



# ESTRUTURAS METÁLICAS

## LIGAÇÕES SOLDADAS

Maj Moniz de Aragão

1. Resistência do material da solda (pág. 11)
2. Coeficientes de ponderação  $\gamma$  (pág. 14)
3. Cálculo de solda de entalhe (pág. 15)
4. Cálculo de solda de filete (pág. 18)
5. Limitações da solda de filete (pág. 25)
6. Simbologia básica de solda (pág. 30)
7. Exercícios (pág. 33)

# SOLDA

“A solda é um tipo de união por coalescência do material, obtida por fusão das partes adjacentes”

Nos tipos mais empregados na indústria da construção, a fusão do aço é provocada pelo calor produzido por um **arco voltaico** entre um **eletrodo** tubular e o aço a soldar, havendo deposição do material do eletrodo.

O material fundido deve ser **isolado** do ambiente para evitar a deposição de impurezas na solda.

# LIGAÇÕES SOLDADAS

## Vantagens

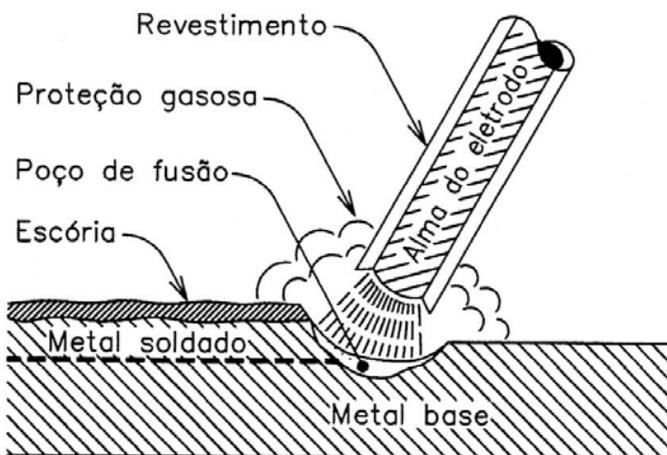
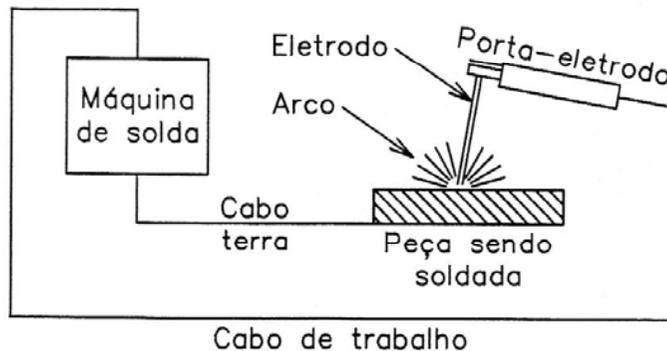
- Economia de material (área bruta = área líquida);
- Ligações “mais rígidas”;
- Facilidade para corrigir ou efetuar modificações;
- Quantidade menor de peças;
- Melhor acabamento;

## Desvantagens

- Energia elétrica suficiente
- Maior tempo de montagem (fabricação)
- Dificuldade na desmontagem
- Controle de qualidade
- Fadiga

# PROCESSOS DE SOLDAGEM

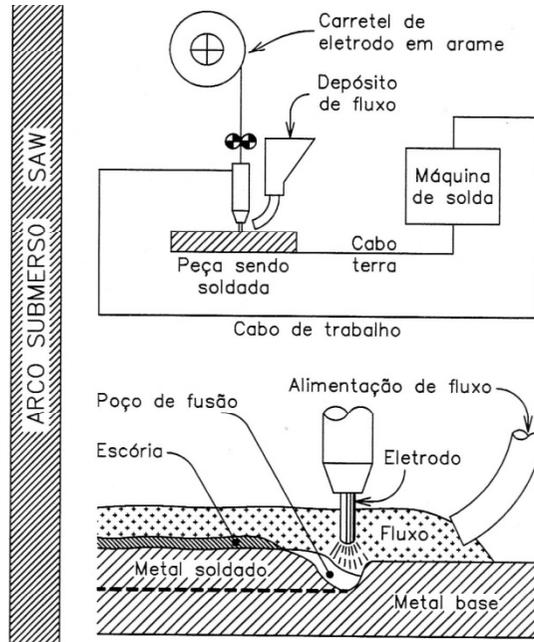
Arco Elétrico com Eletrodo revestido:  
*SMAW - Shielded Metal Arc Welding*



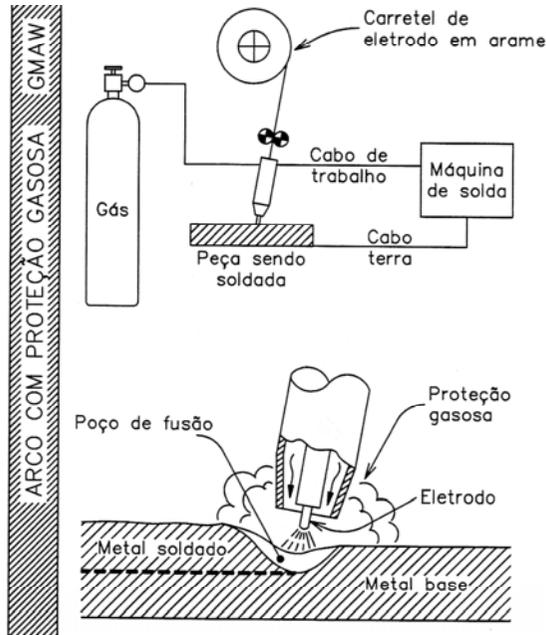
O revestimento é consumido junto com o eletrodo, transformando-se parte em gases inertes, parte em escória.



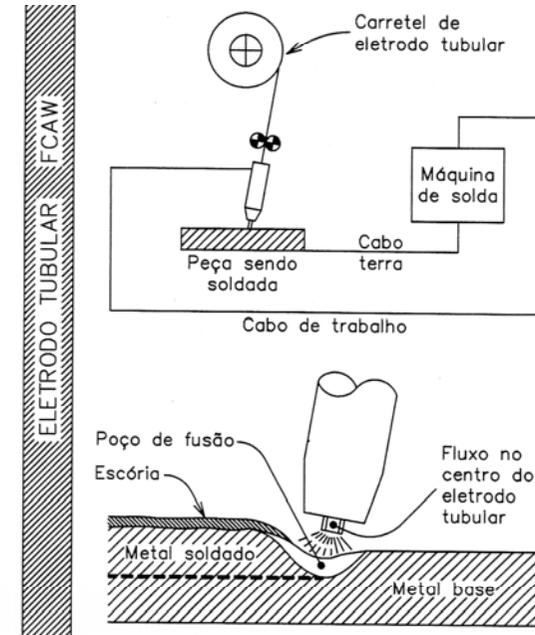
# PROCESSOS DE SOLDAGEM



O eletrodo é um fio metálico sem revestimento e o arco voltaico e o metal fundido ficam isolados pelo material granular



MIG/MAG - o eletrodo é um arame sem revestimento e o arco voltaico e a proteção da poça de fusão é feita por um gás lançado pela tocha de soldagem

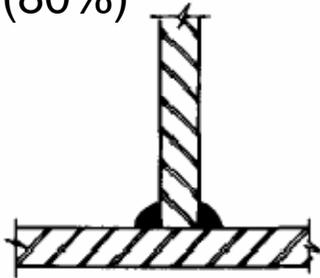


Arco elétrico com fluxo no núcleo – o eletrodo é um tubo fino preenchido com material que protege a poça de fusão

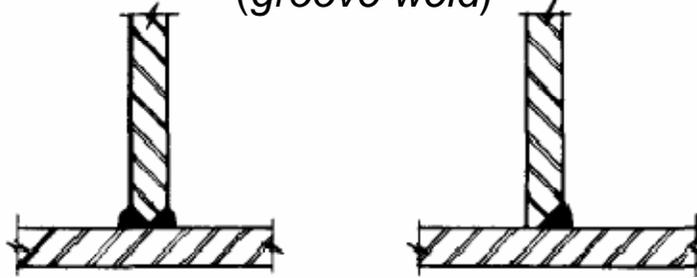
# Classificação

Quanto à posição do material de solda em relação ao material base

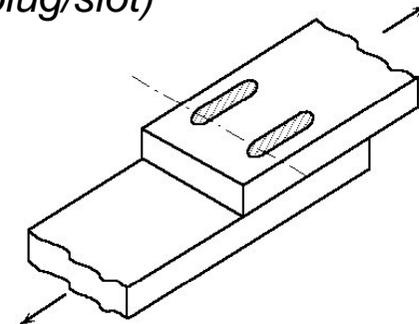
Solda de **FILETE** (*fillet*)  
(80%)



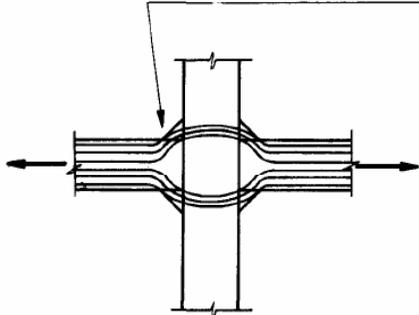
Solda de **ENTALHE**  
(*groove weld*)



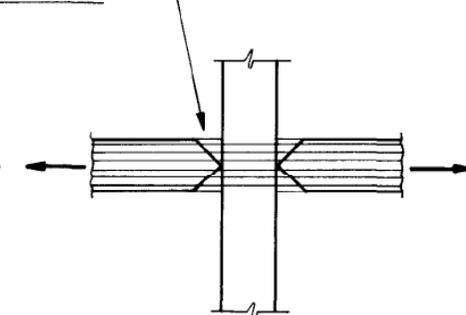
Solda de **TAMPÃO**  
(*plug/slot*)



SOLDA DE FILETE:  
DESCONTINUIDADE DO MATERIAL  
ALTERA FLUXO DE TENSÕES  
NA TRANSMISSÃO DO ESFORÇO.

