e a resistência ao momento fletor na seção  $\beta\beta$ :

$$\alpha = \frac{M_2}{\delta M_\alpha} \leq 1$$

por outro lado, pelo diagrama de momentos da fig. 15a:

$$M_\alpha = (T + Q)b' - Q(a' + b') = T b' - Qa'$$

$$M_2 = Qa' = T b' - M_\alpha$$

de onde se tira o valor de  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{Tb' - M_\alpha}{\delta M_\alpha} \leq 1,0 \text{ com } M_\alpha = \frac{pt^2 f_y}{5,33}$$

O predimensionamento da espessura da chapa e as escolhas do diâmetro do parafuso e da geometria da ligação ficam facilitados pela utilização da tabela 1.7.

Ela representa para diversos valores de “p” e “b” e para vários diâmetros de parafuso, em ligação com aço ASTM A-36, os valores da espessura mínima de chapa (correspondente a  $\alpha = 1$ ) e o da espessura máxima (correspondente a  $\alpha = 0$ ).

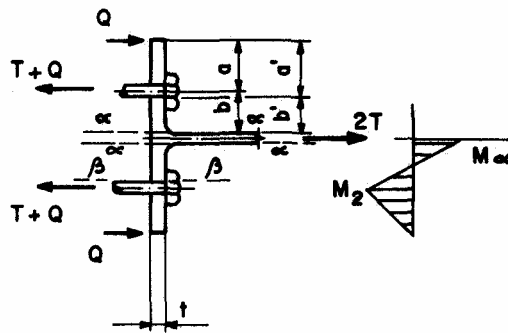
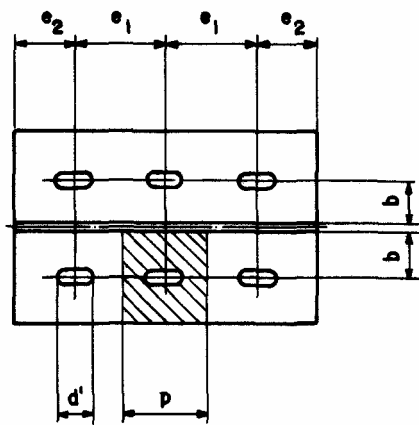
Para  $\alpha < 0$  não haverá o efeito de alavanca; nesse caso o dimensionamento será governado pelos parafusos, havendo folga na espessura da mesa.

A NBR 8800, anexo M, exige esta situação para parafusos tracionados dimensionados à fadiga.

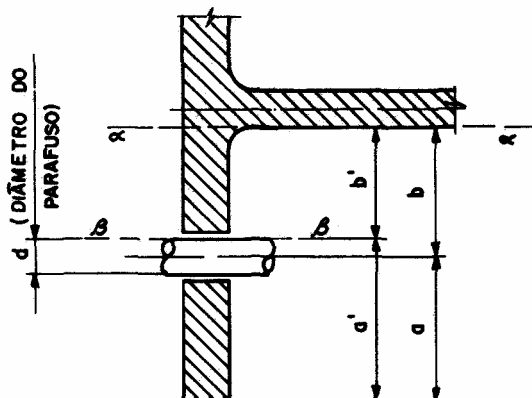
Para  $\alpha > 1$ , existe o efeito de alavanca, mas a espessura da chapa é insuficiente, sendo pois inaceitável;

Para  $0 < \alpha < 1$ , que é a faixa usual de dimensionamento, com as espessuras de  $t_{\min}$  e  $t_{\max}$  indicadas na tabela 1.7, há o efeito de alavanca no parafuso, dado por  $Q = \frac{Tb' - M_\alpha}{a'}$ .

Ao mesmo tempo a espessura da mesa é mais adequada, com o desenvolvimento parcial de sua resistência de cálculo.



a) LIGAÇÃO COM EFEITO DE ALAVANCA



b) DETALHE GEOMÉTRICO

Fig. 15 Consideração do Efeito de Alavanca

### 6.3.2 – EXEMPLO NUMÉRICO DE LIGAÇÃO COM EFEITO DE ALAVANCA

Verificar os elementos da ligação rígida aparafusada com chapa de extremidade mostrada na fig. 16.

Os esforços indicados são as solicitações de cálculo (foi desprezada a variação dos esforços entre os eixos e as faces)

aço ASTM A-36

eletrodo de solda: E70 XX

parafuso ASTM A-325,  $d = 3/4''$

conexão por contato

### 6.3.3 – ESFORÇOS NAS MESAS DA VIGA

O momento na viga será resistido através de esforços de tração e compressão nas mesas sem considerar a resistência da alma.

Também a força de tração na viga será considerada resistida apenas pelas mesas, ao passo que a força cortante é resistida pela alma da viga, (fig. 16-b):

a) mesa superior (tracionada)

$$P_{dt} = \frac{100}{0,4875} + \frac{10}{2} = 210 \text{ kN}$$

b) mesa inferior (comprimada)

$$P_{dc} = \frac{100}{0,4875} - \frac{10}{2} = 200 \text{ kN}$$

c) verificação da efetividade da mesa à compressão:

$$\frac{b}{2t} \leq 0,55 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 16, \text{ para o aço A-36}$$

(NBR 8800, tabela 1)

$$\frac{b}{2t} = \frac{200}{2 \times 12,5} = 8,0 < 16, \text{ ok}$$

d) *verificação da mesa à tração:*

A mesa comprimida não apresenta problema de flambagem local, ou seja, é tão efetiva quando a mesa tracionada.

Como o esforço de tração é maior, será verificada a mesa tracionada.

Deverá ser:

$$P_{dt} < \phi_t A_g f_y = 0,9 \times A_g \times f_y$$

considerando o estado limite de escoamento da seção bruta:

$$A_g = 20 \times 1,25 = 25\text{cm}^2, \text{ área bruta da mesa.}$$

$f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$ , tensão de escoamento do A-36

$$\phi_t A_g f_y = 0,9 \times 25 \times 25 = 563 \text{ kN}$$

$$P_{dt} = 210 \text{ kN} < \phi_t A_g f_y, \text{ ok.}$$

e) *verificação da alma ao cisalhamento local (NBR 8800, 5.6.2.2)*

deverá ser

$$f_{vd} \leq \phi 0,6 f_y = 0,9 \times 0,6 f_y$$

$$f_{vd} \leq 0,9 \times 0,6 \times 25 = 13,5 \text{ kN/cm}^2$$

a altura efetiva da alma resistindo ao cisalhamento é 435 mm (fig 16a), levando-se em conta os recortes para execução das soldas; o esforço cortante de cálculo é  $V_d = 220 \text{ kN}$ .

$$f_{vd} = \frac{V_d}{43,5 \times 0,95} = \frac{220}{43,5 \times 0,95} = 5,3 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{vd} < \phi 0,6 f_y, \text{ ok}$$

A verificação da flambagem da alma da viga à força cortante é feita no dimensionamento da viga.

### 6.3.4 - SOLDA DA VIGA COM A CHAPA DE EXTREMIDADE

a) *mesas superior e inferior:*

a solda das mesas com a chapa de extremidade será de entalhe de penetração total.

De acordo com a tabela 8 da NBR 8800, a resistência de cálculo para tração à seção normal da solda nesse caso é  $R_n = 0,9 \times A_w \times f_y$ , verificação idêntica à anteriormente feita com o metal base das mesas.

Pela tabela 2.5 deste trabalho, para chapa de 12,5 mm de espessura com solda de penetração total, aço ASTM A-36, eletrodo E70-XX, a resistência por mm de cordão é 2,81 kN.

Considerando o comprimento total do cordão, 200mm, a resistência de cálculo é  $200 \times 2,81 = 562 \text{ kN}$ , valor igual ao obtido anteriormente para a mesa.

b) *alma*

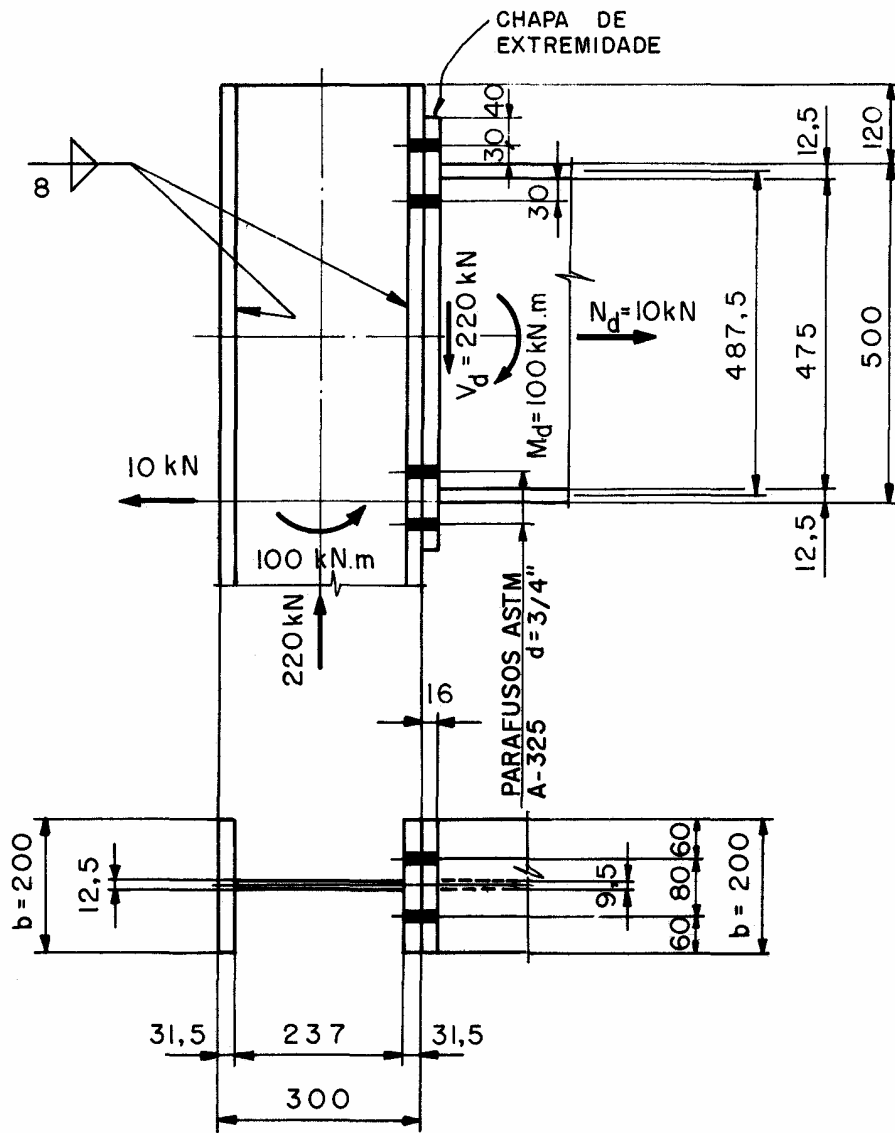
a solda da alma será de filete;

de acordo com a tabela II da NBR 8800 (ou tabela 2.3 desse trabalho), a solda mínima para a chapa de 16 mm, que é a espessura da chapa de extremidade é 6mm; serão considerados 2 filetes de solda de 6mm.

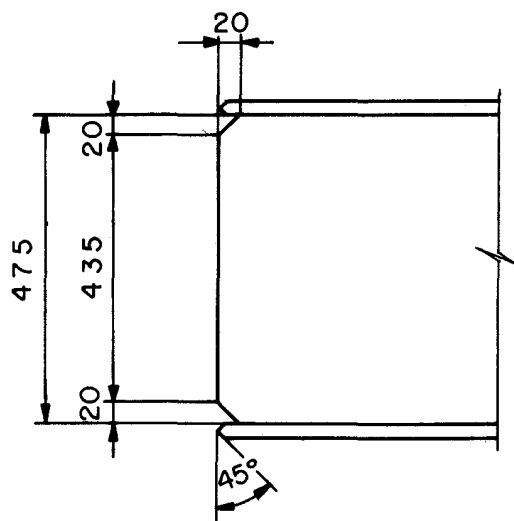
- força na solda devida ao esforço cortante, considerando dois filetes de comprimento 435 mm (fig. 16a)

$$\frac{220}{2 \times 43,5} = 2,5 \text{ kN/cm}$$



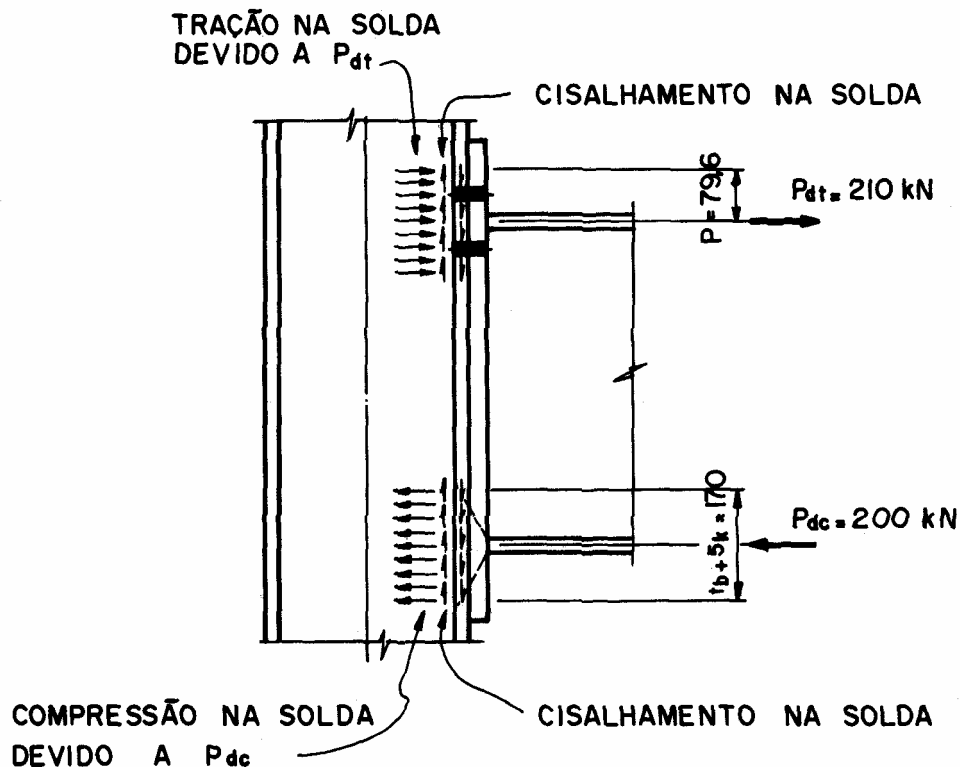


DETALHE DA LIGAÇÃO



ENTALHES NAS MESAS E ALMA DAS VIGAS.

Fig. 16: Ligação do Exemplo 3



(b). CÁLCULO DA SOLDA

Fig. 16: Exemplo N° 3

- força na solda da alma devida à força na solda das mesas; próximo à mesa, a solda da alma deverá também absorver uma parcela da tensão normal na mesa dada por (fig. 16b):

$$\frac{435}{475} \times \frac{210}{1,25 \times 20} = 7,7 \text{ kN/cm}^2$$

como são dois filetes e a espessura da alma de 9,5mm, a força por cm em cada um deles é:

$$\frac{0,95 \times 7,7}{2} = 3,7 \text{ kN/cm}$$

- força resultante na solda da alma:

$$\sqrt{2,5^2 + 3,7^2} = 4,5 \text{ kN/cm}$$

- verificação:

de acordo com a tabela 2.4, a resistência de cálculo do filete de 6 mm para aço ASTM A-36 e eletrodo E70-XX é  $0,81 \times 10 = 8,1 \text{ kN/cm}$ , valor maior que  $4,5 \text{ kN/cm}$ , ok.

## 6.3.5 – ESFORÇOS NOS PARAFUSOS

### a) esforço de cisalhamento

o cisalhamento é considerado absorvido igualmente pelos 8 parafusos da conexão:

$$V_d = \frac{220}{8} = 27,5 \text{ kN}$$

### a) esforço de tração

junto à mesa tracionada o esforço externo é:

$$T = \frac{P_{dt}}{4} = \frac{210}{4} = 52,2 \text{ kN}$$

### c) verificação ao efeito adicional de tração (efeito de alavanca) conforme item 6.3.1

a espessura da chapa de extremidade será predimensionada através da tabela 1.7 com as grandezas definidas na fig. 16 e no enunciado:

$$d = \frac{3}{4}'' \cong 19 \text{ mm}$$

$$e_1 = 80 \text{ mm}$$

$$e_2 = 60 \text{ mm}$$

$$b = 30 \text{ mm}$$

$$\left. \begin{array}{l} a = 40 \text{ mm} \\ a = 1,25 \times b = \\ = 37,5 \text{ mm} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{o menor dos} \\ \text{dois valores, no} \\ \text{caso a} = \\ 37,5 \text{ mm} \end{array}$$

$$a' = a + \frac{d}{2} = 3,75 + \frac{1,9}{2} = 4,7 \text{ cm}$$

$$b' = b - \frac{d}{2} = 3 - \frac{1,9}{2} = 2,05 \text{ cm}$$

- largura tributária para cada parafuso, p:

$$\frac{e_1}{2} = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 60 \text{ mm}$$

$$\left( b + \frac{d}{2} \right) = \left( 3 + \frac{1,9}{2} \right) = 3,95 \text{ cm} \therefore$$

$$\frac{e_1}{2} > b + \frac{d}{2}; e_2 > b + \frac{d}{2} \therefore$$

de cada lado do parafuso vale a largura tributária 3,95 cm;

$$p = 3,95 + 3,95 = 7,9 \text{ cm}$$

- espessura da chapa de extremidade:  
pela tabela 1.7, com as aproximações de T para 60 kN, de b para 35 mm, de p para 80 mm e com  $d = \frac{3}{4}''$ , a faixa de t é de 15,4 a 20,2 mm.  
Será adotado  $t = 16 \text{ mm}$ , conforme arbitrado inicialmente.
- resistência de cálculo da chapa de extremidade na seção  $\alpha\alpha$ :

$$M_\alpha = \frac{p \times t^2 f_y}{5,33}$$

$$M_\alpha = \frac{7,9 \times 1,6^2 \times 25}{5,33} = 94,9 \text{ kN/cm}$$

- valor de  $\delta$ :

$d' = 1,9 + 0,15 = 2,1 \text{ cm}$ , dimensão do furo (NBR 8800, tabela 16)

$$\delta = \frac{p - d'}{p} = \frac{7,9 - 2,1}{7,9} = 0,73$$

- valor de  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{Tb' - M_\alpha}{\delta M_\alpha}$$

com  $T = 52,5 \text{ kN}$ , a tração por parafuso:

$$\alpha = \frac{52,5 \times 2,05 - 94,9}{0,73 \times 94,9} = 0,184$$

$\therefore 0 < \alpha < 1$ , existe o efeito alavanca, sendo o efeito adicional de tração no parafuso

$$Q = \frac{Tb' - M_\alpha}{a'} = \frac{52,5 \times 2,05 - 94,9}{4,7} = 2,7 \text{ kN}$$

e o esforço final no parafuso:

$$T + Q = 52,5 + 2,7 = 55,2 \text{ kN}$$

### 6.3.6 – VERIFICAÇÃO DA CHAPA DE EXTREMIDADE

- efeito do momento fletor:

está automaticamente verificado, porque para  $\alpha < 1$  é porque o momento de cálculo  $M_2$  é menor que o momento resistente  $\delta M_\alpha$  (item 6.3.1)

- efeito da força cortante:

considerando a largura p e a área líquida efetiva para seção retangular (NBR 8800, 5.1.1.4), a tensão de cisalhamento de cálculo é:

$$\frac{T + Q}{67 \times p \times t} = \frac{55,2}{0,67 \times 7,9 \times 1,6} = 6,5 \text{ kN/cm}^2;$$

a resistência de cálculo é (NBR, 7.5.3.1)

$$\phi 0,6f_y = 0,9 \times 0,6 \times 25 = 13,5 \text{ kN/cm}^2 \therefore$$

$$6,5 \text{ kN/cm}^2 < \phi \times 0,6 \times f_y, \text{ ok}$$

### 6.3.7 – VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS

#### a) verificação da pega (NBR 8800, 7.3.5)

a soma das espessuras da chapa de extremidade (16mm) e da mesa de coluna (31,5 mm) é 47,5 mm, valor menor que  $5 \times d = 95$  mm.