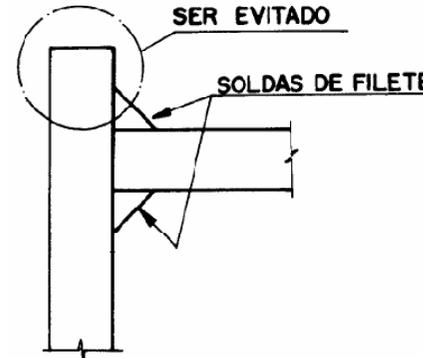


SOLDA DE PENETRAÇÃO TOTAL:  
FLUXO DE TENSÕES SEM ALTERAÇÃO

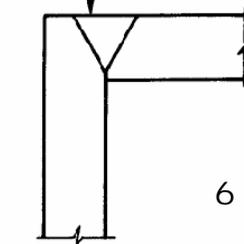


RESSALTO A  
SER EVITADO

SOLDAS DE FILETE



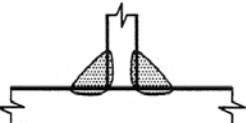
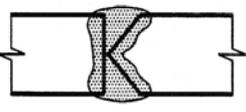
SOLDA DE ENTALHE  
PARA EVITAR O RESSALTO.

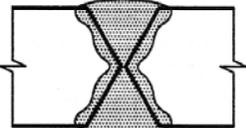
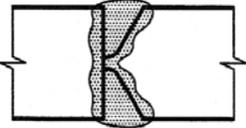
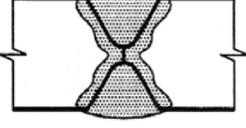


Ref: "Ligações em Estruturas Metálicas", Instituto Brasileiro de Siderurgia, IBS/CBCA, 2004.

# Classificação

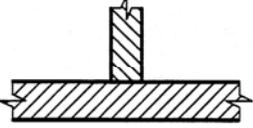
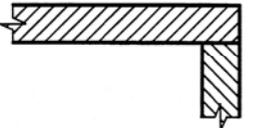
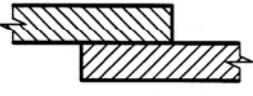
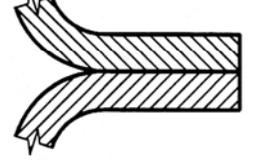
## Tipos de Soldas de Filete e de Entalhe

 CÓDIGO	Tipo de Solda	 CÓDIGO
SIMPLES	DUPLA	
Filete		
		
Reta		
		
Entalhe em Bisel		
		

Entalhe em "V"		
		
Entalhe em "J"		
		
Entalhe em "U"		
		

# Classificação

Quanto à posição relativa das peças soldadas (tipo de junta)

Tipo de Junta	 CÓDIGO
Topo	 
"T"	 
Canto	 
Sobreposta (transpasse)	 
Borda	 

# Resistência do material da solda

Compatibilidade do metal-base com o metal da solda:

	Metal base		Metal da solda compatível			
	ABNT	ASTM	Arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)	Arco submerso (SAW)	Arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)	Arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)
<b>Grupo I</b>	NBR 6648 (CG-24 - $t \leq 20$ mm ) NBR 6648 (CG-26 - $t \leq 20$ mm ) NBR 6649 (CF-24) NBR 6649 (CF-26) NBR 6650 (CF-24) NBR 6650 (CF-26) NBR 7007 (MR 250 - $t \leq 20$ mm )	A36 ( $t \leq 20$ mm ) A500 Grau A A500 Grau B A570 Grau 40 A570 Grau 45	AWS A5.1 - E60XX E70XX  AWS A5.5 <sup>5)</sup> - E70XX-X	AWS A5.17 - F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX  AWS A5.23 <sup>5)</sup> - F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS)  AWS A5.28 <sup>5)</sup> - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, -3, -10, -13, -14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12 mm)  AWS A5.29 <sup>5)</sup> - E6XTX-X, E6XT-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM

Tabela 7 – NBR 8800

AWS D1.1

# Resistência do material da solda

Compatibilidade do metal-base com o metal da solda:

	Metal base		Metal da solda compatível			
	ABNT	ASTM	Arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)	Arco submerso (SAW)	Arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)	Arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)
<b>Grupo II</b>	NBR 5000 (G-30) NBR 5000 (G-35) NBR 5004 (F32/Q32) NBR 5004 (F35/Q35) NBR 5008 (Classes 1, 2 e 2A - $t \leq 100$ mm) <sup>4)</sup> NBR 5920 <sup>4)</sup> NBR 5921 <sup>4)</sup> NBR 7007 (AR-290) NBR 7007 (AR-345) NBR 7007 (AR-COR 345 A ou B) <sup>4)</sup> NBR 8261 (Graus B e C)	A36 ( $t > 20$ mm) A570 Grau 50 A570 Grau 55 A572 Grau 42 A572 Grau 50 A572 Grau 55 A588 ( $t \leq 100$ mm) <sup>4)</sup> A913 Grau 50 A992	AWS A5.1 - E7015, E7016, E7018, E7028  AWS A5.5 <sup>5)</sup> - E7015-X, E7016-X, E7018-X	AWS A5.17 - F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX  AWS A5.23 <sup>5)</sup> - F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS)  AWS A5.28 <sup>5)</sup> - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, -3, -10, -13, -14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12 mm)  AWS A5.29 <sup>5)</sup> - E7XTX-X, E7XTX-XM

Tabela 7 – NBR 8800

AWS D1.1

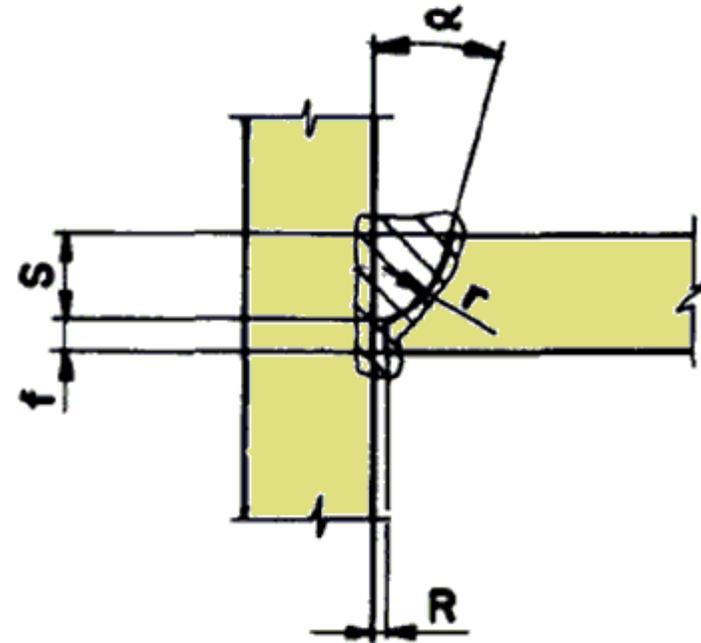
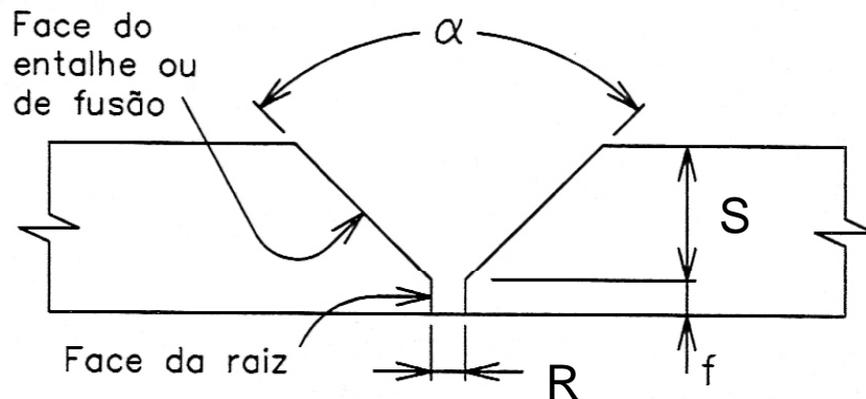


# Cálculo de solda por entalhe

Em geral, por penetração total...



“como se a emenda não existisse”



- $\alpha$  = ângulo do chanfro
- $S$  = profundidade do chanfro / altura entalhe
- $f$  = nariz do chanfro / face da raiz
- $r$  = raio do chanfro
- $R$  = abertura da raiz

# Cálculo de solda por entalhe

## Garganta e área efetiva

Garganta efetiva é aquela relativa à seção que se supõe crítica para solda.

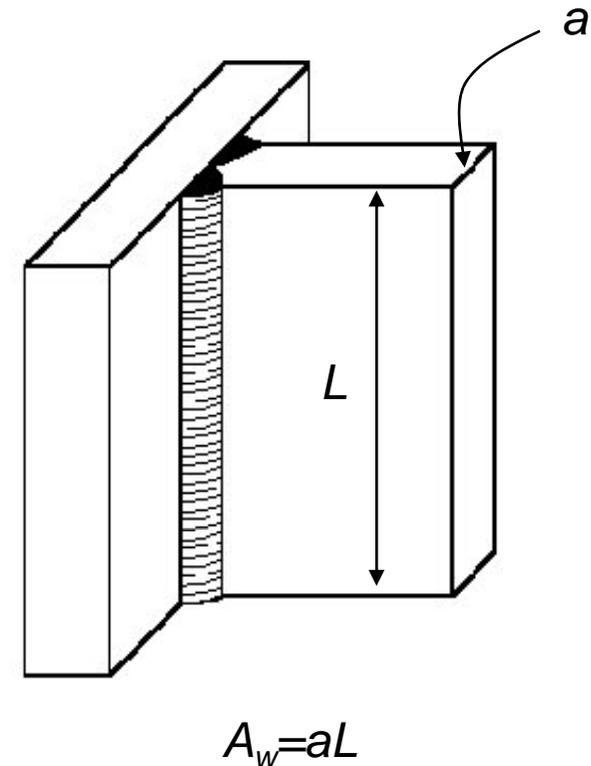
NBR 8800:

$a \Rightarrow$  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. (Tabela 5)

$L \Rightarrow$  comprimento efetivo: é o comprimento real da solda que, no caso da solda de entalhe, deve coincidir com a largura da peça ligada;

$A_w \Rightarrow$  área efetiva: é o produto da garganta efetiva pelo comprimento efetivo;



# Cálculo de solda por entalhe

## Resistências de cálculo – NBR 8800:2008

Força resistente de cálculo de soldas

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

$f_d$  - resistência de cálculo ou projeto

$f_k$  - resistência característica

$\gamma_m$  - coeficiente de ponderação

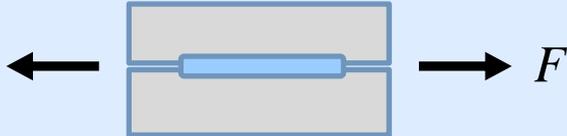
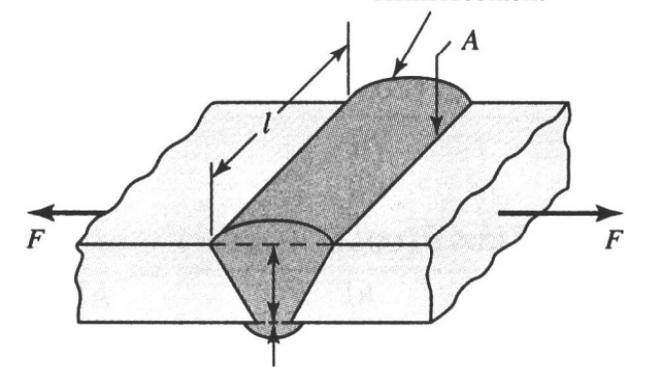
Combinações	Aço estrutural, pinos e parafusos ( $\gamma_a$ )		Metal da solda ( $\gamma_w$ )	
	Escoamento e Instabilidade ( $\gamma_{a1}$ )	Ruptura ( $\gamma_{a2}$ )	Tração ( $\gamma_{w1}$ )	Cisalhamento ( $\gamma_{w2}$ )
Normais	1,10	1,35	1,25	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,25	1,35
Excepcionais	1,00	1,15	1,05	1,15

Tabela 3 e Tabela 8 – NBR 8800

# Cálculo de solda por entalhe

## Resistências de cálculo

NBR 8800: Tabela 8 – Força resistente de cálculo de soldas

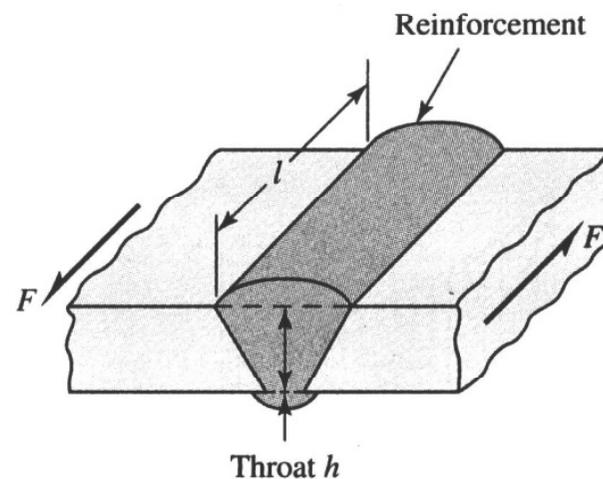
Tipo de solda	Tipo de sollicitação e orientação	Força resistente de cálculo: $F_{w,R_d}$
Soldas de penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda 	não precisa ser considerado, mesma do metal base
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda 	Metal-base: $A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$

# Cálculo de solda por entalhe

## Resistências de cálculo

NBR 8800: Tabela 8 – Força resistente de cálculo de soldas

Tipo de solda	Tipo de solicação e orientação	Força resistente de cálculo: $F_{w,R_d}$
Soldas de penetração total	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	<i>Metal-base:</i> $0,6 \cdot A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$



(b) Shear loading

$$\tau = \frac{F}{hl}$$

# Cálculo de solda de filete

## Garganta e área efetiva

“é a mais usada”

Soldas por arco submerso verificar item 7.2.2.2-b NBR 8800

NBR 8800:

- 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.
- 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.

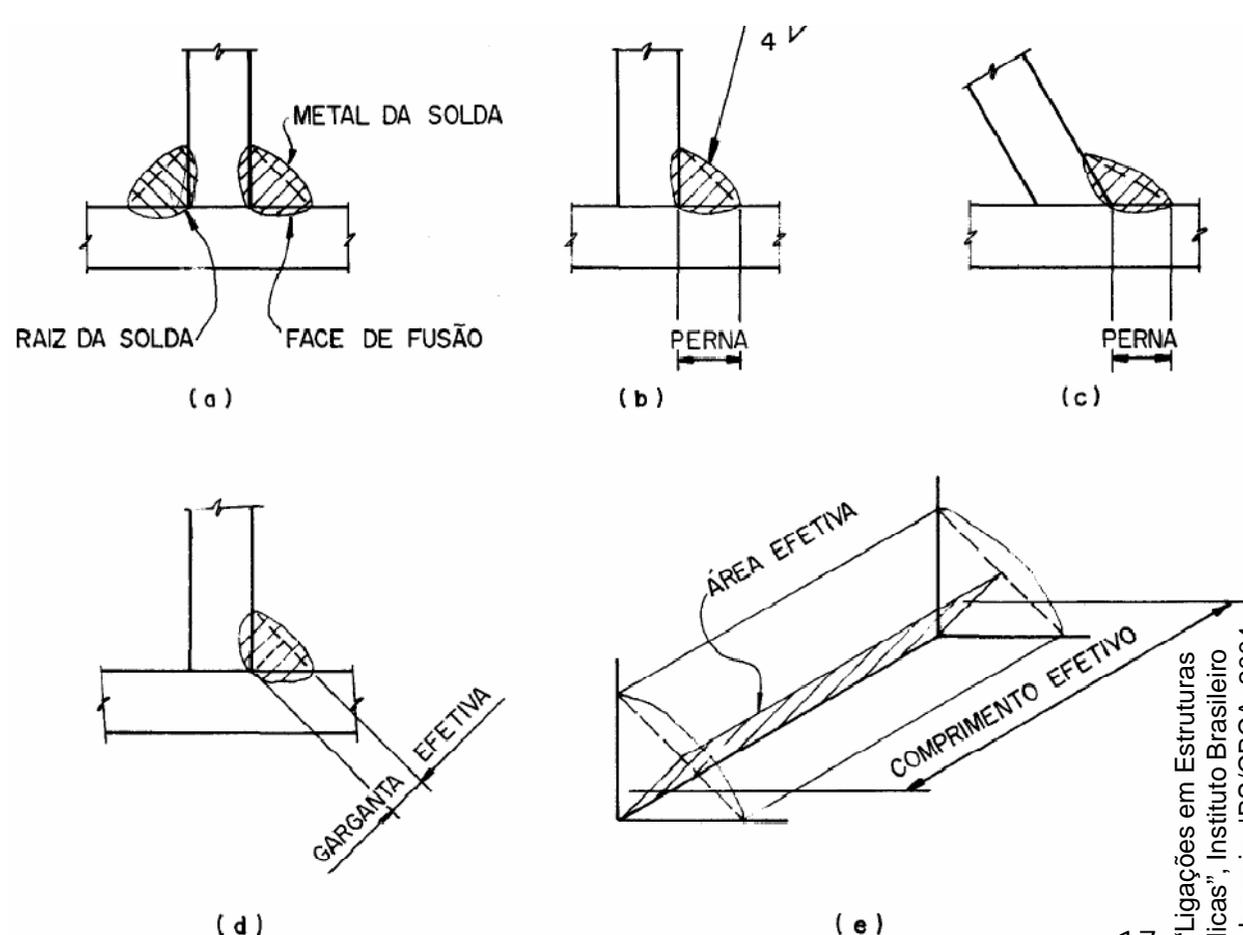


Fig. 7: Soldas de Filete

# Cálculo de solda de filete

## Resistências de cálculo

NBR 8800: Tabela 8 – Força resistente de cálculo de soldas

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo: $F_{w,R_d}$
Soldas de filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Mesma do metal base
	Cisalhamento na seção efetiva (*)	Metal-base deve atender <b>6.5</b> Metal da solda: $0,6 \cdot A_w f_w / \gamma_{w2}$