Conforme a NBR 8800, 7.3.2.5, os parafusos deverão ser verificados isoladamente aos efeitos de tração e cisalhamento, além da verificação conjunta aos dois efeitos, conforme a tabela 14.

#### b) verificação à tração:

as resistências de cálculo são, para parafusos  $d = \frac{3}{4}$ ", A - 325;

- tração pura (NBR 8800, 7.3.2.2)

$$\begin{aligned}\phi_t R_{nt} &= 0,75 \times 0,75 \times A_p \times f_u \\ &= 0,75 \times 0,75 \times \frac{\pi \times 1,9^2}{4} \times 82,5 = \\ &= 131,6 \text{ kN}\end{aligned}$$

com  $A_p$  = área do parafuso

$f_u = 82,5$  kN/cm<sup>2</sup>, tabela 12 NBR 8800.

Este valor pode ser obtido diretamente na tabela 1.4, para parafuso ASTM A - 325 e  $d = \frac{3}{4}$ " que dá  $\phi_t R_{nt} = 132,3$  kN, valor próximo do calculado.

- tração com cisalhamento:

considerando pela tabela 14, o plano de corte passando pela rosca:

$\phi_t R_{nt} = 0,69 f_u A_p - 1,93 V_d$ , sendo  $V_d$  a força cortante de cálculo:

$$\begin{aligned}\phi_t R_{nt} &= 0,69 \times 82,5 \times \frac{\pi \times 1,9^2}{4} - 1,93 \times 27,5 \\ &= 108,3 \text{ kN}\end{aligned}$$

∴ vale o menor valor 108,3 kN;

comparando,

$T = 55,2 \text{ kN} < \phi_t R_{nt} = 108,3 \text{ kN}$ , ok

#### c) verificação ao cisalhamento:

- resistência ao corte (tabela 1.4)

com  $d = \frac{3}{4}$ ", parafuso ASTM A - 325 e rosca situada no plano de corte,

$$\phi_t R_{nv} = 64,19 \text{ kN};$$

- resistência à pressão de contato (tabelas 1.5a e b):

para aço ASTM A - 36, parafusos  $d = \frac{3}{4}$ " e a espessura da chapa de extremidade 16 mm:

para rasgamento entre dois furos, com  $s = 85$  mm,

$$\phi R_n = 13,72 \times 16 = 219,5 \text{ kN}$$

para rasgamento entre furo e borda, com  $e = 40$  mm,

$$\phi R_n = 12 \times 16 = 192 \text{ kN}$$

∴ prevalece o menor valor 64,19 kN, maior que a solitação de cálculo  $V_d = 27,5$  kN e o parafuso está verificado.

### 6.3.8 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE ENRIJECEDORES JUNTO À MESA COMPRIMIDA DA VIGA

Conforme NBR 8800, 7.1.3.1, não são necessários reforçadores junto ao flange comprimido porque:

- na figura 16, a distância da mesa inferior ao topo da coluna é maior que duas vezes a altura da seção da coluna:

$$500 + 120 > 2 \times 300, \text{ e}$$

- $\beta_r > P_{dc} = 200 \text{ kN}$ , conforme mostrado:

$$\left. \begin{aligned}\beta_r &= \phi t_w (t_b + 5k) f_{yc} \\ \beta_r &= \left( 22 \phi t_w^3 \sqrt{E f_{yc}} \right) / h\end{aligned} \right\} \text{ o que for menor}$$

com

$$\phi = 0,9$$

$t_w = 1,25$  cm, espessura da alma da coluna;

$t_b = 1,25$  cm, espessura da mesa da viga;

$k = 3,15$  cm, espessura da mesa da coluna, no caso de perfil soldado;

$f_{yc} = 25 \text{ kN/cm}^2$ , tensão de escoamento do aço da coluna, A – 36.

$h = 23,7 \text{ cm}$ , altura da alma da coluna;

$$\beta_r = \phi t_w (t_b + 5k) f_{yc}$$

$$= 0,9 \times 1,25 (1,25 + 5 \times 3,15) 25 = 478 \text{ kN}$$

$$\beta_r = \left( 22 \times \phi \times t_w^3 \sqrt{E f_{yc}} \right) / h$$

$$= \left( 22 \times 0,9 \times 1,25^3 \sqrt{20500 \times 25} \right) / 23,7$$

$$= 1168 \text{ kN} \quad \therefore$$

prevalece o menor valor,  $\beta_r = 478 \text{ kN}$ , que é maior que  $200 \text{ kN}$ , que significa que a coluna não precisa de enrijecedores junto ao flange comprimido da viga.

### 6.3.9 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE ENRIJECEDORES NA COLUNA, JUNTO À MESA TRACIONADA DA VIGA

Conforme a NBR 8800, 7.1.3.1, não são necessários enrijecedores junto à mesa tracionada ligada à coluna por parafusos, quando as resistências locais de cálculo da mesa e da alma da coluna à flexão e tração forem superiores às respectivas solicitações de cálculo introduzidas pelos parafusos, levando em consideração o efeito de alavanca.

#### a) verificação da mesa da coluna à flexão:

Devido à elevada espessura da mesa da coluna ( $31,5 \text{ mm}$ ) será admitido que ela tem rigidez suficiente para que o efeito de alavanca se desenvolva totalmente na chapa da extremidade, que é menos espessa ( $16 \text{ mm}$ ).

Por outro lado, a mesa da coluna deverá resistir, através da sua flexão, ao esforço final no parafuso,  $T + Q = 55,2 \text{ kN}$ .

Como anteriormente (fig. 15), são definidas as seguintes grandezas:

$$b = (8 - 1,25) / 2 = 3,38 \text{ cm}$$

$$b + \frac{d}{2} = 3,38 + \frac{1,9}{2} = 4,33$$

$$e_1 = 3,0 + 3,0 + 1,25 = 7,25 \text{ cm}$$

$$e_1 / 2 = 3,63 \text{ cm}$$

$$e_2 = 12,0 - 3,0 = 9,0 \text{ cm}.$$

Considerando que as larguras efetivas de cada lado do parafuso são  $4,33 \text{ cm}$  e  $3,63 \text{ cm}$ ,  $p = 4,33 + 3,63 = 7,96 \text{ cm}$ ;

- momento resistente no flange, em função da largura tributária p:

$$M_{\alpha} = \frac{p t^2 f_y}{5,33} =$$

$$= \frac{7,96 \times 3,15^2 \times 25}{5,33} = 370 \text{ kNcm}$$

- momento de cálculo solicitando a largura "p":

$M = T \times b$  com  $T = 55,2 \text{ kN}$ , conforme anteriormente; então:

$$M = 55,2 \times 3,38 = 186,6 \text{ kNcm}$$

- verificação:

$$M < M_{\alpha}, \text{ ok.}$$

#### b) verificação da alma da coluna à tração:

- o esforço solicitante de tração é, considerando dois parafusos solicitando a faixa de alma de largura "p" à tração:

$$2T = 2 \times 55,2 = 110,4 \text{ kN};$$

- resistência à tração da faixa de alma de largura "p" (NBR 8800, 5.2.3)

$$\phi_t A_g f_y = 0,9 \times p \times t_w \times f_y$$

$$= 0,9 \times 7,96 \times 1,25 \times 25 =$$

$$= 224 \text{ kN}$$

- verificação:

$$2T < \phi_t A_g f_u \quad \therefore$$

a alma da coluna resiste à tração.

$\therefore$  A coluna também não precisa de enrijecedores junto à mesa tracionada da viga.

Por questões construtivas, é comum a utilização de enrijecedores junto aos flanges tracionado e comprimido da viga em ligação desse tipo, mesmo quando não necessários, conforme mostrado.

Na eventualidade da utilização de enrijecedores, o dimensionamento deles deve ser feito conforme NBR 8800, 7.1.3.2.

Devido à presença do enrijecedor, as geometrias da chapa de extremidade e a da mesa da coluna são praticamente as mesmas para análise do efeito alavanca, o que vale dizer que ele será governado pela menos espessa das duas chapas.

### 6.3.10 - VERIFICAÇÃO DA ALMA DA COLUNA AO CISALHAMENTO

#### a) força cortante de cálculo na alma:

- força cortante máxima = 210kN, conforme item 6.3.3.

#### b) resistência de cálculo (NBR 8800, 5.5.1) de acordo com aquele item, temos:

$h = 23,7\text{cm}$ , altura livre da alma entre mesas;

$a$  = distância entre enrijecedores transversais; como o valor de "a" é grande, uma vez que não há enrijecedores, será admitido  $a/h > 3$

$h = 5,34$ , para  $a/h > 3$ ;

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{kE}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{5,34 \times 20500}{25}} = 71,5$$

$t_w = 1,25\text{cm}$ , espessura da alma da coluna;

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{23,7}{1,25} = 19;$$

como  $\lambda < \lambda_p = 71,5$ , a resistência da alma corresponde à plastificação por cisalhamento:

$$\begin{aligned} \phi_v V_n &= \phi_v V_{pl} = 0,9 \times 0,6 \times A_w \times f_y \\ &= 0,9 \times 0,6 \times 23,7 \times 1,25 \times 25 = \\ &= 400\text{kN} \end{aligned}$$

#### c) verificação:

$$210\text{kN} < \phi_v V_n = 400\text{kN} \therefore$$

a alma resiste ao cisalhamento, ok.

### 6.3.11- SOLDA DE COMPOSIÇÃO DA COLUNA

A solda de composição da coluna deverá ser calculada em função da força cortante na coluna, entre os níveis da mesa da viga e, em acréscimo, dos efeitos locais de  $\rho_{dt}$  e  $\rho_{dc}$  sobre os cordões (fig. 16b).

#### a) características da seção da coluna:

$$A = 155,6 \text{ cm}^2, \text{ área}$$

$$I_x = 24200 \text{ cm}^4, \text{ momento de inércia.}$$

#### b) verificação da solda junto à mesa comprimida:

- solda mínima

de acordo com a NBR 8800, tabela 11, a solda mínima para chapa de 31,5 mm é 8 mm; será indicada solda de filete de 8 mm; em ambos os lados da alma para a solda de composição da coluna.

- força de cisalhamento da solda:

a força de cisalhamento por cm em cada um dos filetes de composição é:

$$\frac{V_d \times Q}{2 \times I_x}, \text{ onde:}$$

$V_d$  = força cortante na seção considerada;

No caso  $V_d = p_{dt} = 210 \text{ kN}$

$Q$  = momento estático da mesa da coluna com relação ao eixo principal perpendicular à alma  $\therefore$

$$Q = 20 \times 3,15 \times 13,4 = 844 \text{ cm}^3$$

$I$  = momento de inércia da seção da coluna,  $I = 24200 \text{ cm}^4$

Então, a força no filete é:

$$\frac{210 \times 844}{2 \times 24200} = 3,66 \text{ kN/cm}$$

- força de compressão no filete, no comprimento considerado efetivo,  $t_b + 5k$  (fig. 16-b):

$$\begin{aligned} \frac{200}{(t_b + 5k)2} &= \frac{200}{(1,25 + 5 \times 3,15)2} = \\ &= 5,88 \text{ kN/cm} \end{aligned}$$

- força resultante no filete:

$$\sqrt{3,66^2 + 5,88^2} = 6,93 \text{ kN/cm}$$

- verificação:

de acordo com a tabela 2.4, a resistência de cálculo do filete de 8mm, para aço ASTM A-36 e eletrodo E70 – XX é  $1,08 \times 10 = 10,8 \text{ kN/cm}$ , valor maior que  $6,93 \text{ kN/cm}$ , ok.

*b) verificação da solda junto à mesa tracionada:*

- força de cisalhamento na solda:

conforme anteriormente, a força por cm de filete é  $3,66 \text{ kN/cm}$ .

- força de tração no filete no comprimento “p”:

$$\frac{210/2}{2 \times p} = \frac{105}{2 \times 7,96} = 6,60 \text{ kN/cm}^2$$

- força resultante no filete:

$$\sqrt{3,66^2 + 6,60^2} = 7,54 \text{ kN/cm}$$

- verificação:

este valor é menor que a resistência de cálculo do filete de 8 mm,  $10,8 \text{ kN/cm}$ , conforme visto anteriormente; ok.

## 6.4 – LIGAÇÕES FLEXÍVEIS

### 6.4.1 - CONSIDERAÇÕES

As ligações flexíveis, conceituadas no item 3.1, transmitem apenas a força cortante.

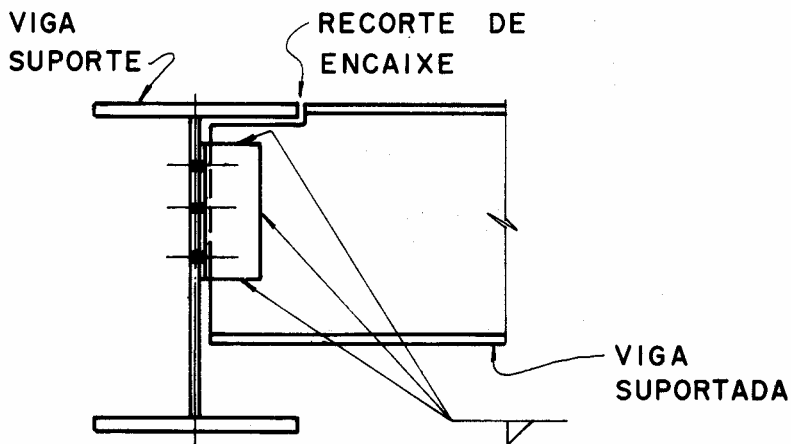
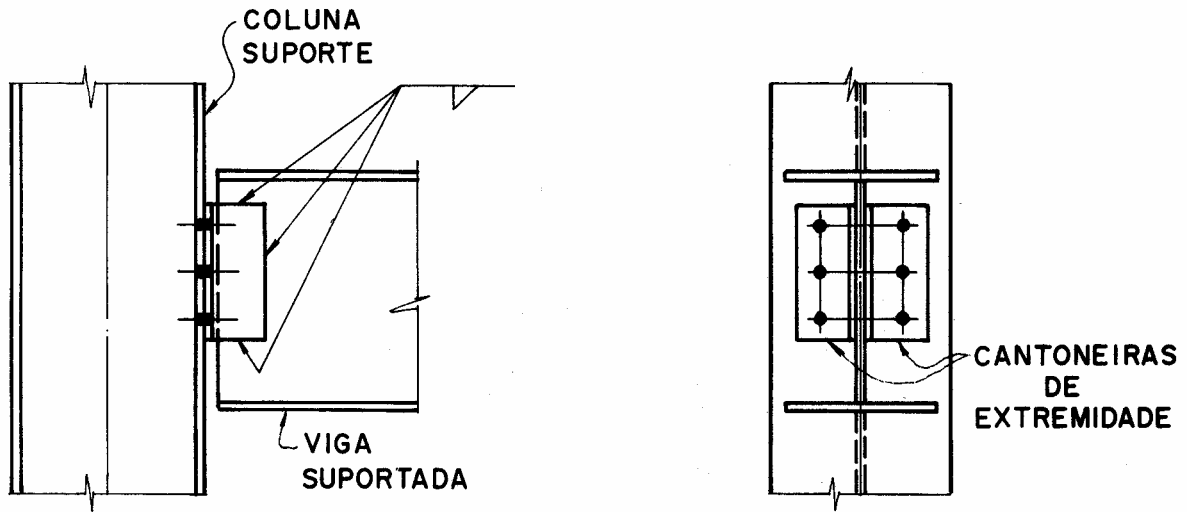
Essas ligações são bastante usuais em estrutura e os tipos mais comuns delas estão indicados na fig. 17:

a) ligação flexível com duas cantoneiras de extremidade soldadas na alma da viga suportada e parafusadas na estrutura suporte (que pode ser uma coluna ou mesmo outra viga).

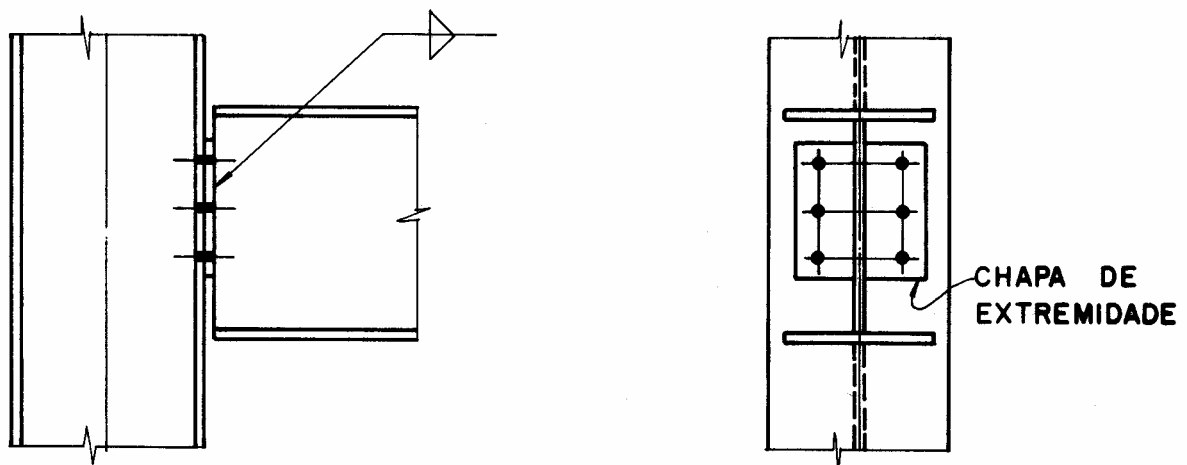
b) ligação flexível com chapa soldada na extremidade da viga suportada.

As abas da cantoneira de extremidade ou a chapa de extremidade são especificadas suficientemente finas, conforme permitido pelas resistências à pressão de contato em furos, escoamento ou ruptura por cisalhamento, para que, através da deformação plástica, se acomodem à rotação da seção extrema da viga, sem o desenvolvimento de momento fletor apreciável.

Para análise completa do funcionamento da LIGAÇÃO FLEXÍVEL, o livro *Steel Structures, Design and Behavior*, de Charles G. Salmon, capítulo 13, poderá ser consultado.