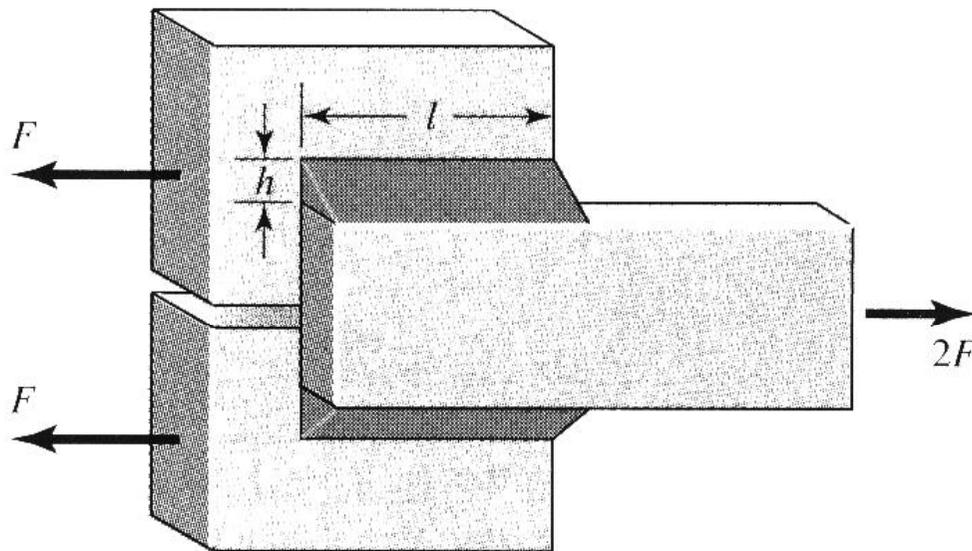
(\*) - a solicitação de cálculo é igual à **resultante vetorial de todas as forças** de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas

# Cálculo de solda de filete

## Resistências de cálculo

“a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas”

1 - cordão de solda longitudinal à força de corte:



$$\tau_{\max} = \frac{F}{0,707h \cdot l}$$

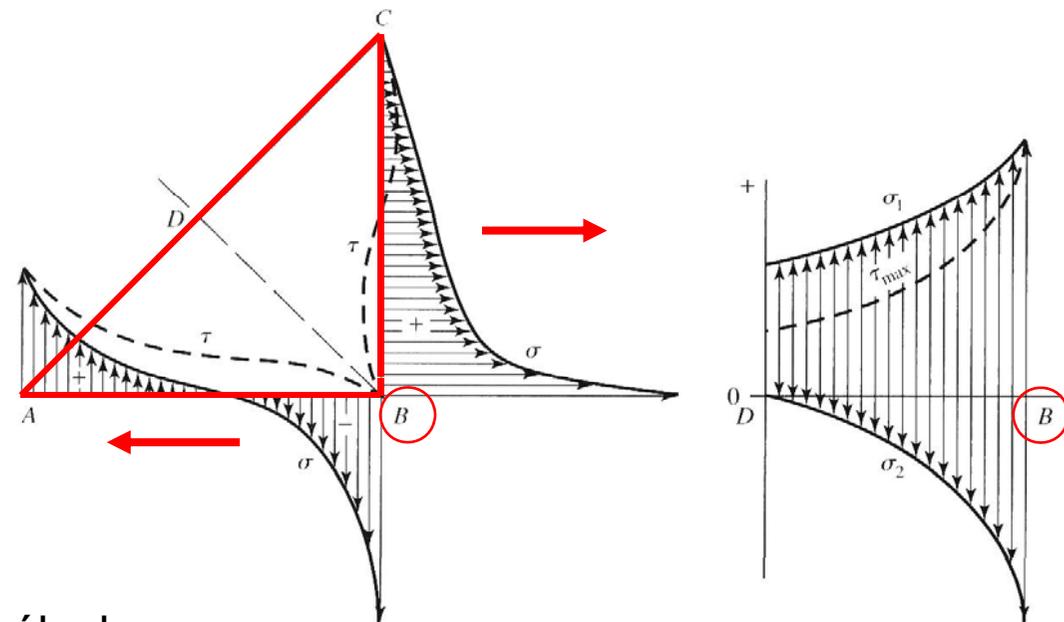
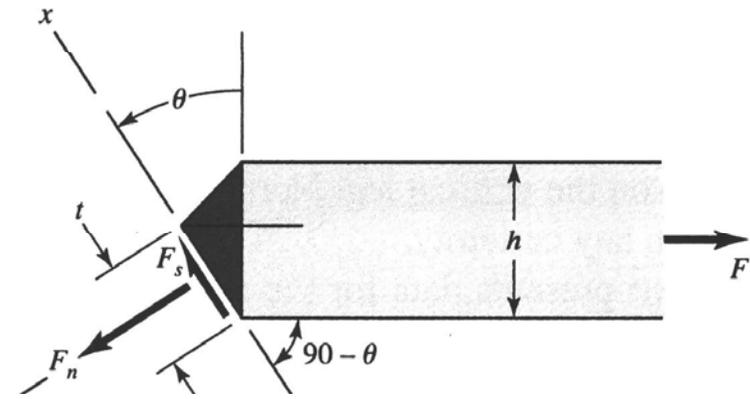
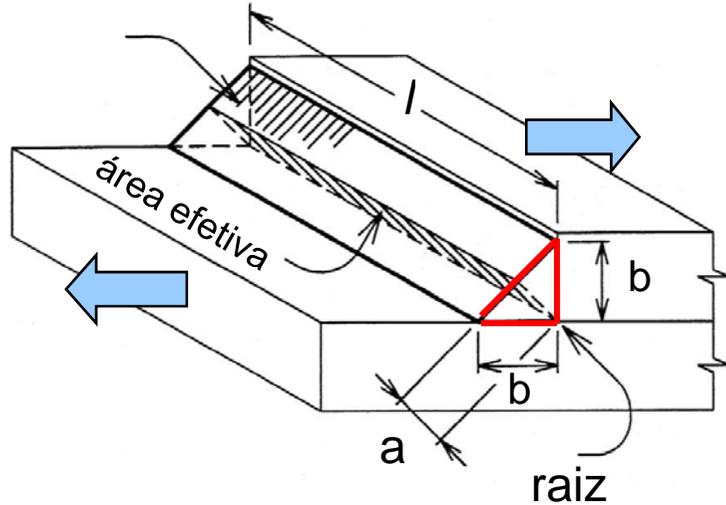
“minimum  
throat area”

# Cálculo de solda de filete

## Distribuição de tensões na solda de filete

2 - Cordão de solda transversal à força de corte:

face da solda



$$\tau \cong \frac{1,196F}{h \cdot l} < \frac{1,414F}{h \cdot l} = \frac{F}{0,707h \cdot l}$$

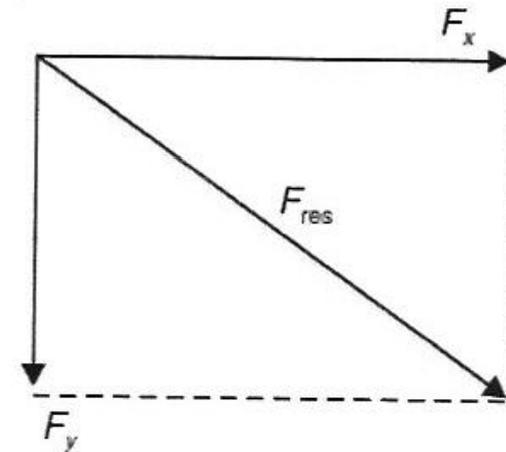
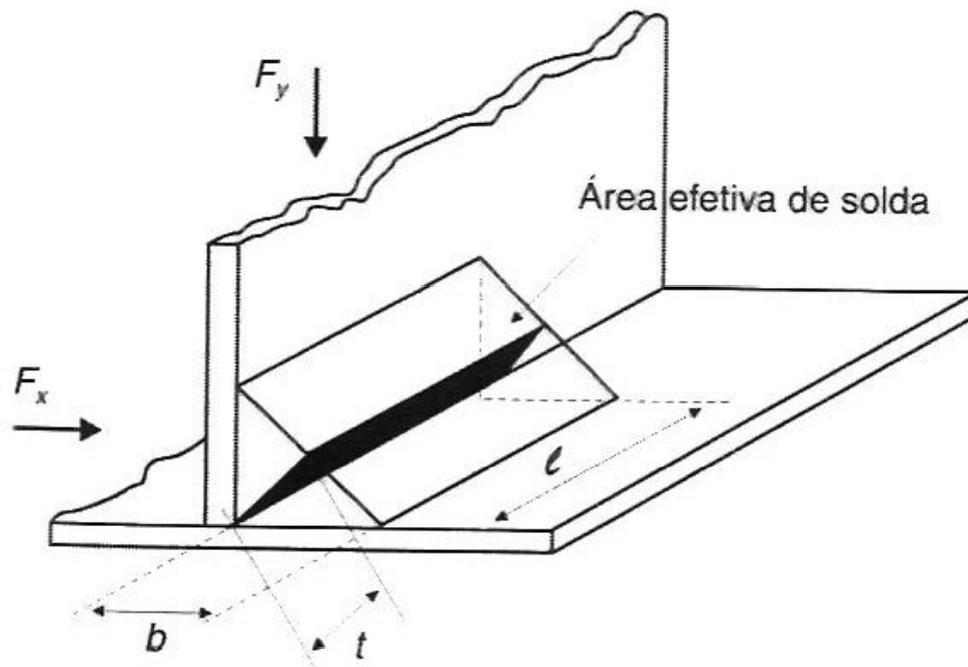
Logo, pode-se admitir para efeito de cálculo que as tensões na solda sejam de “cisalhamento” na seção da garganta...



# Cálculo de solda de filete

## Resistências de cálculo

“a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas”

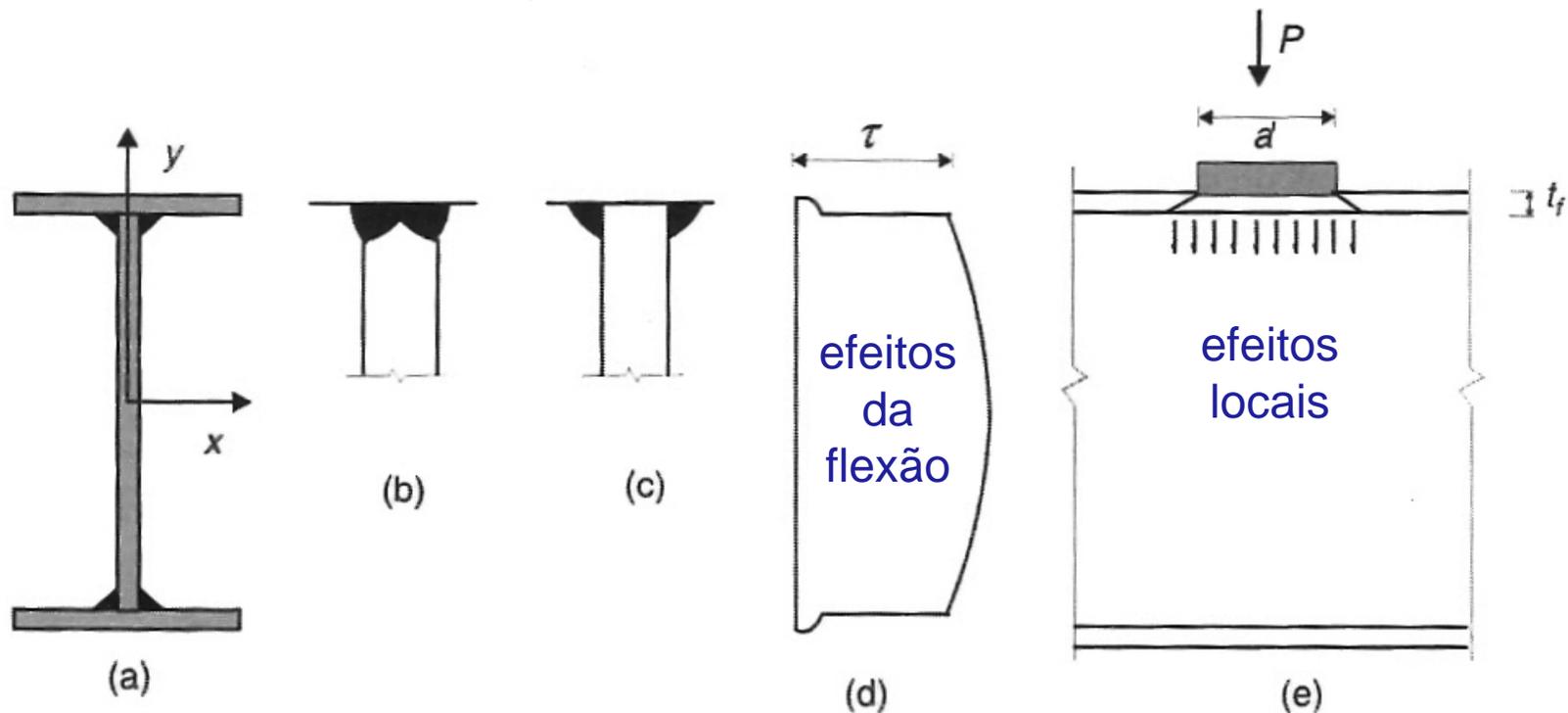


# Cálculo de solda de filete

## Resistências de cálculo

Ligações de alma com mesa de viga (solda longitudinal):

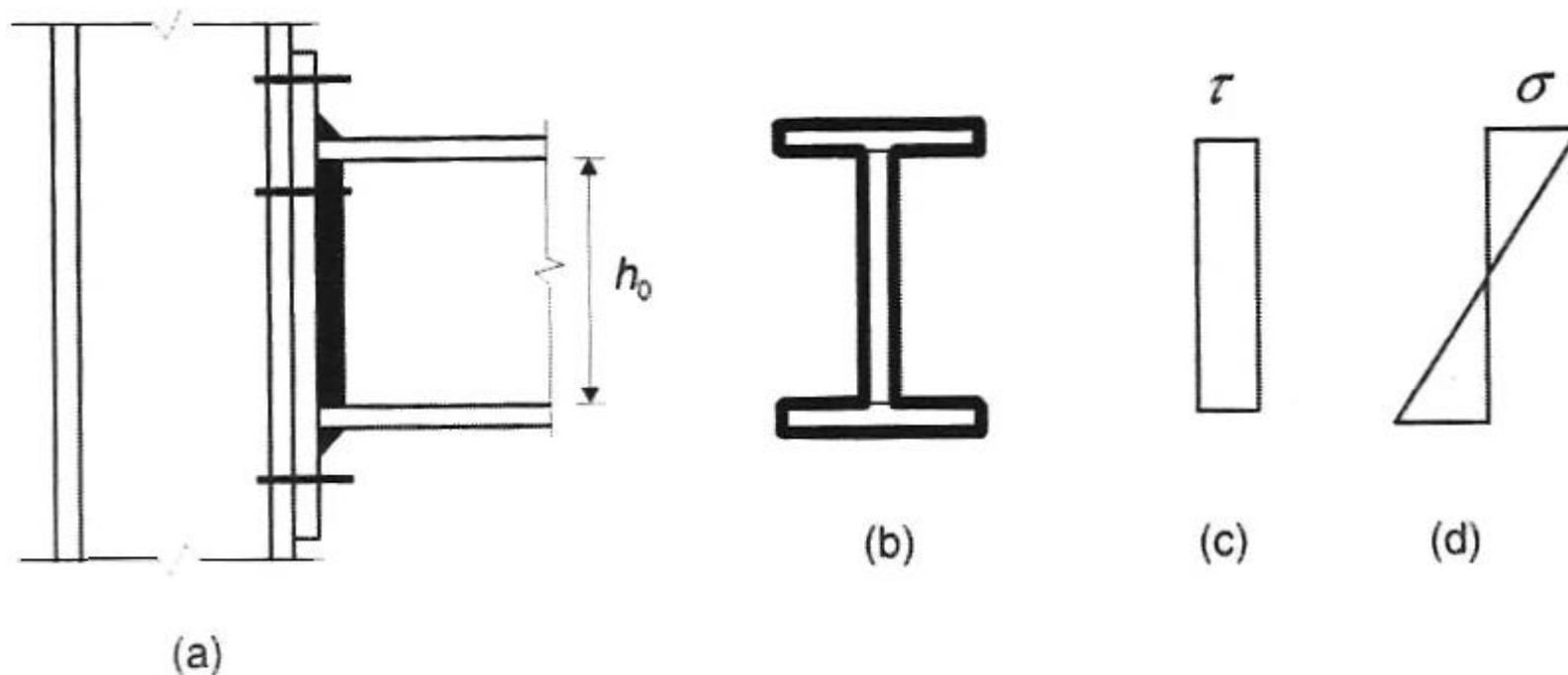
Esse tipo de ligação pode ser calculado sem consideração das tensões normais, verificando-se apenas as tensões cisalhantes.



# Cálculo de solda de filete

## Resistências de cálculo

Tensões cisalhantes combinadas com tensões normais  
(solda transversal, de topo):



A ligação transmite cortante (cisalhamento médio) e momento fletor.

# Cálculo de solda de filete

## Limitações (item 6.2.6.2)

### Dimensão mínima:

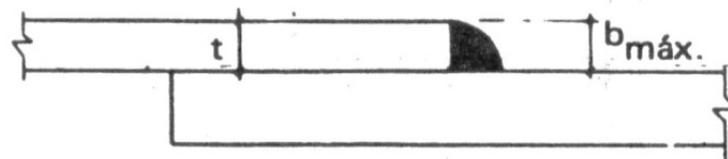
*em função da parte menos espessa soldada...*

Menor espessura do metal base na junta (mm)	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, $d_w$
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3 mm
Acima de 6,35 até 12,5	5 mm
Acima de 12,5 até 19	6 mm
Acima de 19	8 mm