(a) LIGAÇÃO FLEXÍVEL COM DUAS CANTONEIRAS DE EXTREMIDADE



(b) LIGAÇÃO FLEXÍVEL COM CHAPA DE EXTREMIDADE

Fig. 17: Ligações Flexíveis



O projeto das ligações flexíveis se torna imediato através das tabelas 1.8, 1.9 e 1.10 deste trabalho, reproduzidas do MANUAL BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, vol. 3. As seguintes observações são válidas para elas:

• **TABELA 1.8: LIGAÇÕES DE VIGAS COM UTILIZAÇÃO DE DUAS CANTONEIRAS DE EXTREMIDADE PARAFUSADAS:**

- válida para a cantoneira de extremidade parafusada na alma da viga suportada e na estrutura suporte.
- comprimento da cantoneira de extremidade baseada no gabarito vertical de furação de 70mm e distância de furo à borda de 35 mm.
- para cada comprimento de cantoneira de extremidade, a viga mínima é aquela cuja altura de alma é a mínima suficiente para permitir o encaixe da altura da cantoneira e a viga máxima aquela cuja altura não excede o dobro da altura da cantoneira.
- resistências de cálculo para ligações por contato e por atrito tiradas diretamente da tabela, com configuração de 2 até 13 parafusos por linha vertical (para roscas incluídas no plano de corte, a resistência da ligação por contato será multiplicada por 0,7).
- espessura mínima da cantoneira de extremidade e espessura mínima da alma da viga suportada, para desenvolvimento da resistência de cálculo da ligação, dadas diretamente na tabela (para espessuras menores, a

resistência da ligação deve ser reduzida proporcionalmente).

- espessura da alma da viga suporte igual à metade da espessura da alma da viga suportada em ligação em apenas um lado (Fig. 18a) e igual à espessura da alma em ligação nos dois lados de viga suporte (fig. 18b):
- a espessura da cantoneira de extremidade não deve ser menor que 6mm e nem maior que o valor tirado da tabela 1.8.
- para espessuras de cantoneira de extremidade menor que 10mm, as resistências de cálculo devem ser multiplicadas por 0,7, como possibilidade da rosca interceptar o plano de corte.
- a espessura da alma de viga com recorte de encaixe (fig 17a) deverá ser verificada ao colapso por rasgamento (NBR 8800, 7.5.3.2)

• **TABELA 1.9: LIGAÇÕES DE VIGAS COM UTILIZAÇÃO DE DUAS CANTONEIRAS DE EXTREMIDADE SOLDADAS**

- válida para cantoneiras de extremidade soldadas na alma da viga suportada (supõe-se que a ligação das cantoneiras com a estrutura suporte seja parafusada, valendo a tabela 1.8 anterior)
- fornece as resistências nominais das ligações para 12 comprimentos de cantoneira de extremidade (de 140 a 910 mm) com 4 larguras de aba (63,5, 65,0, 76,2 e 75,0 mm)

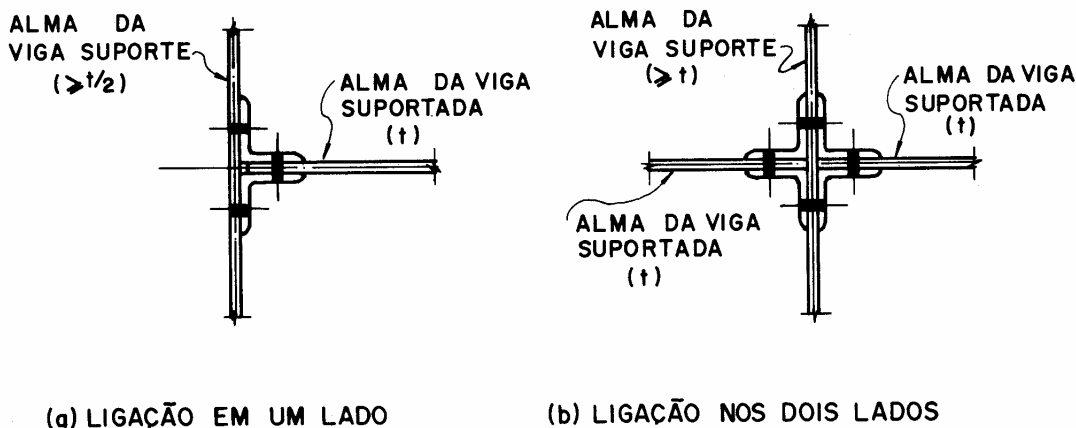


Fig. 18 – Ligações De Um Lado e Dois Lados Na Viga Suporte

com 4 alternativas de cordão de solda (5, 6, 8 e 10 mm), considerando aços com  $f_y$  de 250 e 345 MPa e eletrodos E60 e E70.

- resistência da ligação soldada calculada utilizando-se o “centro instantâneo de rotação”, que é aplicado ao método dos estados limites (o conceito de centro instantâneo de rotação não foi introduzido neste trabalho e pode ser visto no AISC 8ª Edição, pág. 4.72).
- espessuras mínimas da alma da viga suportada, para eletrodos E70 e E60, tirados diretamente da tabela.
- almas com recorte de encaixe (fig. 17a) deverão ser verificadas adicionalmente ao colapso por rasgamento (NBR 8800, 7.5.3.2)

• **TABELA 1.10: LIGAÇÕES DE VIGAS COM UTILIZAÇÃO DE CHAPA DE EXTREMIDADE**

- válida para ligações conforme fig. 17b. (as ligações com chapa de extremidade possuem comportamento similar, ao das ligações com cantoneiras de extremidade, em condições semelhantes de geometria).
- chapa de extremidade com gabarito vertical de furação de 70 mm e distância de furo à borda de 35 mm; gabarito entre linhas de furos verticais (g) variando de 90 a 140 mm.
- chapa de extremidade com espessura mínima de 6,3 mm e de máxima de 9,5 mm, para garantir a flexibilidade da ligação.
- resistência da cálculo da ligação, espessura da chapa de extremidade e a espessura mínima da alma lidas diretamente da tabela para parafusos A-307 e A-325, diâmetros de  $\frac{1}{2}$ ” e  $\frac{7}{8}$ ”, aços

com  $f_y$  de 250 e 345 MPa e eletrodo E70-XX (para espessuras menores, a resistência da ligação deve ser reduzida proporcionalmente)

- resistência da solda da chapa de extremidade na alma da viga suportada, para eletrodo E70, lida diretamente na tabela (o comprimento efetivo dos dois filetes é considerado igual ao comprimento da chapa de extremidade L, menos duas vezes a perna do filete)

**6.4.2 – EXEMPLO NUMÉRICO: LIGAÇÃO FLEXÍVEL COM CANTONEIRAS DE EXTREMIDADE:**

Calcular a ligação com as seguintes características:

- cantoneiras soldadas na alma da viga suportada (perfil IP400)
- cantoneiras parafusadas no flange da coluna (perfil HPL 300): fig 17a
- esforço de cálculo (incluindo o coeficiente de segurança): 400 kN
- aço: ASTM A-36,  $f_y = 25$  kN/cm<sup>2</sup>
- parafusos: ASTM A-325,  $d = \frac{3}{4}$ ”
- ligação por contato, rosca excluída do plano de corte
- espessura da alma do IP 400: 8,6 mm
- espessura da mesa do HPL 300: 14 mm

**a) geometria da ligação**

Pela tabela 1.8 para o perfil IP400 (400mm de altura) situado na faixa de alturas de vigas de 280 a 430 mm, a cantoneira de extremidade sugerida, utilizando duas linhas verticais com 3 parafusos cada com  $\alpha = \frac{3}{4}$ ” (6 parafusos no total) é o L 76,2 x 76,2 mm com comprimento de 210 mm.

**b) resistência da ligação ao corte:**

Pela tabela 1.8, considerando o comprimento da cantoneira 210 mm, ligação por contato, diâmetro do parafuso  $\frac{3}{4}$ ”, a resistência da cálculo da ligação é 550,2 kN, valor maior que a solicitação de cálculo 400 kN ∴ está ok.

c) *espessura necessária da cantoneira:*

na parte inferior da tabela 1.8, considerando aço com  $f_y = 250\text{MPa}$  e parafuso  $d = \frac{3}{4}"$ , a espessura mínima requerida da cantoneira é 10,5 mm.

Se for indicada a cantoneira menos espessa com 9,5mm, a resistência da ligação ao corte cai para:

$$\frac{9,5}{10,5} \times 550,2 = 498 \text{ kN}$$

valor ainda maior que 400 kN  $\therefore$  está ok.

d) *espessura necessária da mesa da coluna suporte:*

conforme visto na fig. 18a, a espessura da mesa da coluna é igual ou maior à metade da espessura que teria a alma da viga suportada, se as cantoneiras de extremidade nela fossem aparafusadas:

na parte inferior da tabela 1.8, com  $f_y = 250\text{MPa}$  e  $d = \frac{3}{4}"$ , a espessura requerida da alma da viga (se as cantoneiras de extremidade nela fossem aparafusadas) é 13,4mm  $\therefore$  a espessura requerida da mesa suporte é  $\frac{13,4}{2} = 6,7\text{ mm}$ , valor muito menor que 14 mm  $\therefore$  a espessura da mesa está ok.

e) *perna do filete da solda da cantoneira de extremidade.*

pela tabela 1.9, considerando o comprimento da cantoneira da ligação de 210 mm e cantoneira de 76,2 x 76,2 mm de aba, eletrodo E70-XX e filete de 5 mm, a resistência da solda é 478 kN, valor maior que a solicitação de cálculo 400 kN  $\therefore$  a perna do filete de 5 mm está ok, inclusive compatível com a espessura da cantoneira, 9,5 mm. (NBR 8800, tabela 11).

f) *espessura necessária da alma da viga.*

na parte inferior da tabela 1.9, considerando aço com  $f_y = 250\text{MPa}$  e perna do filete de 5 mm, a espessura mínima da alma é 10mm.

Como a espessura da alma é 8,6 mm, a resistência da ligação cai para  $\frac{8,6}{10} \times 478 =$

411 kN, valor maior que 400 kN  $\therefore$  a espessura da alma está ok.

O esquema final da ligação flexível está mostrado na fig. 19 (a)

#### 6.4.3 - EXEMPLO NUMÉRICO: LIGAÇÃO FLEXÍVEL COM CHAPA DE EXTREMIDADE:

Calcular ligação semelhante à do exemplo anterior utilizando chapa de extremidade:

- esforço de cálculo (incluindo o coeficiente de segurança): 200 kN
- aço ASTM A-36,  $f_y = 25\text{ kN/cm}^2$
- parafusos ASTM A-325,  $d = 5/8"$
- ligação por contato
- alma do IP400: 8,6 mm
- mesa do HPL 300: 14 mm.

a) *geometria da ligação*

Pela tabela 1.9 para o perfil IP 400, situado na faixa de altura de vigas de 300 a 450 mm, a chapa de extremidade tem altura de 210 mm com duas colunas de 3 parafusos de cada lado da alma da viga.

b) *resistência da ligação ao corte:*

pela tabela 1.10, considerando o comprimento da cantoneira 210 mm, ligação por contato, diâmetro do parafuso  $5/8"$ , a resistência de cálculo da ligação é 267,5 kN, considerando a rosca incluída no plano de corte, valor maior que a solicitação de cálculo, 200 kN  $\therefore$  está ok.

c) *espessura necessária da chapa de extremidade:*

ainda pela tabela 1.10, a espessura mínima da chapa de extremidade, para desenvolvimento da resistência total de cálculo, 267,5 kN, é 4,7 mm.

Será então indicada chapa de extremidade com espessura 5 mm.

d) *resistência de cálculo da solda da chapa de extremidade:*

na parte inferior da tabela, considerando a perna do filete de 5 mm e a chapa de extremidade de comprimento 210 mm, a resistência do cordão é 270 kN, valor maior que 200 kN ∴ está ok.

e) *espessura mínima da alma:*

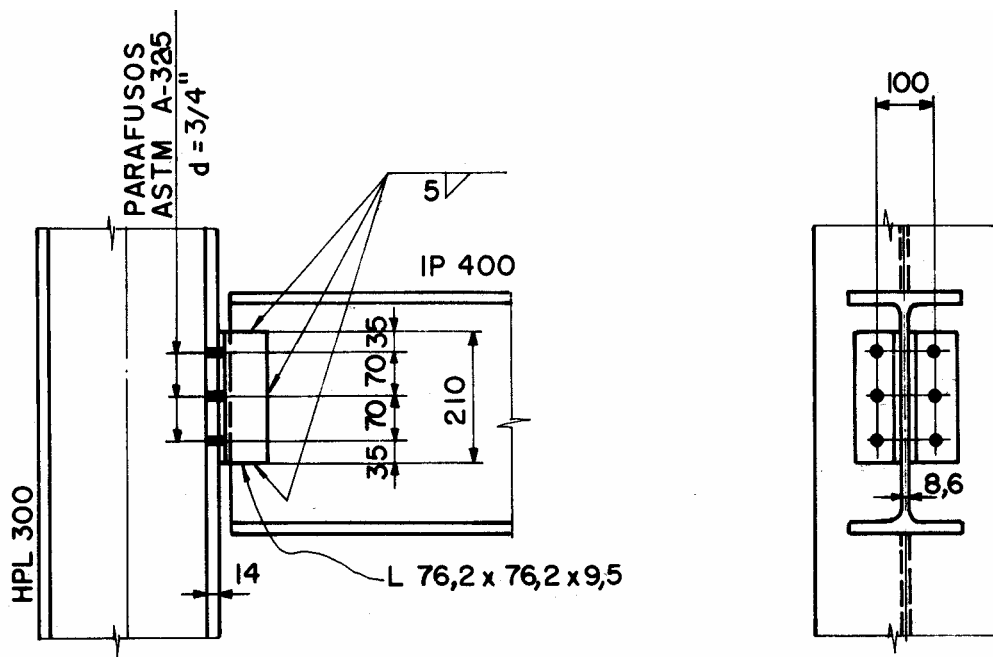
ainda na parte inferior da tabela, considerando o filete de 5 mm e aço com  $f_y = 250$  MPa, a espessura mínima da alma é 10 mm para desenvolvimento da resistência de cálculo de 270 kN.

Como a espessura da alma da viga é 8,6 mm, a resistência cai para  $\frac{8,6}{10} \times 270 = 232$  kN, valor maior que 200 kN ∴ está ok.

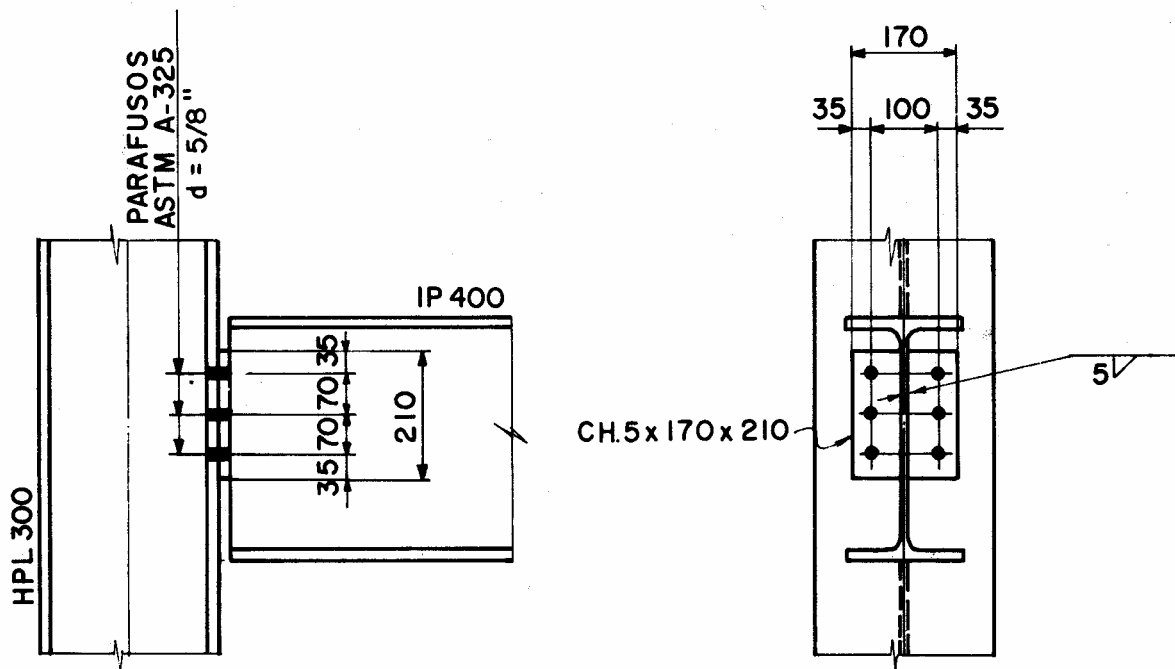
O esquema final da ligação flexível está mostrado na fig. 19b.

### 6.5 – LIGAÇÕES RÍGIDAS COM GRUPO DE PARAFUSOS TRACIONADOS

Nas ligações rígidas mostradas na figura 20, os esforços de tração nos parafusos, devidos à ação do momento fletor, são calculados por dois processos diferentes dependendo dos parafusos serem montados com protensão (parafusos A-325 e A-490) e sem protensão (A-307).

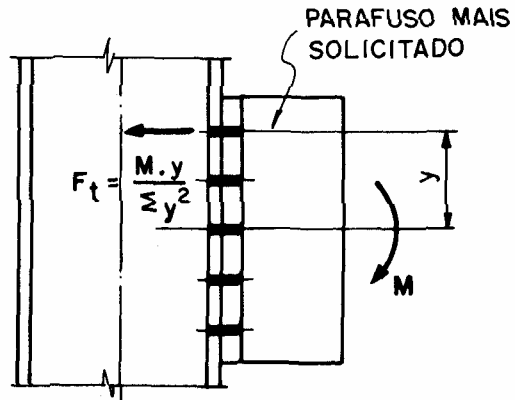


(a) LIGAÇÃO DO EXEMPLO 6.4.2.

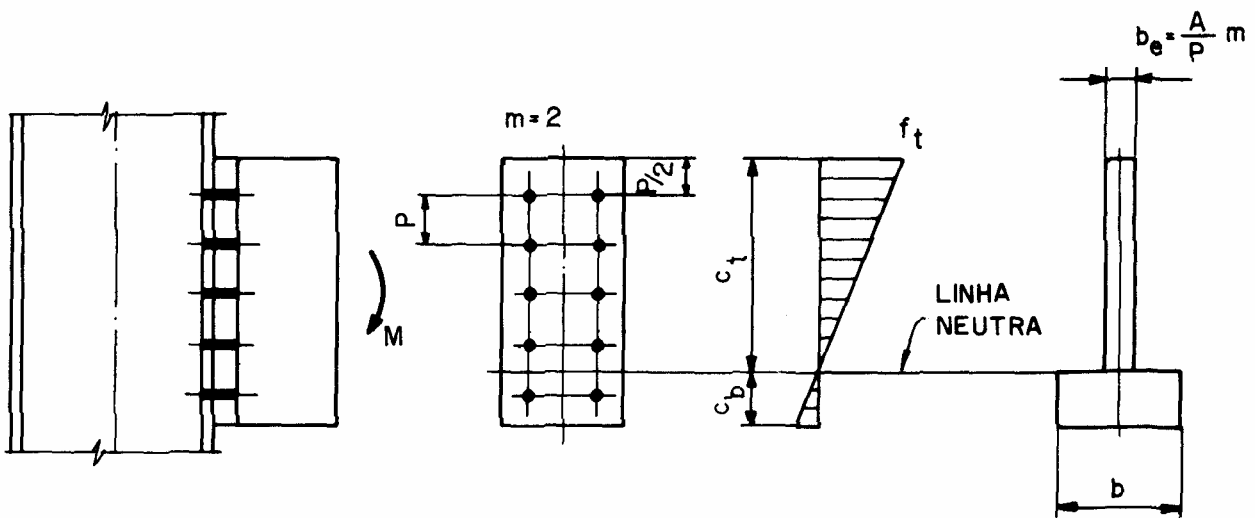


(b) LIGAÇÃO DO EXEMPLO 6.4.3.