executadas somente com um passe

### Dimensão máxima:

*em função da espessura do material cuja borda está sendo soldada*

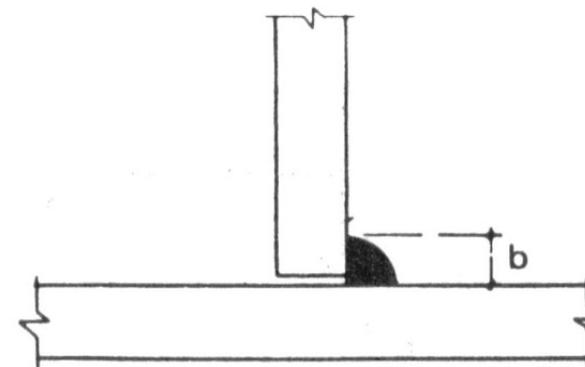


$$t < 1/4'' \text{ (6,3mm)}$$

$$b_{\text{máx.}} = t$$

$$t \geq 1/4''$$

$$b_{\text{máx.}} = t - 1/16'' \cong t - 1,5 \text{ mm}$$



$b_{\text{máx.}}$  não especificado

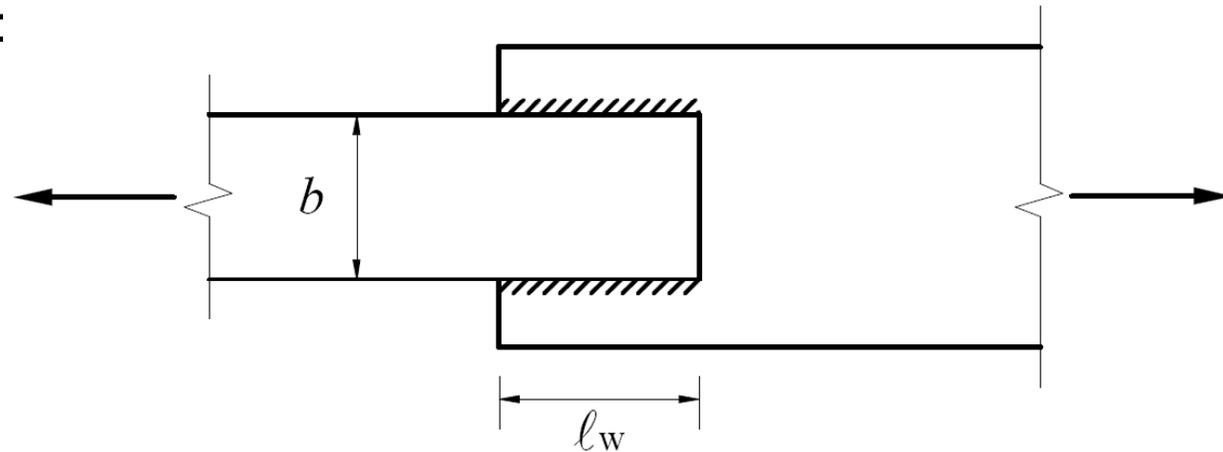
# Cálculo de solda de filete

## Limitações (item 6.2.6.2)

**Comprimento mínimo:**  $l_w \geq 4d_w \not\leq 40mm$

Soldas de filete longitudinais nas ligações extremas de barras chatas tracionadas:

$$l_w \geq b$$



$$C_t = 1,00, \text{ para } l_w \geq 2b$$

$$C_t = 0,87, \text{ para } 2b > l_w \geq 1,5b$$

$$C_t = 0,75, \text{ para } 1,5b > l_w \geq b$$

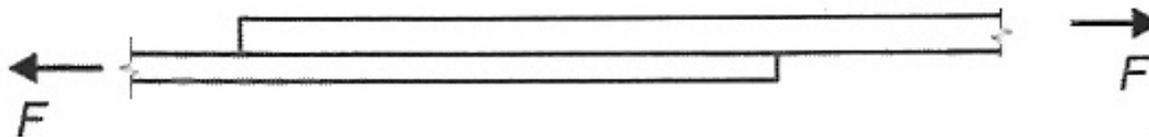
$$A_e = C_t A_n$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_e - \text{Área líquida efetiva} \\ C_t - \text{Coef de Redução (5.2.5.d)} \\ A_n - \text{Área líquida da barra (5.2.4)} \end{array} \right.$$

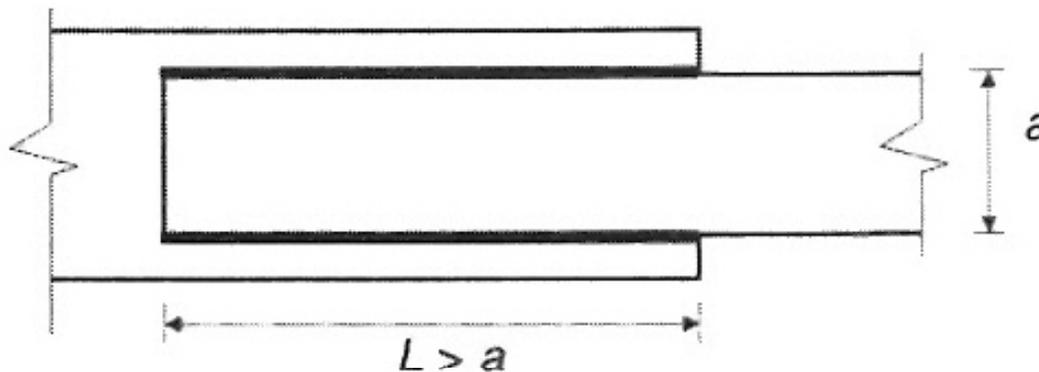
# Solda de filete – emendas axiais soldadas

## Limitações (itens 6.2.2.2 e 6.2.6.2) – filetes longitudinais

As maiores tensões ocorrem nas extremidades do cordão de solda...



$\ell$   $\Rightarrow$  comprimento efetivo



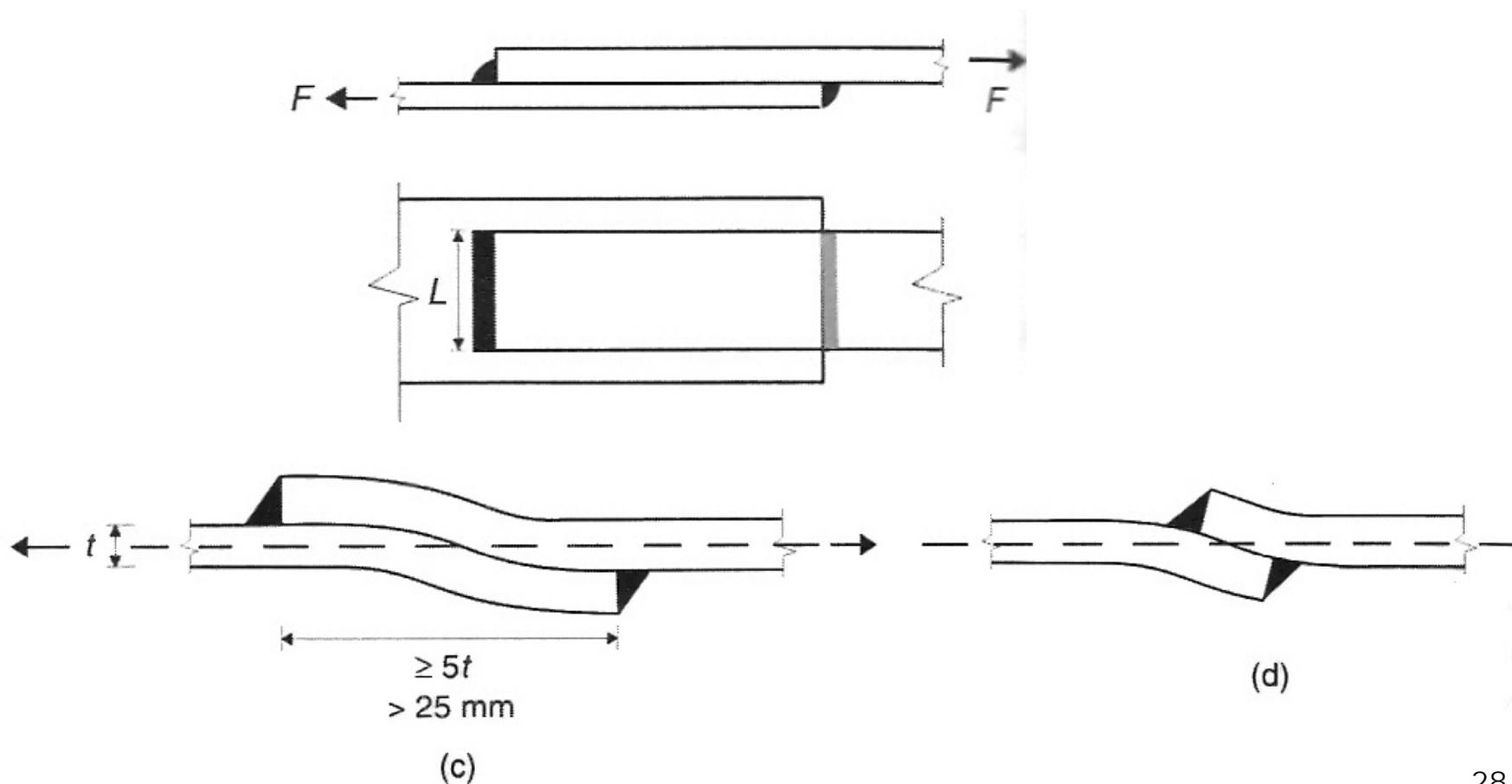
$\beta \Rightarrow$  fator redutor de soldas longas ( $\ell = \beta L$ )

$$\ell_w \geq 100d_w \Rightarrow \beta = 1,2 - 0,002 \frac{\ell_w}{d_w} \quad (0,6 \leq \beta \leq 1,0)$$