Fig. 19: Exemplos de Aplicação



(a) LIGAÇÃO COM PARAFUSOS A-325 OU A-490.



(b) LIGAÇÃO COM PARAFUSOS A-307.

Fig. 20: Ligação Rígida com Parafusos ao Longo da Altura

### 6.5.1 - LIGAÇÕES COM PARAFUSOS A-345 E A-490

No caso de ligações com parafuso de alta resistência, a protensão de montagem faz com que seja permitido que os esforços nos parafusos sejam determinados através da equação usual de flexão:

$$f = \frac{M \times y}{I},$$

desde que as chapas aparafusadas na ligação sejam bastante rígidas e ainda permaneçam firmemente em contato entre si após a aplicação do momento.

A análise dessa hipótese leva à solução final do problema sugerida no livro *Steel Structures Design and Behavior* de Charles G. Salmon, capítulo 4, em que a tensão de tração no parafuso mais solicitado é dada por:

$$f_t = \frac{M \times y}{\sum A \times y^2}, \text{ com:}$$

A = área dos parafusos

M = momento fletor solicitando a ligação

y = distância vertical do centro de gravidade do conjunto de parafusos ao centro do parafuso extremo, mais solicitado.

ou, no caso de força de tração no parafuso, ao invés de tensão de tração:

$$F_t = \frac{M \times y}{\sum y^2}$$

### 6.5.2 – LIGAÇÕES COM PARAFUSOS A-307

No caso de ligações com parafusos sem protensão de montagem, a referência citada anteriormente sugere a seguinte solução final para o problema (Fig. 20b).

M = momento fletor solicitando a conexão

m = número de colunas de parafusos na ligação, no caso da figura 20b, m = 2

p = distância entre parafusos

b = largura da chapa de conexão

b<sub>e</sub> = largura efetiva da parte tracionada em função das áreas dos parafusos:

$$b_e = \frac{A}{p} \times m$$

A = área do parafuso

c<sub>b</sub> e c<sub>t</sub>: distâncias que posicionam a linha neutra da seção:

$$\frac{c_b}{c_t} = \sqrt{\frac{b_e}{b}}$$

I = momento de inércia da seção equivalente

$$= \frac{b_e c_t^3}{3} + \frac{b \times c_b^3}{3}$$

f<sub>t</sub> = tensão de tração no parafuso mais solicitado

$$= \frac{M(c_t - p/2)}{I}$$

F<sub>t</sub> = esforço de tração no parafuso mais solicitado

$$= M \times A \frac{(c_t - p/2)}{I}$$

### 6.5.3 – CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Para os dois casos analisados anteriormente, após o cálculo do esforço no parafuso mais tracionado, as seguintes verificações deverão ser feitas:

- tração, cisalhamento e combinação dos dois esforços no parafuso.
- verificação das espessuras das chapas de ligação, nas ligações com parafusos ASTM A-325 e A 490, para que não apareça o efeito de alavanca, que impediria o contato das chapas entre si, inviabilizando o modelo de cálculo.
- dimensionamento das soldas
- dimensionamento dos elementos de ligação, levando em conta, inclusive, a flexão da chapa de ligação causada pela pressão desenvolvida, na zona comprimida, pelo momento, no caso de parafusos ASTM A-307.

### 6.5.4 – EXEMPLO NUMÉRICO

Verificar os elementos da ligação mostrada na figura 21.

O esforço indicado é a solicitação de cálculo.

aço ASTM A-36

eletrodo de solda: E70-XX

parafusos ASTM A-325,  $d = 7/8''$

conexão por contato

Será admitido que os elementos da coluna são suficientes para absorver os esforços aplicados pela ligação.

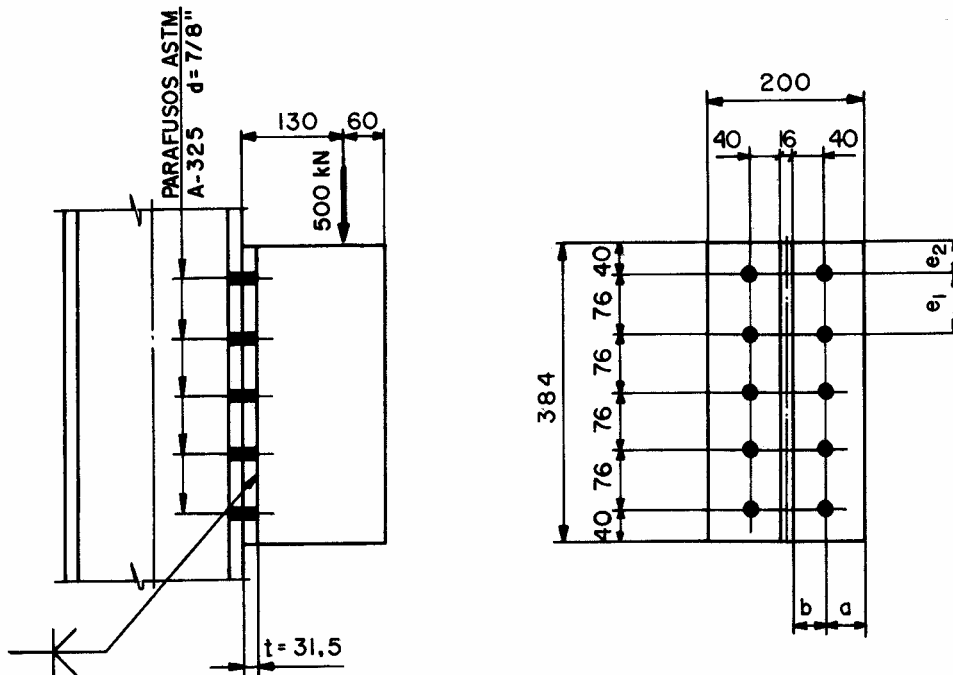


Fig. 21: Ligação do Exemplo 6.5.4

### 6.5.5 – ESFORÇOS NOS PARAFUSOS

a) esforço de cisalhamento:

como são 10 parafusos,

$$V = \frac{500}{10} = 50 \text{ kN}$$

b) esforço de tração

- momento de inércia do conjunto de parafusos:

$$\sum y^2 = 4(7,6^2 + 15,2^2) = 1155,2 \text{ cm}^2$$

- momento solicitando o grupo de parafusos:

$$M = 500 \times 13 = 6500 \text{ kNcm}$$

- esforço de tração no parafuso mais solicitado (distando  $y = 15,2$  cm da linha neutra do grupo de parafusos)

$$T = \frac{M \times y}{\sum y^2} = \frac{6500 \times 15,2}{1155,2} = 85,5 \text{ kN}$$

c) verificação do efeito adicional de tração (conforme item 6.3.1)

- As seguintes grandezas são definidas na figura 19;  $7/8''$

$$d = 22,2 \text{ mm}$$

$$e_1 = 76 \text{ mm}$$

$$e_2 = 40 \text{ mm}$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$a = 52 \text{ mm}$ ; será usado  $a = 50 \text{ mm}$  porque deve ser  $a \leq 1,25 b$ .

$$a' = a + \frac{d}{2} = 50 + 11 = 61 \text{ mm}$$

$$b' = b - \frac{d}{2} = 40 - 11 = 29 \text{ mm}$$



- a largura tributária para o parafuso extremo é:

$$\text{entre dois parafusos: } \frac{c_1}{2} = \frac{76}{2} = 38 \text{ mm}$$

$$\left(b + \frac{d}{2}\right) = 40 + 11 = 51 \text{ mm}$$

∴ vale o menor valor, 38 mm;

entre o parafuso e a extremidade da chapa:

$$c_2 = 40 \text{ mm e } \left(b + \frac{d}{2}\right) = 51 \text{ mm } ∴$$

vale o menor valor 40 mm.

∴ a largura tributária é  $p = 38 + 40 = 78$  mm.

- predimensionamento da espessura da chapa de ligação:

pela tabela 1.7, com as aproximações de T para 100 kN, de "p" para 90 mm e com  $b = 40$  mm e  $d = 7/8$ ", a faixa de t é de 19,9 a 26,2 mm.

Como não se deseja o efeito de alavanca na ligação, será adotado valor t acima de 26,2 mm; a espessura mais próxima é 31,5 mm ∴  $t = 31,5$  mm.

- resistência de cálculo da chapa de ligação na seção  $\alpha\alpha$  (fig. 15)

$$M_\alpha = \frac{pt^2f_y}{5,33} = \frac{7,8 \times 3,15^2 \times 25}{5,33} = 363 \text{ kNcm}$$

- valor de  $\delta$ ;

$$\delta = \frac{p - d'}{p}, \text{ com } d' = 7/8" + 1/16" = 23,8 \text{ mm}$$

$$\delta = \frac{7,8 - 2,38}{7,8} = 0,695$$

- valor de  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{Tb' - M_\alpha}{\delta M_\alpha} = \frac{85,5 \times 2,9 - 363}{0,695 \times 363} < 0 ∴$$

não há efeito alavanca, conforme desejado. (obs: a espessura menor mais próxima de chapa, 25mm, não seria suficiente para impedir esse efeito)

Não há também esforço adicional de tração no parafuso, uma vez que  $Q = 0$ .

### 6.5.6 – VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS

a) *resistência do parafuso ao corte:*

pela tabela 1.4 com  $d = 7/8$ ", parafuso ASTM A-325 e rosca situada no plano de corte,  $\phi_v R_{nv} = 87,38$  kN.

$$V = 50 \text{ kN} < \phi_v R_{nv}, \text{ ok.}$$

A verificação da resistência à pressão de contato na parede do furo deve ser feita segundo NBR 8800, 7.3.2.5 ou tabela 1.5, conforme exemplos 1 e 2.

A chapa de ligação, devido à sua grande espessura, atende com folga a essas verificações.

b) *resistência do parafuso à tração*

- tração pura:

conforme NBR 8800, 7.3.2.2 ou tabela 1.4:

$$\phi_t R_{nt} = 180 \text{ kN}$$

$$T = 85,5 \text{ kN} < 180 \text{ kN}, \text{ ok.}$$

- tração com cisalhamento (NBR 8800, 7.3.2.5)

considerando pela tabela 14 da NBR 8800 o plano de corte passando pela rosca,

$$\begin{aligned} \phi_t R_{nt} &= 0,69 f_u A_p - 1,93 V_d \\ &= 0,69 \times 82,5 \times \frac{\pi \times 2,22^2}{4} - 1,93 \times 50 \\ &= 123,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$T = 85,5 < \phi_t R_{nt}, \text{ ok.}$$

### 6.5.7 – DEMAIS VERIFICAÇÕES

As verificações citadas abaixo deverão ser feitas, conforme exemplo 2.

a) resistência à flambagem local para a chapa de espessura 16 mm, conforme NBR 8800, tabela I.

b) verificação da mesma chapa à flexão

c) verificada essa chapa à flexão, a sua solda com a chapa de ligação, de espessura 31,5 mm, estará automaticamente

verificada, por ser de chanfro com penetração total (NBR 8800, tabela 8)

### 6.6 – LIGAÇÃO DE NÓS DE TRELIÇA COM COLUNAS

De modo geral os cálculos das ligações de nós de treliça com coluna, mostradas na fig. 22, são similares aos do exemplo 6.5.

A consideração adicional que se deve fazer é em relação aos efeitos de excentricidade, que surgem em função da locação do chamado PT, ponto de trabalho, que é o ponto de interseção das linhas de trabalho ou linhas dos centros de gravidades das barras das treliças (fig. 22)

Podem ser definidos três casos:

a) O PT coincide com o centro de gravidade do conjunto de parafusos (no plano de corte) ou da linha de solda (fig. 22 a e b):

nesse caso não há nenhum efeito excêntrico na ligação e todos os parafusos ou pontos da solda são igualmente solicitados.

na ligação aparafusada as forças de tração e cortante nos parafusos são dadas por  $F_H/n$  e  $F_V/n$  respectivamente, onde  $n$  é o número de parafusos na ligação e  $F_H$  e  $F_V$  são as componentes horizontal e vertical da resultante dos esforços na ligação.

Na ligação soldada as forças horizontal e vertical na solda são dados por  $F_H/2\ell$  e  $F_V/2\ell$  respectivamente, considerando 2 filetes de comprimento “ $\ell$ ” de cada lado da chapa.

O esforço  $F_V$  solicita a coluna excentricamente com o momento  $F_V \times h/2$ , que deverá ser acrescido às solicitações utilizadas no seu dimensionamento.

b) O PT está no plano de corte dos parafusos ou sobre a linha de solda, porém fora do centro de gravidade do conjunto (fig. 22c e d):

nesse caso os parafusos ou pontos da solda não são igualmente solicitados, devido à excentricidade da componente horizontal, que gera um momento de  $F_H \times e$  solicitando em acréscimo a ligação.

No caso de parafusos ASTM A-325 e A-490, essa força de tração adicional é dada por  $F_H \times e \times y / \sum y^2$ , onde  $y$  e  $\sum y^2$  são conforme visto anteriormente no exemplo 6.5.

Na ligação soldada, a força horizontal adicional no ponto mais solicitado do filete (o que dista  $y$  do CG na fig. 22d) é dada por  $F_H \times e/w$  onde  $w$  é o módulo de resistência com relação àquele ponto da figura formada pelos filetes, considerados como linhas (supondo que a dimensão da perna é desprezível em relação ao comprimento do filete), encontrado em tabelas para diversas configurações usuais de filete(s), conforme tabela 2.6.

As forças ficam então:

- ligação aparafusada:

forças nos parafusos mais solicitados

$$\text{tração: } \frac{F_H}{n} + \frac{F_H \times e \times y}{\sum y^2}$$

$$\text{cortante: } \frac{F_V}{n}$$

- ligação soldada;

forças no filete, no ponto mais solicitado:

$$\text{horizontal: } \frac{F_H}{2\ell} + \frac{F_H \times e}{w}$$

$$\text{vertical: } \frac{F_V}{2\ell}$$

É válida a mesma observação anterior sobre o efeito excêntrico de  $F_V$  com relação à linha de centro da coluna;

c) o PT está fora do plano de corte dos parafusos ou do plano que contém os filetes de solda (fig. 22e e f).

Nesse caso, o mais comum é ele estar na linha de centro da coluna, de forma que não exista mais a excentricidade anterior de  $F_V$  com relação a ela.

Por outro lado surge o momento devido à excentricidade de  $F_V$  com relação ao grupo de parafusos ou linhas de solda.

Na ligação aparafusada o esforço adicional de tração no parafuso mais solicitado é dado pelo valor absoluto da soma algébrica.

$$\frac{F_H \times e \times y}{\sum y^2} + \frac{F_V \times h/2 \times y}{\sum y^2}$$

Na ligação soldada, a força horizontal adicional no ponto mais solicitado do filete é dado pelo valor absoluto da soma algébrica:

$$\frac{F_H \times e}{w} + \frac{F_V \times h/2}{w}$$

As forças ficam então:

- ligação aparafusada:

forças nos parafusos mais solicitados

$$\text{tração: } \frac{F_H}{n} + \left| \left( \frac{F_H \times e \times y}{\sum y^2} \right) + \left( \frac{F_V \times h/2 \times y}{\sum y^2} \right) \right|$$

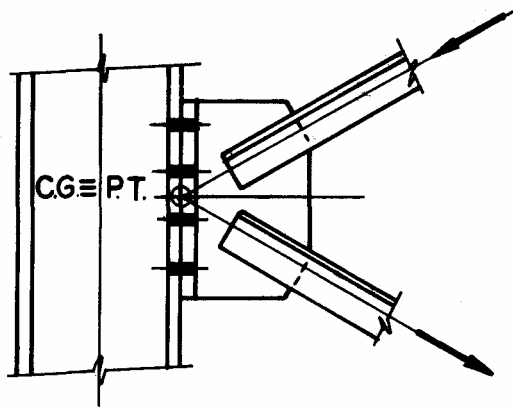
$$\text{cortante: } \frac{F_V}{n}$$

- ligação soldada

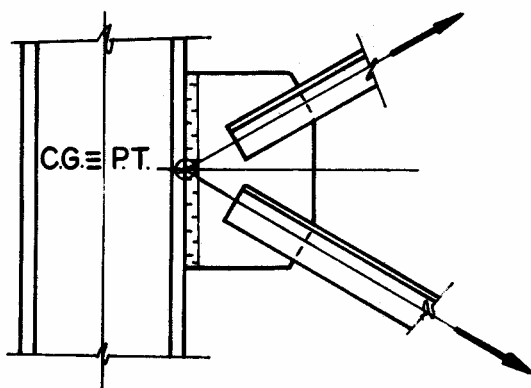
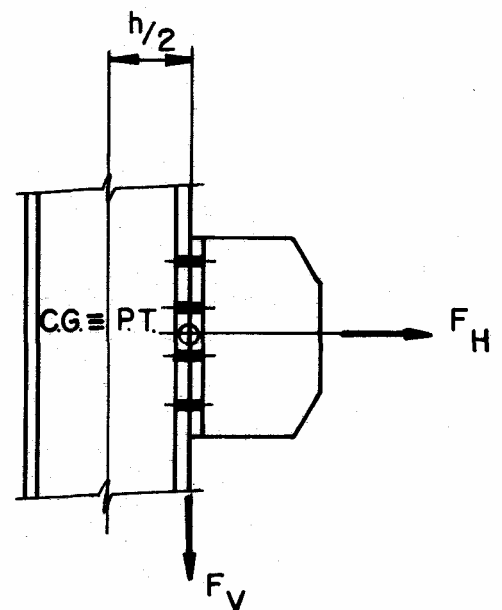
forças no filete, no ponto mais solicitado:

$$\text{horizontal: } \frac{F_H}{2\ell} + \left| \left( \frac{F_H \times e}{w} \right) + \left( \frac{F_V \times h/2}{w} \right) \right|$$