# Solda de filete – emendas axiais soldadas

## Limitações (itens 6.2.2.2 e 6.2.6.2) – filetes transversais

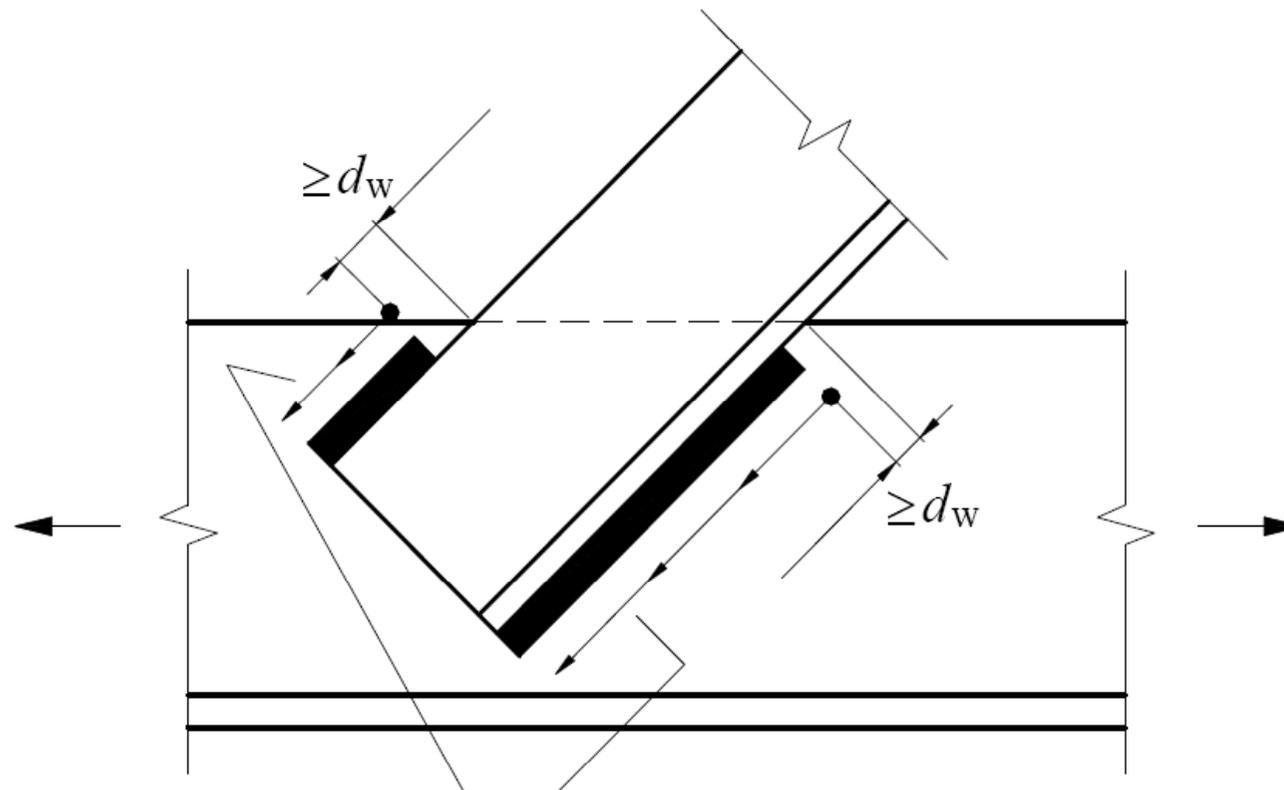
Comprimento mínimo de traspasse:



# Cálculo de solda de filete

## Limitações (item 6.2.6.2.6)

“para juntas por superposição nas quais uma das partes se estende além de uma borda sujeita a tensões de tração longitudinais, os filetes devem ser interrompidos a uma distância desta borda não inferior à dimensão da perna do filete”

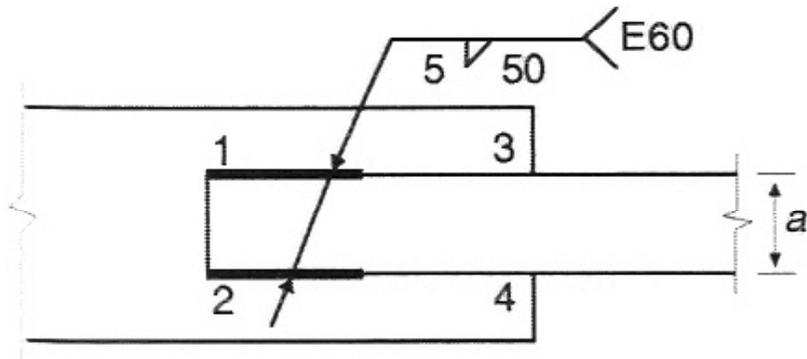


sentido sugerido de execução  
da solda para evitar defeitos

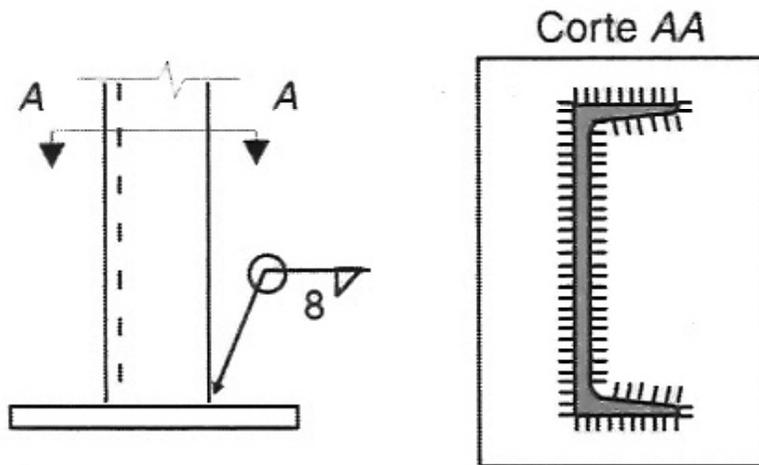


# Ligações soldadas

## Simbologia - exemplos



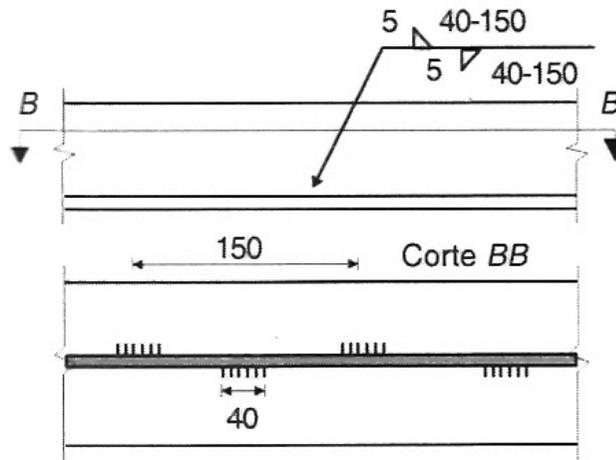
(a) Solda de filete, de oficina, ao longo das faces 1-3 e 2-4; as soldas têm 50 mm de comprimento (deve ser maior que a largura  $a$ ); o eletrodo a ser usado é E60.



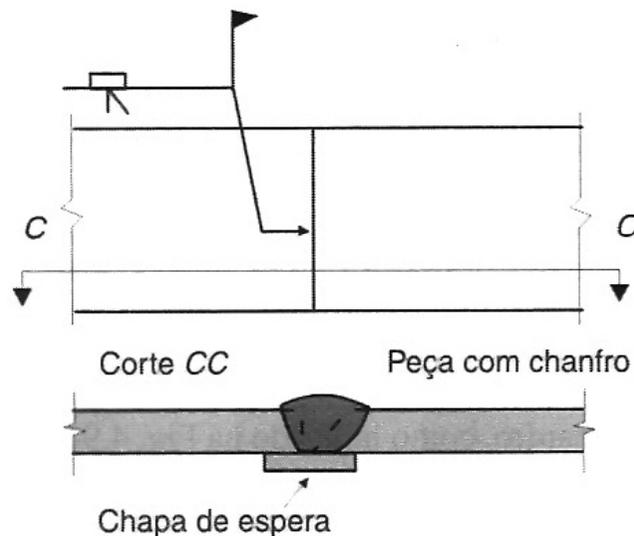
(b) Solda de filete, de oficina, dimensão 8 mm em toda a volta.

# Ligações soldadas

## Simbologia - exemplos



(c) Solda de filete, de oficina, dimensão 5 mm intermitente e alternada, com 40 mm de comprimento (dimensão mínima) e passo igual a 150 mm. As chapas ligadas por soldas intermitentes podem estar sujeitas a flambagem local e corrosão.

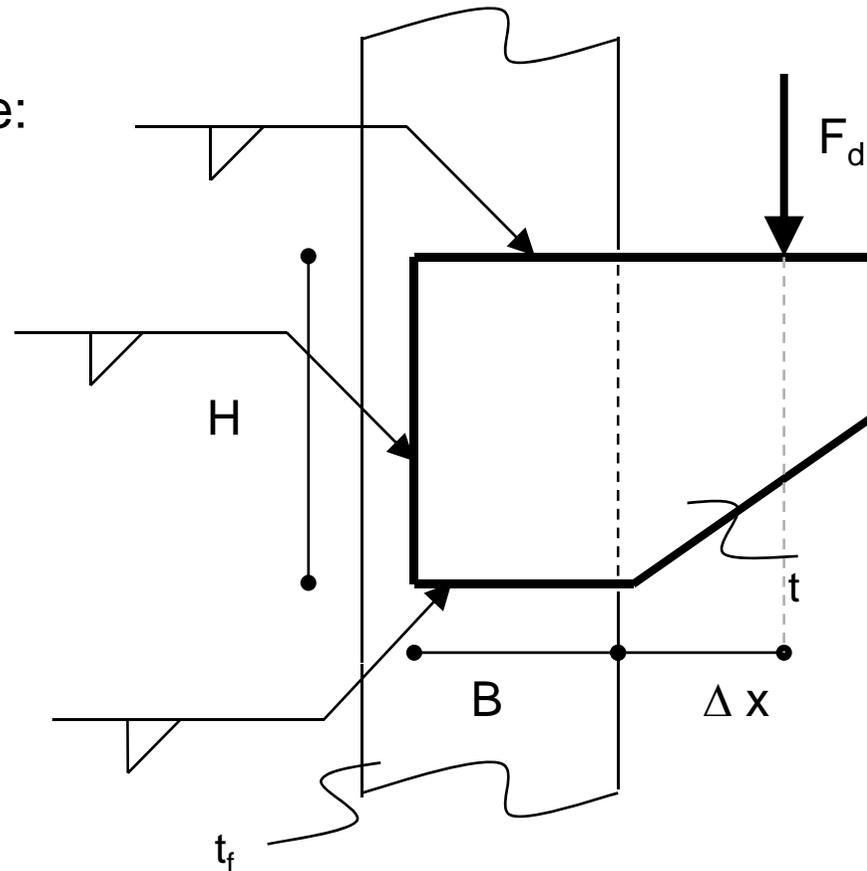


(d) Solda de entalhe em bisel de um só lado, de campo, com chapa de espera; a seta aponta na direção da peça com chanfro; chapas de espera são indicadas em soldas de um só lado de penetração total, com o intuito de evitar a fuga de material de solda e a conseqüente penetração inadequada. Chapas de espera não retiradas após a execução da solda produzem concentração de tensões e podem ocasionar fadiga.