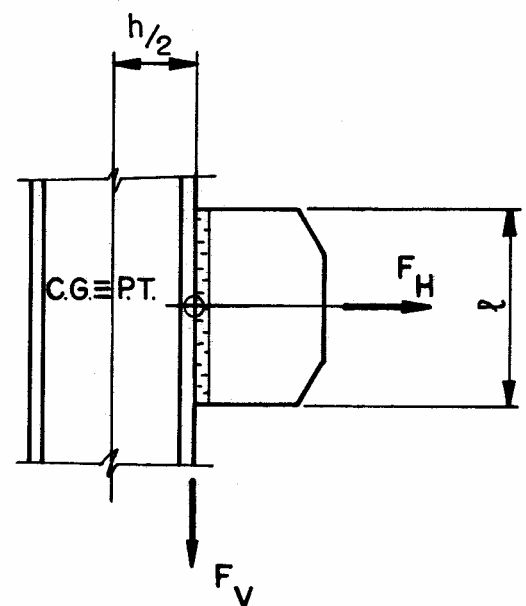
$$\text{vertical: } \frac{F_V}{2\ell}$$

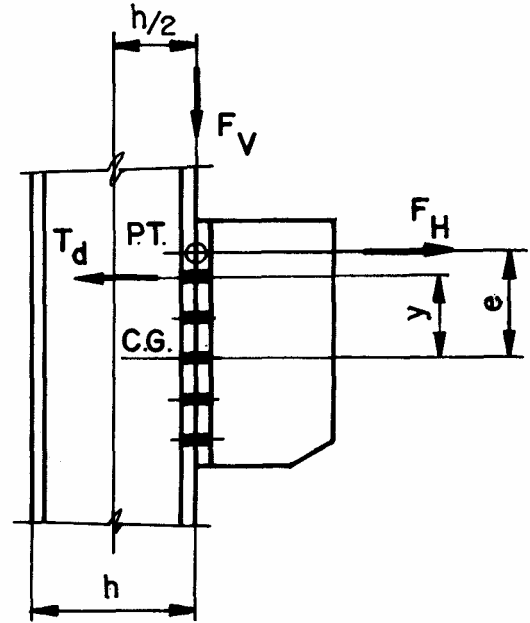
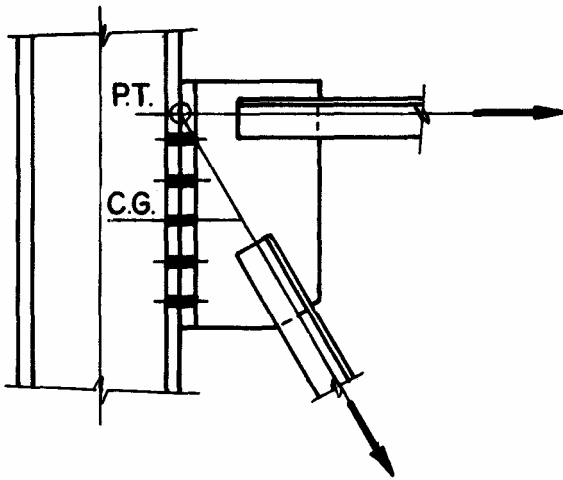


(a) P.T. NO C.G. DO CONJUNTO DE PARAFUSOS

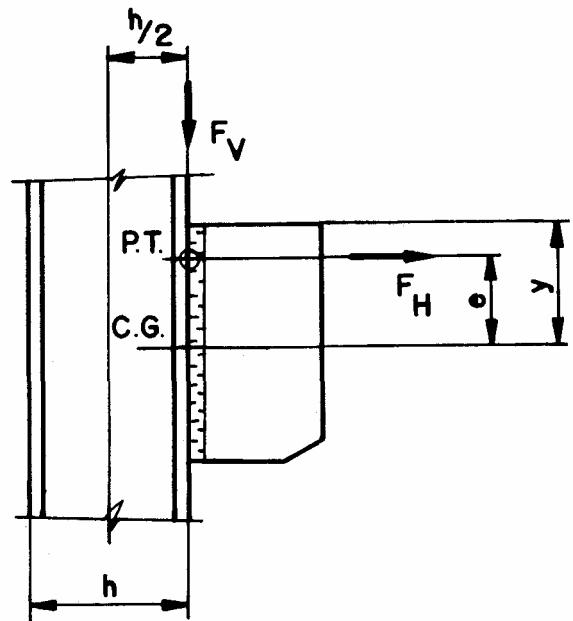
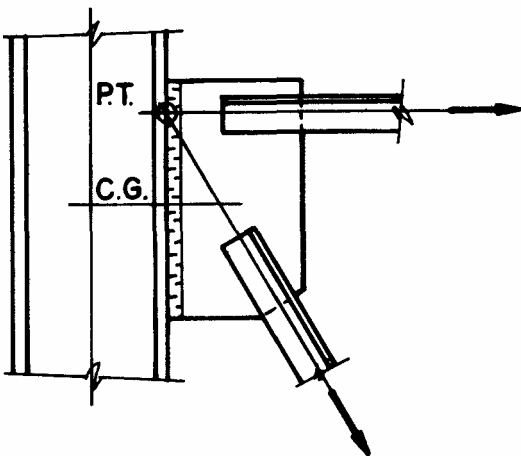


(b) P.T. NO C.G. DAS LINHAS DE SOLDA

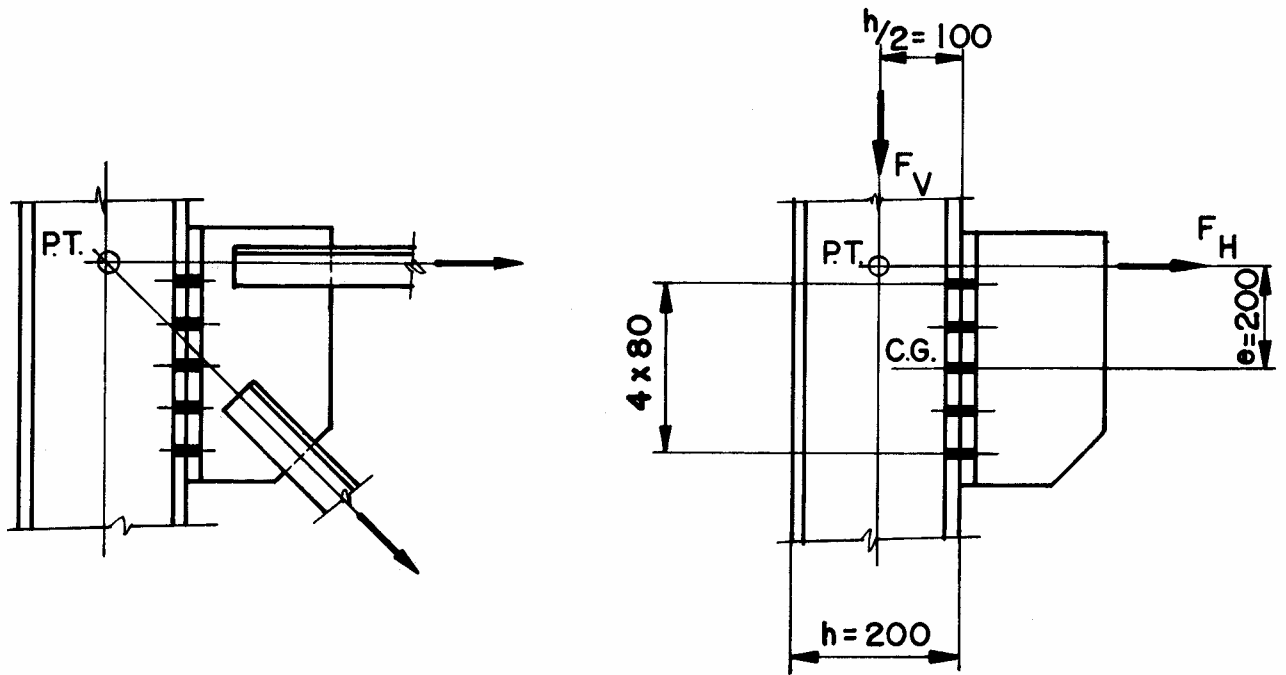




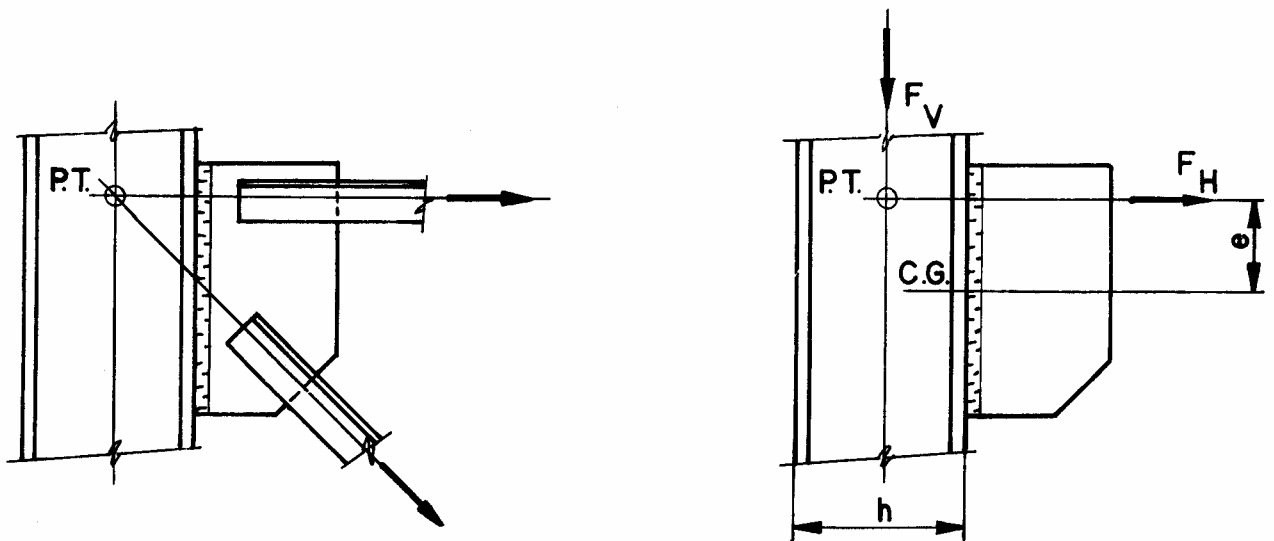
(c) P.T. COINCIDINDO COM PLANO DE CORTE DOS PARAFUSOS



(d) P.T. COINCIDINDO COM O PLANO DAS LINHAS DE SOLDA.



(e) P.T. NA LINHA DE CENTRO DA COLUNA



(f) P.T. NA LINHA DE CENTRO DA COLUNA.

Fig. 22: Ligações de Nós de Treliça

### 6.6.1 – EXEMPLO NUMÉRICO

Verificar a conexão da fig. 22e onde as componentes dos esforços de cálculo que atuam na ligação são  $F_H = 300\text{kN}$  e  $F_V = 400\text{kN}$ .

a) esforço de cisalhamento nos parafusos:

$$\frac{F_V}{n} = \frac{400}{10} = 40\text{ kN}$$

considerando que o número total de parafusos é  $n = 10$

b) esforço de tração no parafuso mais solicitado:

$$\frac{F_H}{n} + \left| \frac{F_H \times e \times y}{\sum y^2} - \frac{F_V \times h/2 \times y}{\sum y^2} \right| =$$
$$= \frac{300}{10} + \frac{300 \times 20 \times 16 - 400 \times 10 \times 16}{4(8^2 + 16^2)} = 55\text{ kN}$$

deve ser notado que, devido o seu sentido, a força  $F_H$  introduz tração em todos os parafusos e que o momento  $F_H \times e$  introduz tração nos parafusos acima do centro de gravidade da ligação e o momento  $F_V \times h/2$  tração nos parafusos abaixo do mesmo.

c) o diâmetro dos parafusos e a espessura das chapas de ligação:

deverão ser escolhidos com auxílio da tabela 1.7, a partir dos esforços calculados e da geometria dada, de forma que não haja o efeito de alavanca.

Outras verificações (soldas, alma da coluna, chapa que recebe as barras da treliça, esmagamento de furo com rasgamento, etc) deverão ser feitas também como nos exemplos anteriores.

Os elementos que não atenderem às verificações deverão ser alterados e verificados novamente.

### 6.7 – LIGAÇÃO DE EMENDA DE VIGAS

Calcular a ligação de emenda da viga com talas na alma e nas mesas, conforme mostrado na figura 24.

Os esforços de cálculo na seção média da emenda são  $M_d = 373\text{ kNm}$  e  $V_d = 371\text{ kN}$ . (já com os coeficientes de segurança incluídos)

Aço ASTM A-36

parafusos ASTM A-325,  $d = \frac{3}{4}"$

ligação por contato

perfil da viga: IS 600 x 103, conforme o Manual Brasileiro da Construção Metálica.

#### 6.7.1- CONSIDERAÇÕES

As ligações de emendas de vigas são utilizadas em três situações principais, nas quais elas se mostram vantajosas:

- na redução do comprimento da viga visando facilitar o transporte,
- na necessidade de aproveitamento dos materiais existentes e
- na alternativa de se introduzir, através delas, contraflechas em vigas de grandes vãos

As ligações com talas são dimensionadas para as solicitações de cálculo atuantes na linha de centro das talas (fig. 23).

Normalmente essas ligações são posicionadas em seções da viga onde os esforços de cálculo são reduzidos (pelo menos onde o momento de cálculo é reduzido) para que se tornem mais econômicas.

As talas e os parafusos das mesas e da alma são dimensionados para absorver os esforços atuantes nas mesas e na alma da viga respectivamente.

Assim no dimensionamento elástico sugerido nos livros, fig 23a, a parcela do momento  $M_d$  absorvida pelas mesas,  $M_F$ , é resistida pelas talas das mesas e seus parafusos, e a parcela  $M_W$ , absorvida pela alma, é resistida pelas talas da alma e seus parafusos.

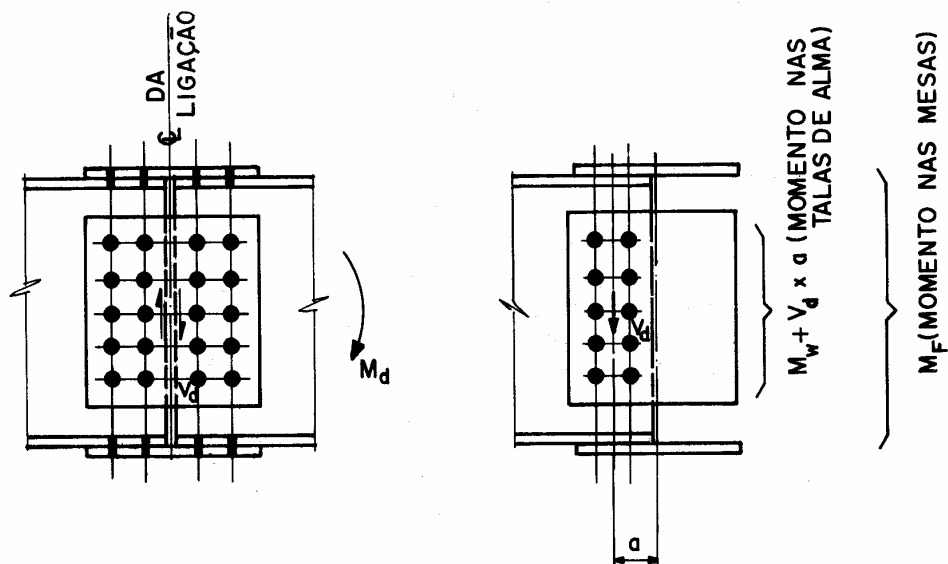
O esforço cortante  $V_d$  é resistido pela tala da alma e seus parafusos, gerando um momento igual a  $V_d \times a$ , devido à excentricidade entre  $V_d$  e o centro de gravidade do conjunto de parafusos de cada lado das talas.

Bibliografia recente (Calcul Aux États Limites des Charpentes d'Acier, Picard e Beaulieu, pág. 100) sugere a seguinte marcha de cálculo (fig. 23 b);

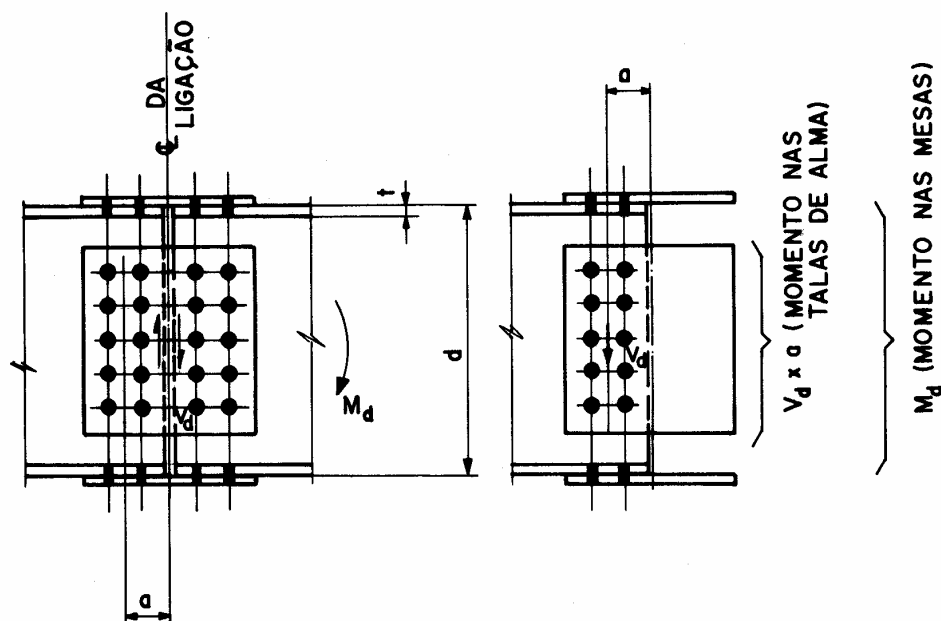
- todo o momento fletor é transmitido através das mesas, pela força  $M_d/(d-t)$ , que será resistida pelas talas da mesa e seus parafusos (testes demonstram que a presença das talas de alma não alteram a resistência ao momento fletor da viga, que pode ser considerado totalmente absorvido pelas mesas).

- as talas de alma e seus parafusos resistem ao esforço cortante  $V_d$  e ao momento  $V_d \times a$ , devido à excentricidade de  $V_d$ .

Essa será a alternativa de cálculo adotada na solução do problema, por estar de acordo com a filosofia do estado limite.



a) PROCESSO ELÁSTICO



b) PROCESSO SUGERIDO POR PICARD E BEAULIEU

Fig. 23: Ligação de Emenda de Viga: Distribuição dos Esforços

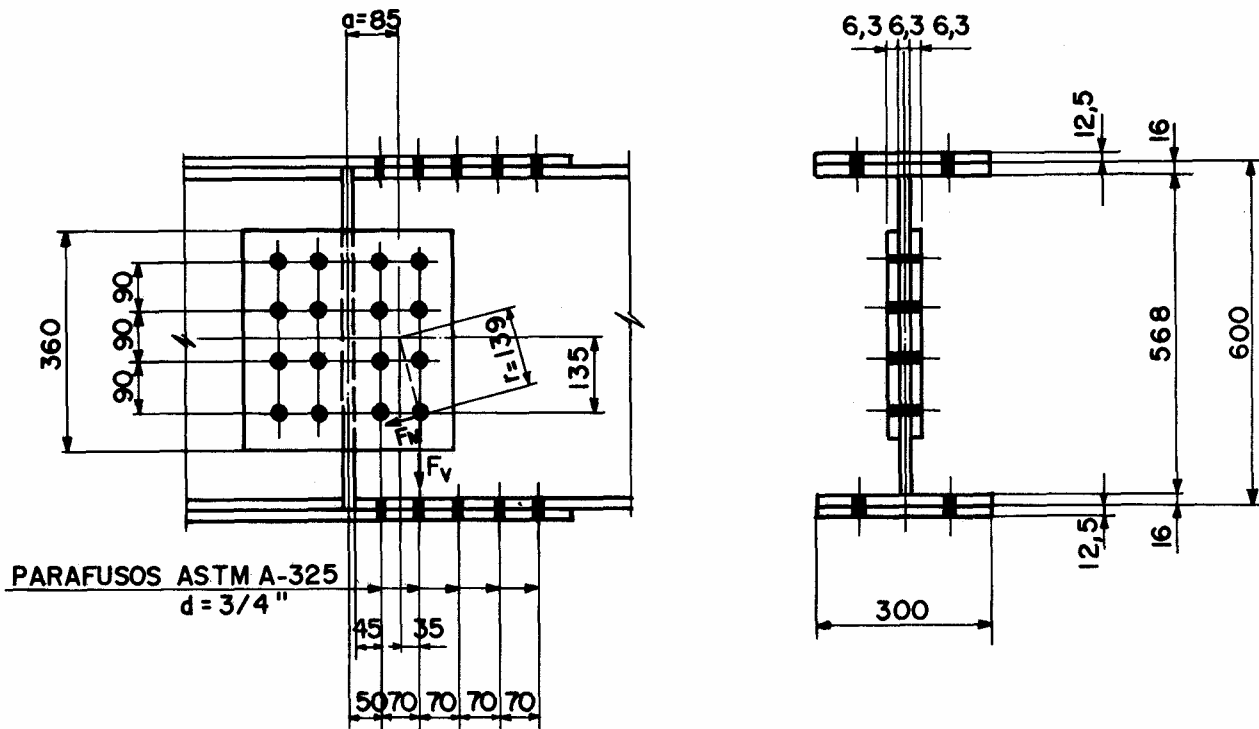


Fig. 24: Ligação do Exemplo 6.7

## 6.7.2 – CÁLCULO DAS ÁREAS DAS TALAS

### a) talas da alma:

considerando a resistência ao cisalhamento da tala (NBR 8800, 7.5.3.1),  $0,6f_y \times A_w \times \phi = 0,6f_y \times A_w \times 0,9$ ,

a área das talas deve ser:

$$A_w \geq \frac{V_d}{0,6f_y \times 0,9}$$

$$= \frac{371}{0,6 \times 25 \times 0,9} = 27,5 \text{ cm}^2$$

Levando-se em conta a altura esperada da tala, 36cm, e a espessura mínima de 0,63cm, a área total das duas talas é  $2 \times 36 \times 0,63 = 45,4 \text{ cm}^2$ , maior que  $27,5 \text{ cm}^2$  (fig. 24a)

### b) talas das mesas:

em geral é suficiente que as talas das mesas sejam colocadas apenas do lado de fora delas, conforme figura 24a.

Dependendo do esforço nas mesas, podem também ser necessárias talas do lado de dentro delas.

O esforço na tala será

$$\frac{M_d}{d-t} = \frac{37300}{60 - 1,25} = 635 \text{ kN}$$

Considerando que não há flambagem na tala comprimida, a resistência à tração ou compressão da tala, para escoamento da seção bruta, é  $f_y \times A_M \times \phi = f_y \times A_M \times 0,9 \therefore$

a área necessária da tala é

$$A_M = \frac{635}{0,9 \times f_y} = \frac{635}{0,9 \times 25} = 28,2 \text{ cm}^2$$

$\therefore$  será usada em cada mesa uma tala de  $12,5 \times 300 \text{ mm}$ , com área de  $37,5 \text{ cm}^2$  (largura igual à da mesa da viga).

### c) verificação das talas da alma à flexão:

por outro lado, a resistência de cálculo à flexão das talas da alma deverá ser suficiente para resistir o momento de cálculo,  $V_d \times a = 371 \times 8,5 = 31,5 \text{ kNm}$ , atuante nas talas (fig. 24a).

Considerando que as talas de alma atinjam a plastificação na flexão, a resistência de cálculo das talas é  $\phi M_n = 0,9 \times 2 \times Z \times f_y$ .



com  $Z = \frac{0,63 \times 36^2}{4} = 204,1 \text{ cm}^2$ , o módulo de resistência plástico de uma tala; então,

$$\phi M_n = 0,9 \times 2 \times 204,1 \times 25 = 9185,4 \text{ kNcm}$$

∴ o momento de cálculo 31,5 kNm é menor que  $\phi M_n$  e a tala está verificada à flexão.

### 6.7.3 – PARAFUSOS DAS TALAS DAS MESAS

De acordo com a NBR 8800, 7.3.2.3 ou tabela 1.4 b dessa publicação, a resistência ao corte do parafuso ASTM A-325,  $d = \frac{3}{4}$ " com o plano de corte passando pela rosca é  $\phi_v R_{nv} = 64,19 \text{ kN}$ .

Como o esforço na tala da mesa é 635 kN, o número de parafusos será:

$$\frac{635}{64,19} = 9,9$$

ou seja, serão usados 10 parafusos conforme indicado na fig. 24.

Em função do espaçamento entre furos, da distância dos centros dos furos às bordas das chapas, da espessura e da geometria das chapas da tala e a mesa, as seguintes verificações deverão ser feitas conforme, os exemplos anteriores.

- resistência à pressão de contato em furos, conforme NBR 8800 7.3.2.4, considerando o esmagamento sem rasgamento, rasgamento entre dois furos consecutivos e entre furo e borda.

### 6.7.4 - PARAFUSOS DAS TALAS DA ALMA

A quantidade e a disposição desses parafusos na tala são obtidas por tentativas, conforme o par de esforços de cálculo  $V_d$  e  $V_d \times a$ .

O usual é utilizar, no mínimo, duas colunas de parafusos nas talas, de cada lado da ligação, de preferência ao longo de toda a altura da alma.

Na figura 24 foram indicadas duas colunas de 4 parafusos cada, espaçados a 90 mm entre si.

Os esforços nos parafusos são obtidos de acordo com o procedimento utilizado no item 6.2 (LIGAÇÃO APARAFUSADA COM CISALHAMENTO EXCÊNTRICO).

a) esforços devidos a  $V_d = 371 \text{ kN}$  como são 8 parafusos de cada lado,

$$F_v = \frac{371}{8} = 46,4 \text{ kN}$$

b) esforços devidos a  $V_d \times a = 31,5 \text{ kNm}$

- o "momento de inércia" do conjunto de parafusos, de cada lado da tala é:

$$\begin{aligned} \sum r^2 &= \sum (x^2 + y^2) = 4(4,5^2 + 13,5^2) + \dots \\ &\dots + 8(3,5^2) \\ &= 908 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- os parafusos mais solicitados são os dois superiores ou inferiores, correspondentes ao raio  $r = 139 \text{ mm}$  (fig. 24). O esforço, perpendicular ao raio  $r$ , vale:

$$F_M = \frac{(V_d \times a)r}{\sum r^2} = \frac{3150 \times 13,9}{908} = 48,2 \text{ kN}$$

e tem como componente vertical:

$$48,2 \times \frac{3,5}{13,9} = 12,1 \text{ kN}$$

e como componente horizontal:

$$48,2 \times \frac{13,5}{13,9} = 46,8 \text{ kN} \therefore$$

A resultante dos esforços no parafuso é, considerando o valor de  $F_v = 46,4 \text{ kN}$ ,

$$R = \sqrt{(46,4 + 12,1)^2 + 46,8^2} = 74,9 \text{ kN}$$

Este valor é menor que a resistência ao corte do parafuso  $d = \frac{3}{4}$ ", ASTM A-325, considerando dois planos de corte (são duas talas de alma) e rosca no plano de corte:

$$64,19 \times 2 = 128,4 \text{ kN, ok.}$$

## Exemplos de Cálculo

As demais verificações para os parafusos da alma deverão ser feitas, conforme indicado anteriormente, para os parafusos da mesa.

### 6.7.5 – OUTRAS VERIFICAÇÕES

A tala da mesa, que foi verificada inicialmente ao escoamento por tensões normais (NBR 8800, 7.5.3.1), deverá também ser verificada, pelo mesmo item, à ruptura por tensões normais, sendo a seção líquida da tala calculada pelo item 5.1.1.2 da NBR 8800.

Em acréscimo, a tala da mesa, que é menos espessa que a mesa, deverá ser verificada ao colapso por rasgamento, conforme NBR 8800, 7.5.3.2.

A alma da viga, que é menos espessa a soma das duas talas de alma, também deverá ser verificada ao colapso por rasgamento.

### 6.8 – SOLDA DE COMPOSIÇÃO DE PERFIL SOLDADO

Verificar a solda de composição do perfil IS 500 x 67,7 do Manual Brasileiro da Construção Metálica, conforme figura 25.

A força cortante de cálculo na viga é 150 kN e a carga de 300 kN é aplicada junto ao flange tracionado da viga.

O aço é ASTM A-36 e o eletrodo E70-XX.

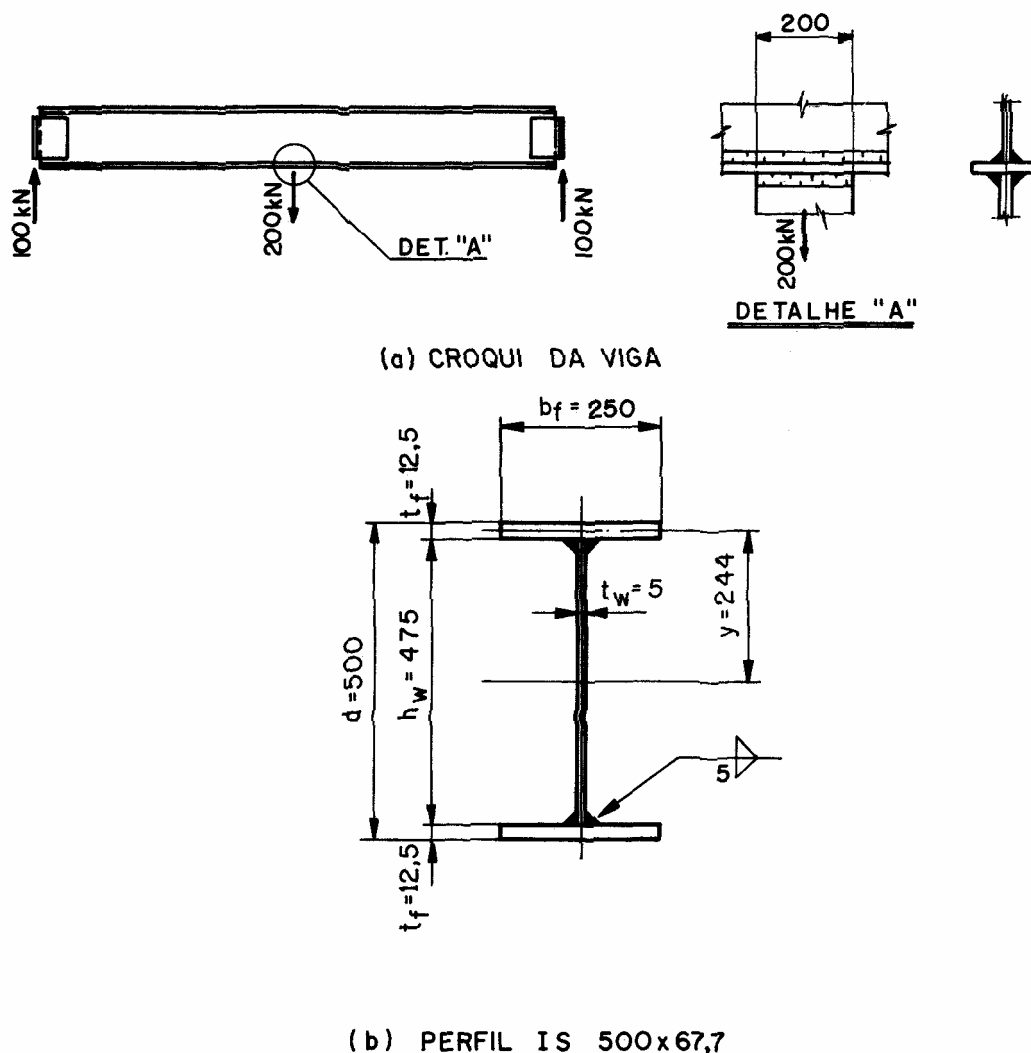


Fig. 25: Solda de Composição de Perfil Soldado

### 6.8.1 – CONSIDERAÇÕES

Normalmente os catálogos de fabricantes de perfis soldados indicam para solda da alma com a mesa (solda de composição), a espessura mínima de filete, compatível com a maior espessura das chapas, geralmente a da mesa (NBR 8800, tabela II ou tabela 2.3 desta publicação).

A espessura mínima para chapa de 12,5 mm é 5 mm, conforme indicado na figura 25b.

De acordo com a NBR 8800, 7.2.5, nota c, as soldas de composição de perfis soldados são calculadas em função da tensão de cisalhamento longitudinal na alma e de tensões locais naquele ponto.

Podem ser desconsideradas as tensões de tração ou compressão na solda paralelas ao eixo da solda.

Pela teoria de flexão de vigas, a força por cm em cada um dos filetes de composição, devida ao cisalhamento é dada por:

$$\frac{V_d \times Q}{2 \times I}, \text{ onde}$$

$$V_d = 100 \text{ kN,}$$

força cortante de cálculo na seção considerada da viga

$$Q = A_f \times y = 25 \times 1,25 \times 24,4 = 762,5 \text{ cm}^3,$$

momento estático da mesa da viga com relação ao eixo principal da seção perpendicular à alma.

$$I = 41607 \text{ cm}^4, \text{ momento de inércia da seção da viga.}$$

A força na solda é

$$\frac{100 \times 762,5}{2 \times 41607} = 0,92 \text{ kN/cm}$$

Adicionalmente a este efeito, a carga de 200 kN aplicada junto ao flange tracionado da viga, induz na solda um efeito local de tração, conforme det. A da fig. 23a, dado simplificado por (NBR 8800 5.7.3):

$$\frac{200}{2 \times 20} = 5,0 \text{ kN/cm} \therefore$$

a força resultante desses dois esforços é

$$\sqrt{0,92^2 + 5,0^2} = 5,09 \text{ kN/cm}$$

### 6.8.2 – VERIFICAÇÃO

Pela tabela 2.4, a resistência de cálculo do filete de 5 mm, para aço ASTM A-36 e eletrodo E70-XX é

$$\phi R_n = 0,68 \times 10 = 6,8 \text{ kN/cm}$$

valor maior do que a força de cálculo 5,09 kN/cm  $\therefore$  está ok.

### 6.8.3 - VERIFICAÇÕES ADICIONAIS NA VIGA

Devido ao efeito da carga concentrada de 200 kN no flange tracionado, a alma deverá ser verificada à tração, para aquela carga, na faixa de 200mm (NBR 8800, 5.7.3).

Se a carga fosse aplicada junto ao flange comprimido, a alma deveria ser verificada aos efeitos de enrugamento sob a carga concentrada e flambagem local, conforme NBR 8800, 5.7.2.

TABELA 1.1  
FORÇA DE PROTENSÃO MÍNIMA  
EM PARAFUSOS DE ALTA RESISTÊNCIA

DIÂMETRO DO PARAFUSO	FORÇA DE PROTENSÃO MÍNIMA (kN)	
	ASTM A-325	ASTM A-490
1/2"	53	66
5/8"	85	106
3/4"	125	156
7/8"	173	216
1"	227	283
1 1/8"	250	357
1 1/4"	317	453
1 1/2"	460	659

**Notas:**

- 1 - Os parafusos de alta resistência devem ser apertados de forma a se obter uma força de protensão adequada a cada diâmetro e tipo de parafuso usado, independente da ligação ser por atrito ou por contato.
- 2 - O aperto deve ser aplicado por um dos seguintes métodos:
  - rotação de porca
  - chave calibrada
  - indicador direto de tração.

TABELA 1.2  
**ÁREAS BRUTA E EFETIVA À TRAÇÃO DE PARAFUSOS  
 E BARRAS ROSQUEADAS**

a) *ASTM*

DIÂMETRO	PASSO DA ROSCA "P" (mm)	ÁREA BRUTA "A <sub>p</sub> " (mm <sup>2</sup> )	ÁREA EFETIVA À TRAÇÃO "A <sub>r</sub> " (mm <sup>2</sup> )
1/2"	1,95	126	91,6
5/8"	2,31	198	146
3/4"	2,54	285	215
7/8"	2,82	388	298
1"	3,18	506	391
1 1/8"	3,63	641	492
1 1/4"	3,63	792	625
1 3/8"	4,23	958	745
1 1/2"	4,23	1140	907
1 3/4"	5,08	1552	1126
2"	5,64	2027	1613

B) *ISO*

DIÂMETRO	PASSO DA ROSCA "P" (mm)	ÁREA BRUTA "A <sub>p</sub> " (mm <sup>2</sup> )	ÁREA EFETIVA À TRAÇÃO "A <sub>r</sub> " (mm <sup>2</sup> )
M12	1,75	113	84,3
M16	2,00	201	157
M20	2,50	314	245
M22	2,50	380	303
M24	3,00	452	353
M27	3,00	573	459
M30	3,50	707	561
M33	3,50	855	694
M36	4,00	1018	817
M42	4,50	1385	1120
M48	5,00	1810	1470

TABELA 1.3  
DIMENSÕES MÁXIMAS DE FUROS PARA PARAFUSOS  
E BARRAS ROSQUEADAS

a) ISO

DIÂMETRO NOMINAL (mm)	DIÂMETRO DO FURO PADRÃO (mm)	DIÂMETRO DO FURO ALARGADO (mm)	DIMENSÕES DE UM FURO POUCO ALONGADO (mm)	DIMENSÕES DE UM FURO MUITO ALONGADO (mm)
M12	13,5	17	13,5 x 18	13,5 x 30
M16	17,5	21	17,5 x 22	17,5 x 40
M20	21,5	25	21,5 x 26	21,5 x 50
M22	23,5	27	23,5 x 28	23,5 x 55
M24	25,5	29	25,5 x 30	25,5 x 60
M27	28,5	33	28,5 x 35	28,5 x 67,5
M30	31,5	38	31,5 x 39,5	31,5 x 75
M33	34,5	41	34,5 x 42,5	34,5 x 82,5
M36	37,5	44	37,5 x 45,5	37,5 x 90
M42	43,5	50	43,5 x 51,5	43,5 x 105
M48	49,5	56	49,5 x 57,5	49,5 x 120

b) ASTM

DIÂMETRO NOMINAL	DIÂMETRO DO FURO PADRÃO	DIÂMETRO DO FURO ALARGADO	DIMENSÕES DE UM FURO POUCO ALONGADO	DIMENSÕES DE UM FURO MUITO ALONGADO
1/2"	9/16"	11/16"	9/16" x 3/4"	9/16" x 1 1/4"
5/8"	11/16"	13/16"	11/16" x 7/8"	11/16" x 1 9/16"
3/4"	13/16"	15/16"	13/16" x 1"	13/16" x 1 7/8"
7/8"	15/16"	1 1/16"	15/16" x 1 1/8"	15/16" x 2 3/16"
1"	1 1/16"	1 1/4"	1 1/16" x 1 5/16"	1 1/16" x 2 1/2"
1 1/8"	1 3/16"	1 7/16"	1 3/16" x 1 1/2"	1 3/16" x 2 13/16"
1 1/4"	1 5/16"	1 5/16"	1 5/16" x 1 5/8"	1 5/16" x 3 1/8"
1 3/8"	1 7/16"	1 11/16"	1 6/16" x 1 3/4"	1 7/16" x 3 7/16"
1 1/2"	1 9/16"	1 13/16"	1 9/16" x 1 7/8"	1 9/16" x 3 3/4"
1 3/4"	1 13/16"	2 1/16"	1 13/16" x 2 1/8"	1 13/16" x 4 3/8"
2"	2 1/16"	2 5/16"	2 1/16" x 2 3/8"	2 1/16" x 5"

### NOTAS:

- 1 - Nas ligações parafusadas entre barras devem ser usados furos padrão, a não ser que seja aprovado pelo responsável pelo projeto o uso de furos alargados ou alongados
- 2 - Para ligações com furos alargados ou alongados veja item – 7.3.4.3 da NBR 8.800.

TABELA 1.4.a  
**RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO DE PARAFUSOS EM LIGAÇÕES POR CONTATO  
 (EM kN)**

ESPECIFICAÇÃO  ISO 898  CLASSE 4.6	DIÂMETRO NOMINAL										
	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M42	M48
	ÁREA BRUTA (BASEADO NO DIÂMETRO NOMINAL) mm <sup>2</sup>										
	113	201	314	380	452	573	707	855	1018	1385	1810
<b>TRAÇÃO</b>	21,50	38,23	59,73	72,27	86,01	108,9	134,4	162,6	193,5	263,4	344,0
<b>FORÇA CORTANTE</b>	11,11	19,76	30,88	37,36	44,46	56,27	69,47	84,06	100,0	136,2	177,8

**NOTAS:**

- 1 - Nas ligações por contato, além da Resistência à Tração e/ou ao corte, estas ligações devem ainda atender aos itens 7.3.2.4 e/ou 7.3.2.5 da NBR 8.800.
- 2 - Esta tabela só é aplicável ao método dos Estados Limites, não se aplicando no método das Tensões Admissíveis.  
 As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.4b  
RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DOS PARAFUSOS EM LIGAÇÕES POR CONTATO  
(EM kN)

ESPECIFICAÇÃO ASTM		DIÂMETRO NOMINAL										
		1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"	1 3/8"	1 1/2"	1 3/4"	2"
		ÁREA BRUTA mm <sup>2</sup>										
		126	198	285	388	506	641	792	958	1140	1552	2027
A-307	TRAÇÃO	25,63	40,04	57,66	78,49	102,5	129,7	160,2	193,8	230,6	313,9	410,0
	FORÇA CORTANTE	13,25	20,70	29,81	40,57	52,99	67,07	82,80	100,2	119,2	162,3	212,0
A-325	TRAÇÃO	58,79	91,85	132,3	180,0	235,1	261,5	322,9	390,7	464,9	632,8	826,6
	FORÇA CORT. (ROSCA FORA PL. DE CORTE)	40,76	63,68	91,71	124,8	163,0	181,3	223,9	270,9	322,4	438,8	573,1
	FORÇA CORT. (ROSCA NO PL. DE CORTE)	28,53	44,58	64,19	87,38	114,1	126,9	156,7	189,6	225,7	307,1	401,2
A-490	TRAÇÃO	73,75	115,2	165,9	225,9	295,0	373,4	460,9	557,7	663,7	903,4	118,0
	FORÇA CORT. (ROSCA FORA PL. DE CORTE)	51,13	79,89	115,0	156,6	204,5	258,9	319,6	386,7	460,2	626,4	818,1
	FORÇA CORT. (ROSCA NO PL. DE CORTE)	35,79	55,93	80,53	109,6	143,2	181,2	223,7	270,7	322,1	438,5	572,7

### NOTAS:

- 1 - Na determinação da solicitação de cálculo para parafusos sujeitos à tração, além das solicitações externas, deve ser levado em conta o efeito de alavanca ("Prying Action"), que pode aumentar consideravelmente a força de tração nos parafusos.
- 2 - Nas ligações por contato, além da Resistência à Tração e/ou ao corte, estas ligações devem ainda atender aos itens 7.3.2.4 e/ou 7.3.2.5 da NBR 8.800.
- 3 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis.



As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.5a

<b>RESISTÊNCIA DE CÁLCULO À PRESSÃO DE CONTATO                      NA PAREDE DO FURO EM kN POR mm DE ESPESSURA DE CHAPA                      RASGAMENTO ENTRE 2 FUROS</b>														
d em polegadas s em mm														
<b><math>f_y = 250 \text{ MPa}</math>  <math>f_u \geq 400 \text{ MPa}</math></b>								<b><math>f_y = 345 \text{ MPa}</math>  <math>f_u \geq 485 \text{ MPa}</math></b>						
s	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	8,60	-	-	-	-	-	-	10,42	-	-	-	-	-	-
40	9,14	-	-	-	-	-	-	11,09	-	-	-	-	-	-
45	9,14	11,11	-	-	-	-	-	11,09	13,48	-	-	-	-	-
50	9,14	11,43	12,14	-	-	-	-	11,09	13,86	14,72	-	-	-	-
55	9,14	11,43	13,64	13,17	-	-	-	11,09	13,86	16,54	15,96	-	-	-
60	9,14	11,43	13,72	14,67	-	-	-	11,09	13,86	16,63	17,78	-	-	-
65	9,14	11,43	13,72	16,00	15,69	-	-	11,09	13,86	16,63	19,40	19,02	-	-
70	9,14	11,43	13,72	16,00	17,19	-	-	11,09	13,86	16,63	19,40	20,84	-	-
75	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	18,21	-	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	22,03	-
80	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	19,71	-	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	23,90	-
85	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	20,57	20,74	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	24,95	25,14
90	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	20,57	22,24	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	24,95	26,96

**NOTA:**

- 1 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis.  
 As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.5b

RESISTÊNCIA DE CÁLCULO À PRESSÃO DE CONTATO NA PAREDE DO FURO EM kN POR mm DE ESPESSURA DE CHAPA RASGAMENTO ENTRE FURO E BORDA														
d em polegadas														
e em mm														
d	$f_y = 250 \text{ MPa}$ $f_u \geq 400 \text{ MPa}$							$f_y = 345 \text{ MPa}$ $f_u \geq 485 \text{ MPa}$						
	e	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"
20	6,00	-	-	-	-	-	-	7,28	-	-	-	-	-	-
25	7,50	7,50	-	-	-	-	-	9,10	9,10	-	-	-	-	-
30	9,00	9,00	9,00	9,00	-	-	-	10,91	10,91	10,91	10,91	-	-	-
35	9,14	10,50	10,50	10,50	10,50	-	-	11,09	12,73	12,73	12,73	12,73	-	-
40	9,14	11,43	12,00	12,00	12,00	12,00	-	11,09	13,86	14,55	14,55	14,55	14,55	-
45	9,14	11,43	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	11,09	13,86	16,37	16,37	16,37	16,37	16,37
50	9,14	11,43	13,72	15,00	15,00	15,00	15,00	11,09	13,86	16,63	18,19	18,19	18,19	18,19
55	9,14	11,43	13,72	16,00	16,50	16,50	16,50	11,09	13,86	16,63	19,40	20,00	20,00	20,00
60	9,14	11,43	13,72	16,00	18,00	18,00	18,00	11,09	13,86	16,63	19,40	21,83	21,83	21,83
65	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	19,19	19,19	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	23,64	23,64
70	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	19,19	21,00	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	24,95	25,46
75	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	19,19	22,50	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	24,95	27,28
80	9,14	11,43	13,72	16,00	18,29	19,19	22,86	11,09	13,86	16,63	19,40	22,17	24,95	27,72

**NOTA:**

1 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis.

As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.6

## RESISTÊNCIA DE CÁLCULO À FORÇA CORTANTE EM LIGAÇÕES POR ATRITO

DIÂMETRO DO PARAFUSO	RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO $\phi_v R_{nv}$ (kN)	
	PARAFUSO ASTM A-325	PARAFUSO ASTM A-490
1/2"	14,84	18,48
5/8"	23,80	29,68
3/4"	35,00	43,68
7/8"	48,44	60,48
1"	63,56	79,24
1 1/8"	70,00	99,96
1 1/4"	88,76	126,84
1 1/2"	128,80	184,52

**NOTAS:**

- 1 - A resistência ao deslizamento não pode ser superposta à resistência do parafuso ao corte.
- 2 - A tabela é aplicada ligações parafusadas em que os parafusos não estejam sujeitos à força de tração ( $T = 0$ ).
- 3 - Os furos da ligação são padrão ( $\xi = 1$ ) e o coeficiente de atrito das superfícies de contato  $\mu$  é 0,28.
- 4 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis. As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.7a  
**FAIXA DE ESPESSURAS DE CHAPA**  
**PARA DIMENSIONAMENTO AO EFEITO ALAVANCA (mm)**  
 $t_{\min.}$  corresponde a  $\alpha = 1$ ;  $t_{\max.}$  corresponde a  $\alpha = 0$ ; aço  $f_y = 250$  MPa

b (mm)	DIÂMETRO DO PARAF.	T = 60 kN			T = 80 kN			T = 100 kN			T = 120 kN		
		p (mm)			p (mm)			p (mm)			p (mm)		
		80	90	100	80	90	100	80	90	100	80	90	100
35	3/4"	15,4	14,3	13,4	17,6	16,6	15,6	19,8	18,5	17,4	21,6	20,2	19,1
		20,2	19,1	18,0	23,3	22,0	20,9	26,0	24,6	23,3	28,6	26,9	25,5
	M20	15,2	14,3	13,4	17,6	16,4	15,5	19,7	18,4	17,3	21,5	20,2	19,0
		20,0	18,8	17,9	23,0	21,7	20,6	25,8	24,4	23,0	28,3	26,6	25,3
40	3/4"	16,8	15,7	14,8	19,3	18,1	17,0	21,6	20,3	19,1	23,7	22,1	20,9
		22,1	20,8	19,8	25,3	24,0	22,8	28,6	26,9	25,4	31,2	29,5	27,9
	M20	16,7	15,6	14,6	19,3	18,0	16,9	21,5	20,2	19,0	23,6	22,1	20,8
		22,0	20,6	19,6	25,3	23,9	22,7	28,3	26,6	25,3	31,0	29,2	27,7
45	3/4"	18,1	16,9	16,0	20,9	19,6	18,4	23,3	21,8	20,5	25,5	23,9	22,5
		23,9	22,4	21,4	27,5	25,9	24,6	30,7	29,0	27,5	33,7	31,8	30,1
	M20	18,0	16,8	15,8	20,8	19,4	18,4	23,3	21,7	20,5	25,4	23,8	22,4
		23,6	22,3	21,1	27,4	25,8	24,5	30,6	28,8	27,4	33,5	31,6	29,9
50	3/4"	19,3	18,0	17,0	22,3	20,9	19,7	25,0	23,3	22,0	27,3	25,5	24,0
		25,4	24,0	22,8	29,4	27,7	26,3	32,9	31,0	29,4	36,0	33,9	32,2
	M20	19,3	18,0	16,9	22,2	20,8	19,6	24,8	23,3	21,8	27,2	25,4	24,0
		25,3	23,9	22,7	29,2	27,6	26,1	32,6	30,8	29,2	35,8	33,7	32,0
55	3/4"	20,5	19,1	18,0	23,6	22,1	20,9	26,4	24,7	23,3	28,9	27,0	25,5
		27,0	25,4	24,1	31,2	29,4	27,8	34,8	32,9	31,2	38,2	36,0	34,1
	M20	20,4	19,1	18,0	23,6	22,1	20,8	26,4	24,6	23,3	28,9	27,0	25,4
		26,9	25,3	24,0	31,0	29,2	27,7	34,7	32,6	31,0	37,9	35,8	34,0

## NOTAS:

$$1 - t = \sqrt{\frac{6 \times b' \times T \times 100}{1,25 \times \phi \times p \times f_y (1 + \alpha \delta)}} \quad \text{com: } \phi = 0,9; f_y \text{ em kN/cm}^2; T \text{ em kN};$$

$b', p \text{ e } t \text{ em mm}$

- Ver item 6.3.1.
- 2 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis.  
As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.7b  
**FAIXA DE ESPESSURAS DE CHAPA PARA DIMENSIONAMENTO  
 AO EFEITO ALAVANCA (mm)**

$t_{\min.}$  corresponde a  $\alpha = 1$ ;  $t_{\max.}$  corresponde a  $\alpha = 0$ ; AÇO ASTM A-36

b (mm)	DIÂMETRO DO PARAF.	T = 100 kN			T = 120 kN			T = 140 kN			T = 160 kN		
		P (mm)			P (mm)			P (mm)			P (mm)		
		90	100	110	90	100	110	90	100	110	90	100	110
40	M22	19,9	18,7	17,8	21,8	20,5	19,4	23,5	22,2	21,0	25,2	23,7	22,4
		26,2	24,8	23,8	28,7	27,2	25,9	31,1	29,4	28,1	33,2	31,5	30,0
	7/8"	19,9	18,7	17,8	21,8	20,5	19,4	23,5	22,2	21,0	25,2	23,6	22,4
		26,2	24,8	23,6	28,7	27,2	25,9	31,0	29,4	28,0	33,1	31,4	30,0
45	M22	21,6	20,3	19,2	23,6	22,2	21,1	25,6	24,0	22,8	27,2	25,6	24,3
		28,4	26,9	25,7	31,1	29,5	28,1	33,6	31,9	30,4	35,9	34,0	32,5
	7/8"	21,6	20,3	19,2	23,6	22,2	21,0	25,4	24,0	22,7	27,2	25,7	24,4
		28,3	26,9	25,7	31,1	29,4	28,1	33,5	31,8	30,4	35,9	34,0	32,4
50	M22	23,0	21,7	20,6	25,3	23,8	22,6	27,4	25,7	24,4	29,2	27,5	26,0
		30,4	28,8	27,5	33,4	31,6	30,1	36,0	34,1	32,5	38,5	36,5	34,8
	7/8"	23,0	21,7	20,6	25,3	23,8	22,6	27,4	25,7	24,4	29,2	27,5	26,0
		30,4	28,8	27,5	33,2	31,6	30,1	35,9	34,1	32,5	38,4	36,5	34,7
55	M22	24,5	23,0	21,8	26,9	25,3	24,0	29,0	27,4	25,9	31,0	29,2	27,7
		32,3	30,6	29,2	35,4	33,6	32,0	38,2	36,2	34,6	40,8	38,8	37,0
	7/8"	24,5	23,0	21,8	26,9	25,3	24,0	29,0	27,4	25,9	31,0	29,2	27,7
		32,3	30,6	29,2	35,3	33,5	31,9	38,2	36,2	34,6	40,8	38,8	37,0

**NOTA:**

- 1 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis.  
 As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.7c

**FAIXA DE ESPESSURAS DE CHAPA PARA DIMENSIONAMENTO  
AO EFEITO ALAVANCA**

$t_{\min.}$  corresponde a  $\alpha = 1$ ;  $t_{\max.}$  corresponde a  $\alpha = 0$ ; AÇO ASTM A-36

b (mm)	DIÂMETRO DO PARAF.	T = 140 kN			T = 160 kN			T = 180 kN			T = 200 kN		
		P (mm)			P (mm)			P (mm)			P (mm)		
		100	110	120	100	110	120	100	110	120	100	110	120
40	M24	22,0	20,8	19,8	23,4	22,2	21,1	24,8	23,5	22,4	26,2	24,8	23,6
		28,9	27,6	26,4	31,0	29,5	28,2	27,3	31,3	29,9	34,6	33,0	31,6
	1	21,7	20,5	19,6	23,3	22,0	20,9	24,6	23,3	22,2	25,9	24,6	23,4
		28,6	27,2	26,0	30,5	29,2	27,8	32,4	30,8	29,5	34,1	32,5	31,2
45	M24	23,8	22,6	21,5	25,4	24,1	22,9	27,0	25,6	24,4	28,4	26,9	25,6
		31,4	29,9	28,7	33,6	32,0	30,6	35,6	34,0	32,5	37,5	35,8	34,3
	1	23,6	22,4	21,4	25,3	23,9	22,8	26,8	25,3	24,1	28,2	26,8	25,4
		31,1	29,6	28,3	33,2	31,7	30,4	35,2	33,6	32,2	37,1	35,4	33,8
50	M24	25,6	24,2	23,0	27,4	25,8	24,6	28,9	27,5	26,2	30,5	28,9	27,5
		33,7	32,2	30,7	36,0	34,3	32,9	38,2	36,5	34,9	40,3	38,4	36,8
	1	25,4	24,0	22,9	27,1	25,7	24,5	28,8	27,2	25,9	30,4	28,8	27,4
		33,4	31,8	30,5	35,6	34,1	32,5	37,8	36,1	34,6	39,8	38,0	36,4
55	M24	27,1	25,7	24,5	29,0	27,5	26,2	30,8	29,2	27,7	32,4	30,7	29,3
		35,9	34,2	32,8	38,3	36,5	34,9	40,7	38,8	37,1	42,8	40,8	39,1
	1	27,0	25,6	24,4	28,9	27,4	26,0	30,7	29,0	27,6	32,3	30,6	29,2
		35,5	33,8	32,4	38,0	36,2	34,7	40,3	38,4	36,8	42,5	40,6	38,8

**NOTA:**

1 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis.

As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 1.8  
**LIGAÇÃO DE VIGAS COM UTILIZAÇÃO DE DUAS CANTONEIRAS  
 DE EXTREMIDADE PARAFUSADAS  
 PARAFUSOS ASTM A-325**

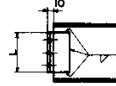
DIMENSÕES DA VIGA SUPORTADA (mm)		COMPRI-MENTO DA CANTONEIRA DE LIGAÇÃO "L" (mm)	NÚME-RO DE PARAFUSOS POR LINHA VERTICAL	RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DA LIGAÇÃO POR CONTATO (kN) (Ver Nota 1)				RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DA LIGAÇÃO POR ATRITO (kN) (Ver Notas 1 e 2)			
				DIÂMETRO DO PARAFUSO				DIÂMETRO DO PARAFUSO			
MÍN.	MÁX.			1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"
				b = 63,5 mm		b = 76,2 mm		b = 63,5 mm		b = 76,2 mm	
200	300	140	2	163,0	254,7	366,8	499,3	59,2	93,4	139,6	192,7
280	430	210	3	244,5	382,1	550,2	748,9	88,8	141,5	209,3	289,0
370	570	280	4	326,0	509,5	733,6	998,6	118,4	188,6	279,1	385,4
450	700	350	5	407,6	636,8	917,1	1248	148,0	235,8	348,9	481,7
530	850	420	6	489,1	764,2	1100	1498	177,6	282,9	418,7	578,0
600	990	490	7	570,6	891,6	1284	1747	207,2	330,1	488,5	674,4
670	1130	560	8	652,1	1019	1467	1997	236,8	377,2	558,3	770,7
750	-	630	9	733,6	1146	1651	2247	266,5	424,4	628,0	867,0
820	-	700	10	815,2	1274	1834	2496	296,1	471,5	697,8	963,4
890	-	770	11	896,7	1401	2017	2746	325,7	518,7	767,6	1060
960	-	840	12	978,2	1528	2201	2596	355,3	565,8	837,4	1156
1030	-	910	13	1060	1656	2384	3245	384,9	613,0	907,2	1252
<b>MATERIAL</b>				<b>ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA DA CANTONEIRA</b>							
				$f_y = 250 \text{ MPa}$ $f_u = 400 \text{ MPa}$	4,5	6,8	10,5				
$f_y = 345 \text{ MPa}$ $f_u = 480 \text{ MPa}$	3,8	5,7	8,7	12,7							
				<b>ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA DA ALMA DA VIGA</b>							
				$f_y = 250 \text{ MPa}$ $f_u = 400 \text{ MPa}$	8,9	11,1	13,4	15,6			
$f_y = 345 \text{ MPa}$ $f_u = 480 \text{ MPa}$	7,4	9,3	11,1	13,0							

**NOTAS:**

- (1) Para roscas incluídas no plano de corte, multiplicar os valores das resistências de cálculo pelo fator 0,7.
- (2) As resistências de cálculo tabelas são nominais, não sendo ponderadas. Veja NBR 8.800/86, item 7.3.3.1.

TABELA 1.9

**LIGAÇÕES DE VIGAS COM UTILIZAÇÃO DE DUAS CANTONEIRAS  
DE EXTREMIDADES SOLDADAS**

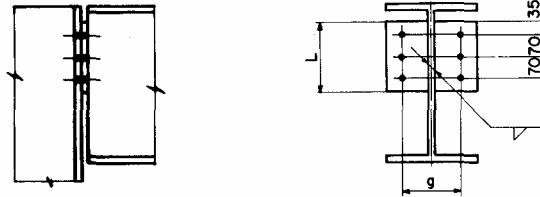


DIMENSÕES DA VIGA SUPORTADA (mm)		COMPRI- MENTO DA CANTO- NEIRA DE LIGAÇÃO “L” (mm)	RESISTÊNCIA DA SOLDA (KN) CARGA MÁXIMA FATORADA – ELETRODO E 70 XX (PARA ELETRODO E 60 XX MULTIPLICAR OS VALORES TABELADOS POR 0,85)							
MÍN.	MÁX.		PERNA DO FILETE DE SOLDA							
			5	6	8	10	5	6	8	10
			CANTONEIRA com b = 63,5 mm				CANTONEIRA com b = 65,0 mm			
200	300	140	372	447	598	750	378	455	609	607
280	430	210	484	581	775	969	489	586	782	978
370	570	280	590	707	943	1177	595	713	951	1188
450	700	350	698	837	1116	1395	702	843	1124	1404
530	850	420	804	965	1286	1608	809	970	1294	1617
600	990	490	910	1093	1457	1821	915	1098	1464	1830
670	1130	560	1017	1221	1628	2035	1022	1226	1635	2044
750		630	1125	1349	1799	2249	1129	1355	1807	2258
820		700	1232	1478	1971	2464	1236	1483	1978	2473
890		770	1339	1607	2142	2678	1343	1612	2149	2687
960		840	1446	1735	2314	2892	1450	1740	2321	2901
1030		910	1553	1864	2485	3106	1557	1869	2492	3115
			CANTONEIRA com b = 76,2 mm				CANTONEIRA com b = 75,0 mm			
200	300	140	358	430	576	722	352	423	566	709
280	430	210	478	574	767	961	472	567	758	949
370	570	280	630	756	1008	1260	626	752	1002	1253
450	700	350	737	884	1175	1468	733	880	1173	1459
530	850	420	843	1012	1349	1687	840	1008	1343	1679
600	990	490	950	1140	1520	1899	946	1135	1514	1892
670	1130	560	1056	1267	1690	2112	1053	1263	1684	2105
750		630	1163	1395	1860	2326	1159	1391	1855	2318
820		700	1270	1524	2032	2540	1266	1519	2026	2533
890		770	1377	1652	2203	2754	1373	1648	2197	2747
960		840	1484	1781	2374	2968	1480	1776	2369	2961
1030		910	1591	1909	2546	3182	1587	1905	2540	3175
AÇO DA VIGA SUPORTADA			ESPESSURA MÍNIMA DA ALMA DA VIGA SUPORTADA (mm) ELETRODO E 70 XX				ESPESSURA MÍNIMA ALMA DA VIGA SUPORTADA (mm) ELETRODO E 60 XX			
$f_y = 250$ MPa			10	12	16	20	9,8	11,7	15,7	19,6
$f_y = 345$ MPa			8,3	9,9	13,3	16,6	7,1	8,5	11,3	14,2



TABELA 1.10

## LIGAÇÕES DE VIGAS COM UTILIZAÇÃO DE CHAPAS DE EXTREMIDADE



$$f_y = 250 \text{ MPa}$$

ELETRODO E 70 XX

 $\phi$  variável de 90 a 140

NÚMERO DE PARAFUSOS POR LINHA VERTI-CAL	PARAFUSO	Ø 1/2"		Ø 5/8"		Ø 3/4"		Ø 7/8"		L COMPRI- MENTO DA CHAPA (mm)	LIMITES P/ ALTU- RA DA VIGA (mm)
		RESIST. DE CÁLC. MÁXIMO EM (kN)	ESPE- SURA MÍNIMA DA CHAPA (mm)**	RESIST. DE CÁLC. MÁXIMO EM (kN)	ESPE- SURA MÍNIMA DA CHAPA (mm)**	RESIST. DE CÁLC. MÁXIMO EM (kN)	ESPE- SURA MÍNIMA DA CHAPA (mm)**	RESIST. DE CÁLC. MÁXIMO EM (kN)	ESPE- SURA MÍNIMA DA CHAPA (mm)**		
1	A-307	26,50	3,0	41,40	3,0	59,62	3,2	81,14	4,3	70	120-200
	A-325	57,06	3,2	99,16	4,7	128,38	6,8	174,76	9,3		
	A-325*	81,52	4,5	127,36	6,8	183,42	10,5	-	-		
2	A-307	53,00	3,0	82,80	3,0	19,24	3,2	162,28	4,3	140	200-300
	A-325	114,12	3,2	178,32	4,7	256,76	6,8	349,52	9,3		
	A-325*	163,04	4,5	254,72	6,8	366,84	10,5	-	-		
3	A-307	79,50	3,0	124,20	3,0	178,86	3,2	243,42	4,3	210	300-450
	A-325	171,18	3,2	267,48	4,7	385,14	6,8	524,28	9,3		
	A-325*	244,26	4,5	382,08	6,8	550,26	10,5	-	-		
4	A-307	106,00	3,0	165,60	3,0	238,48	3,2	324,56	4,3	280	400-600
	A-325	228,24	3,2	356,64	4,7	513,52	6,8	699,04	9,3		
	A-325*	326,08	4,5	509,44	6,8	733,68	10,5	-	-		
5	A-307	132,50	3,0	207,00	3,0	298,10	3,2	405,70	4,3	350	450-750
	A-325	285,30	3,2	445,80	4,7	641,90	6,8	873,80	9,3		
	A-325*	407,60	4,5	636,80	6,8	917,10	10,	-	-		
6	A-307	159,00	3,0	248,40	3,0	357,72	3,2	486,84	4,3	420	550-900
	A-325	342,36	3,2	534,96	4,7	770,28	6,8	1048,56	9,3		
	A-325*	489,12	4,5	764,16	6,8	1100,52	10,5	-	-		
<b>RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DA SOLDA DE FILETE – ELETRODO E 70 XX (kN)</b>											
(A)	ESPESSURA MÍNIMA DA ALMA (mm)		COMPRI- MENTO DA CHAPA (mm)								
	$f_y = 250 \text{ MPa}$	$f_y = 345 \text{ MPa}$	70	140	210	280	350	420			
5	10,00	7,50	81,00	175,50	270,00	364,50	459,00	553,50			
6	12,00	9,00	93,96	207,36	320,76	434,16	547,56	660,96			
8	16,00	12,00	116,64	267,84	419,04	570,24	721,44	872,64			

## NOTAS:

\* Resistência ASTM A-325 em ligações com rosca excluída do plano de corte

\*\* As espessuras mínimas tabeladas para a chapa de extremidade foram obtidas a partir da resistência de cálculo dos parafusos. Para que as chapas de ligação tenham uma liberdade de rotação adequada, sugere-se, que essas espessuras estejam no intervalo entre 6 e 10 mm, inclusive.

TABELA 2.1

COMPATIBILIDADE DO METAL BASE COM O METAL DA SOLDADA (A), (B), (C) E (D)

METAL BASE		METAL DA SOLDADA COMPATÍVEL				
ABNT	ASTM	ARCO COM ELETRODO REVESTIDO	ARCO SUBMERSO	ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA	ARCO ELÉTRICO COM FLUXO DO NÚCLEO	
GRUPO I	A 36	AWS A5.1 OU A5.5	AWS A5.17	AWS A5.18	AWS A5.20	
	A 570 GRAU 40 A 570 GRAU 45	E 60 XX E70XX	F6XX-EXXX EXX-EXXX	ER 705-X	E6XT-X E 7XT-X (exceto- -2, -3, -10 e -cs)	
GRUPO II	A 441	AWS A5.1	AWS A5.17	AWS A5.18	AWS A5.20	
	A 572 GRAU 42 A 572 GRAU 50 A 242 (E) A 588 (E) (t ≤ 100 mm)	E 7015, E7016 E7018, E7028 ou A5.5 E 7018-XX	F7XX-EXXX AWS A5.23 F7X-ECXXX-XX	ER 705-X	E 7XT-X (exceto- -2, -3, -10 e -cs)	
NBR 6648 NBR 6649 NBR 6650 NBR 7007 (MR 250) NBR 8261 (GRAU A)						
NBR 5000 NBR 5004 NBR 5008 (E) NBR 5920 (E) NBR 5921 (E) NBR 7007 (AR 345) NBR 7007 (AR 290) NBR 7007 (AR COR 345 A OU B) (E) NBR 8261 (GRAUS B e C)						

(A) Em juntas constituídas de metais base com duas tensões de escoamento ou limites de resistência diferentes entre si, pode ser usado metal da solda compatível com o metal base de menor resistência; no entanto, devem ser usados eletrodos de baixo hidrogênio se um dos metais base o exigir.

(B) quando for feito alívio de tensões nas soldas, o metal da solda não pode conter mais de 0,05% de vanádio.

(C) Ver item 4.16 da AWS D1.1-82 para requisitos diferentes ao metal da solda usado com processos eletrogás e eletroscória.

(D) Devem ser usados somente eletrodos de baixo hidrogênio ao soldar os aços do grupo I, com espessuras maiores que 25 mm, em estruturas sujeitas à fadiga.

(E) Podem ser necessários processos e materiais de soldagem especiais (p. ex. eletrodos apropriados tais como E 7018G – com adição de cobre, para dar característica de resistência à corrosão atmosférica)

TABELA 2.2

**DIMENSÕES NOMINAIS MÁXIMAS DE SOLDAS DE FILETE AO LONGO DA BORDA DE UM ELEMENTO SOLDADO E RESISTÊNCIA MÍNIMA À TRAÇÃO DO METAL DA SOLDA**

<b>ELEMENTOS MENOS ESPESSO A SER SOLDADO (mm)</b>	<b>DIMENSÃO MÁXIMA DA PERNA (mm)</b>	<b>DIMENSÃO MÁXIMA DA GARGANTA (mm)</b>
$t_2 < 6,35$	$t_2$	
6,35	5,0	3,5
8,0	6,5	4,5
9,5	8,0	6,0
12,5	11,0	8,0
16,0	14,5	10,5
19,0	17,5	12,5
22,4	21,0	15,0
25,0	23,5	16,5
31,5	30,0	21,0
37,5	36,0	25,5
50,0	48,5	34,0

$t_2$  = espessura do elemento menos espesso

<b>RESISTÊNCIA MÍNIMA À TRAÇÃO DO METAL DA SOLDA</b>	
<b>METAL DA SOLDA</b>	<b><math>f_w</math> (MPa)</b>
E60XX; F6X-EXXX; E6XT-X	415
E70XX; F7X-EXXX; ER70S-X; E7XT-X	485

TABELA 2.3

**DIMENSÕES MÍNIMAS DE SOLDAS DE FILETE  
EXECUTADAS COM UM PASSE**

<b>ELEMENTOS MAIS ESPESSO A SER SOLDADO (mm)</b>	<b>DIMENSÃO MÍNIMA DA PERNA (mm)</b>	<b>DIMENSÃO DA GARGANTA (mm)</b>
$t_1 \leq 6,35$	3	2,1
$6,35 < t_1 \leq 12,5$	5	3,5
$12,5 < t_1 \leq 19,0$	6	4,2
$t_1 > 19,0$	8	5,7

$t_1$  = espessura do elemento mais espesso

**NOTAS:**

- 1 - A dimensão mínima da solda é determinada em função do elemento menos espesso a ser soldado. Esta dimensão não precisa ser maior do que a espessura do elemento menos espesso, desde que a resistência de cálculo necessária seja atendido, e que se use pré aquecimento.
- 2 - A dimensão mínima da perna não pode ser considerada maior que 25% do comprimento efetivo da solda.

TABELA 2.4

**SOLDA DE FILETE**  
**RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO**

<b>RESISTÊNCIA DE CÁLCULO <math>\phi R_n</math> POR MILÍMETRO DE FILETE DE SOLDA (kN/mm)</b>			
<b>PERNA (mm)</b>	<b>CISALHAMENTO NA SEÇÃO EFETIVA</b>		
	<b>Aço <math>f_y = 250</math> MPa Eletrodo E60XX</b>	<b>Aço <math>f_y = 250</math> MPa Eletrodo E70XX</b>	<b>Aço <math>f_y = 345</math> MPa Eletrodo E70XX</b>
3	0,40	0,41	0,46
4	0,53	0,54	0,62
5	0,66	0,68	0,77
6	0,79	0,81	0,93
7	0,92	0,95	1,08
8	1,06	1,08	1,23
9	1,19	1,22	1,39
10	1,32	1,35	1,54

**NOTAS:**

- 1 - A solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na solda que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas.
- 2 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis. As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 2.5

**SOLDAS DE ENTALHE – PENETRAÇÃO TOTAL**  
**RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO  $\phi R_n$**

MENOR ESPESURA DAS PARTES SOLDADAS	RESISTÊNCIA DE CÁLCULO $\phi R_n$ POR MILÍMETRO DE CORDÃO DE SOLDA (kN/mm)					
	TRAÇÃO OU COMPRESSÃO PARALELA AO EIXO DA SOLDA		TRAÇÃO OU COMPRESSÃO NORMAL À SEÇÃO EFETIVA DA SOLDA		CISALHAMENTO DA SEÇÃO EFETIVA	
	Aço $f_y = 250$ MPa Eletrodo E70XX/ E60XX	Aço $f_y = 345$ MPa Eletrodo E70XX	Aço $f_y = 250$ MPa Eletrodo E70XX/ E60XX	Aço $f_y = 345$ MPa Eletrodo E70XX	Aço $f_y = 250$ MPa Eletrodo E70XX/ E60XX	Aço $f_y = 345$ MPa Eletrodo E70XX
5,0	1,13	1,55	1,13	1,55	0,68	0,93
6,3	1,42	1,96	1,42	1,96	0,85	1,17
8,0	1,80	2,48	1,80	2,48	1,08	1,49
9,5	2,14	2,95	2,14	2,95	1,28	1,77
12,5	2,81	3,88	2,81	3,88	1,69	2,33
16,0	3,60	4,97	3,60	4,97	2,16	2,98
19,0	4,28	5,90	4,28	5,90	2,57	3,54
22,4	5,04	6,96	5,04	6,96	3,02	4,17
25,0	5,63	7,76	5,63	7,76	3,38	4,66
31,5	7,09	9,78	7,09	9,78	4,25	5,87
37,5	8,44	11,64	8,44	11,64	5,06	6,99
50,0	11,25	15,53	11,25	15,53	6,75	9,32

**NOTAS:**

- 1 - As resistências de cálculo apresentadas nesta tabela são válidas para juntas pré qualificadas, ver item 4.4.
- 2 - Esta tabela só é aplicável ao Método dos Estados Limites, não se aplicando ao Método das Tensões Admissíveis. As solicitações nominais deverão ser majoradas pelos respectivos coeficientes de ponderação.

TABELA 2.6  
FILETE DE SOLDA TRATADO COMO LINHA  
FORÇA NA SOLDA

TIPO DE SOLICITAÇÃO		TENSÃO NA SOLDA	FORÇA NA SOLDA
		NA SOLDA kN/cm <sup>2</sup>	TRATADA COMO LINHA kN/cm
SOLDA PRIMÁRIA			
	TRACÃO OU COMPRESSÃO	$f = \frac{P}{A}$	$F = \frac{P}{A_w}$
	CISALHAM. VERTICAL	$f = \frac{V}{A}$	$F = \frac{V}{A_w}$
	FLEXÃO	$f = \frac{M}{S}$	$F = \frac{M}{S_w}$
	TORÇÃO	$f = \frac{TC}{J}$	$F = \frac{TC}{J_w}$
SOLDA SECUNDÁRIA			
	CISALHAM. HORIZ.	$f_v = \frac{VA_y}{I t}$	$F = \frac{VA_y}{I_n}$
	CISALHAM. TORCIONAL HORIZ.	$f_v = \frac{T}{2A_t}$	$F = \frac{T}{2A}$

PROPRIEDADES DA SOLDA TRATADA COMO LINHA

FIGURA FORMADA PELO FILETE b = LARG. d = ALT.	FLEXÃO COM RELAÇÃO A XX	TORÇÃO
	$W = \frac{d^2}{6} \text{ in.}^2$	$I_p = \frac{d^3}{12} \text{ in.}^3$
	$W = \frac{d^2}{3}$	$I_p = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$W = bd \quad I$	$I_p = \frac{b^3 + 3bd^2}{6}$
	$W_w = \frac{4bd+d^2}{6} = \frac{d^2(4b+d)}{6(2b+d)}$ top bottom	$I_p = \frac{(b+d)^4 - 6b^2d^2}{12(b+d)}$
	$W_w = bd + \frac{d^2}{6}$	$I_p = \frac{(2b+d)^3}{12} - \frac{b^2(b+d)^2}{(2b+d)}$
	$W_w = \frac{2bd+d^2}{3} = \frac{d^2(2b+d)}{3(b+d)}$ top bottom	$I_p = \frac{(b+2d)^3}{12} - \frac{d^2(b+d)^2}{(b+2d)}$
	$W_w = bd + \frac{d^2}{3}$	$I_p = \frac{(b+d)^3}{6}$
	$W_w = \frac{2bd+d^2}{3} = \frac{d^2(2b+d)}{3(b+d)}$ top bottom	$I_p = \frac{(b+2d)^3}{12} - \frac{d^2(b+d)^2}{(b+2d)}$
	$W_w = \frac{4bd+d^2}{3} = \frac{4bd^2+d^3}{6b+3d}$ top bottom	$I_p = \frac{d^3(4b+d)}{6(b+d)} + \frac{b^3}{6}$ bottom
	$W_w = bd + \frac{d^2}{3}$	$I_p = \frac{b^3 + 3bd^2 + d^3}{6}$
	$W_w = 2bd + \frac{d^2}{3}$	$I_p = \frac{2b^3 + 6bd^2 + d^3}{6}$
	$W_w = \frac{\pi d^2}{4}$	$I_p = \frac{\pi d^3}{4}$
	$I = \frac{\pi a}{2} D^2 + \frac{d^2}{2}$ $W_w = \frac{I_w}{c}$ where $c = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{2}$	