# LIGAÇÕES SOLDADAS – EXERCÍCIOS

## CISALHAMENTO EXCÊNTRICO

Determinar a perna do filete:



# LIGAÇÕES SOLDADAS – EXERCÍCIOS

## CISALHAMENTO EXCÊNTRICO

### Solução

⇒ Considerar perna = 1mm

⇒ Tensão na perna da solda devida ao cortante:

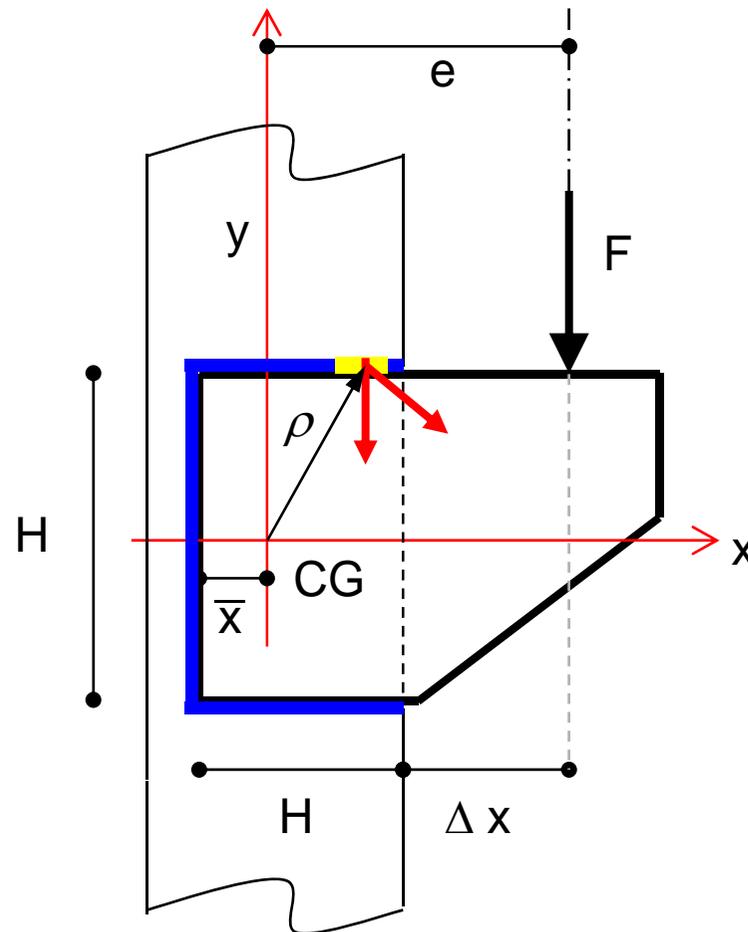
$$\tau_{y1} = \frac{V_d}{\sum A}$$

⇒ Tensão na perna da solda devida ao torque:

• Cálculo do CG e  $\mathbf{J} = \mathbf{I}_x + \mathbf{I}_y$

$$\tau_{x_2, y_2}^{máx} = \frac{T_d}{J} \rho_{y, x}^{máx}$$

$$\tau_d = \sqrt{\tau_{x_2}^2 + (\tau_{y1} + \tau_{y2})^2}$$



# LIGAÇÕES SOLDADAS – EXERCÍCIOS

## CISALHAMENTO EXCÊNTRICO

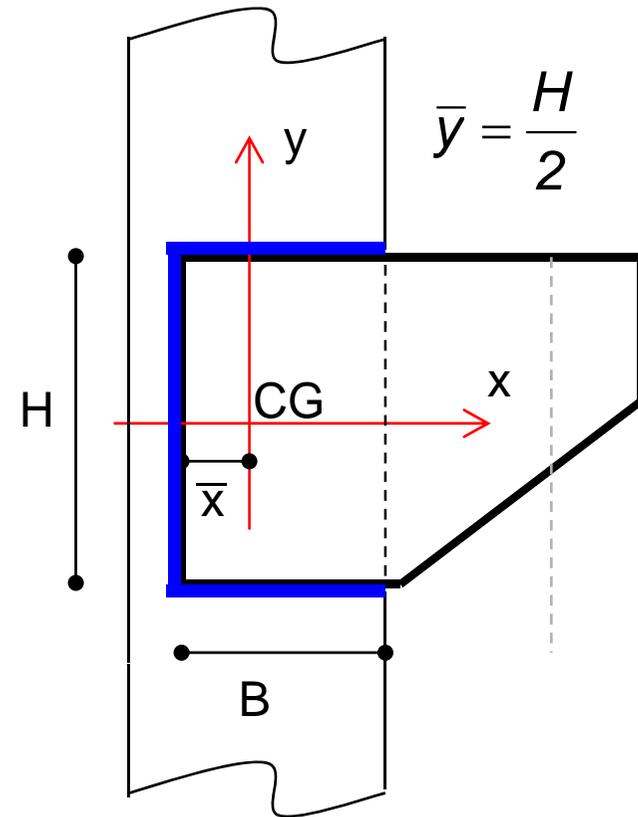
Cálculo de  $I_x$  e  $I_y$

$$I_x = 2 \left( \frac{Bb^3}{12} + Bb\bar{y}^2 \right) + \frac{bH^3}{12}$$

$$= 2 \left( \frac{B^3}{12} + B\bar{y}^2 \right) + \frac{H^3}{12} \cong 2B\bar{y}^2 + \frac{H^3}{12}$$

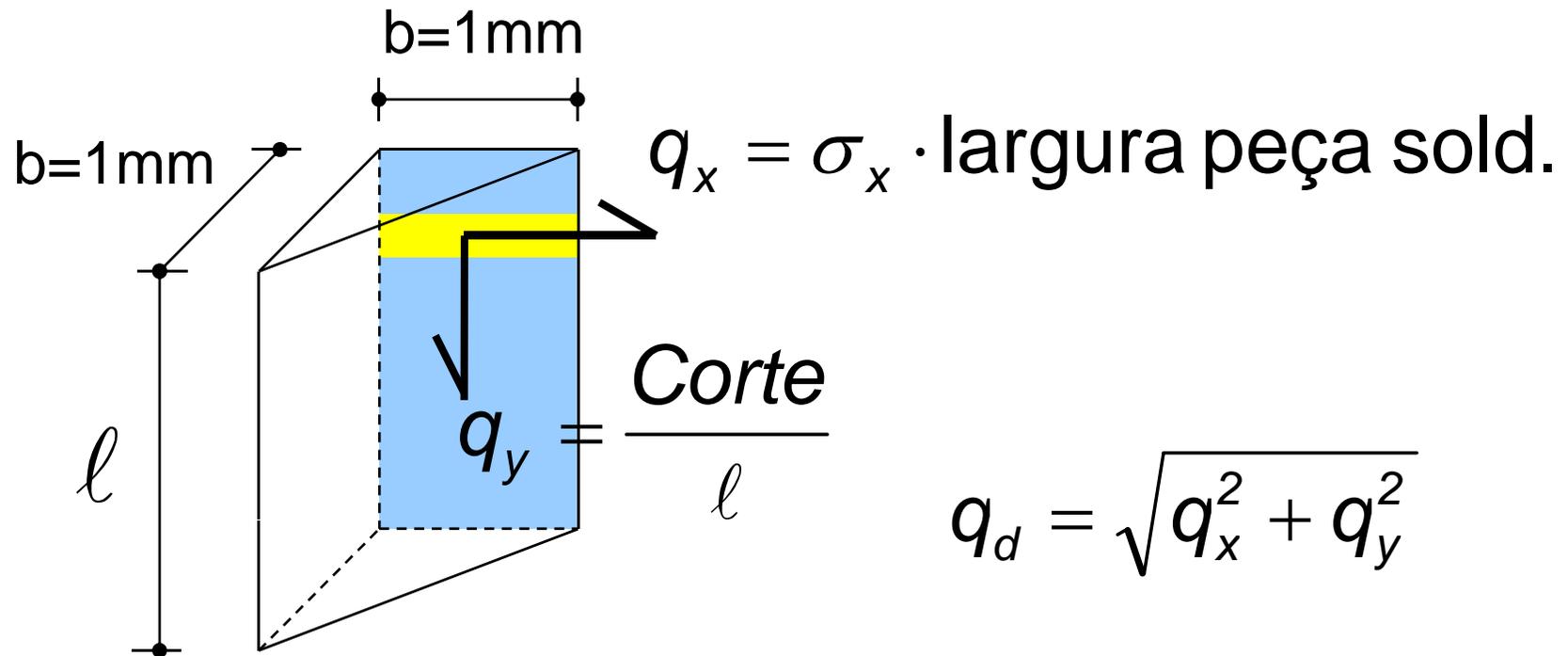
$$I_y = \left( \frac{Hb^3}{12} + Hb\bar{x}^2 \right) + 2 \left( \frac{bB^3}{12} + Bb \left( \frac{B}{2} - \bar{x} \right)^2 \right)$$

$$\cong \left( H\bar{x}^2 \right) + 2 \left( \frac{B^3}{3} - B^2\bar{x} + B\bar{x}^2 \right)$$



# LIGAÇÕES SOLDADAS – EXERCÍCIOS

## TRAÇÃO E CORTE NO FILETE

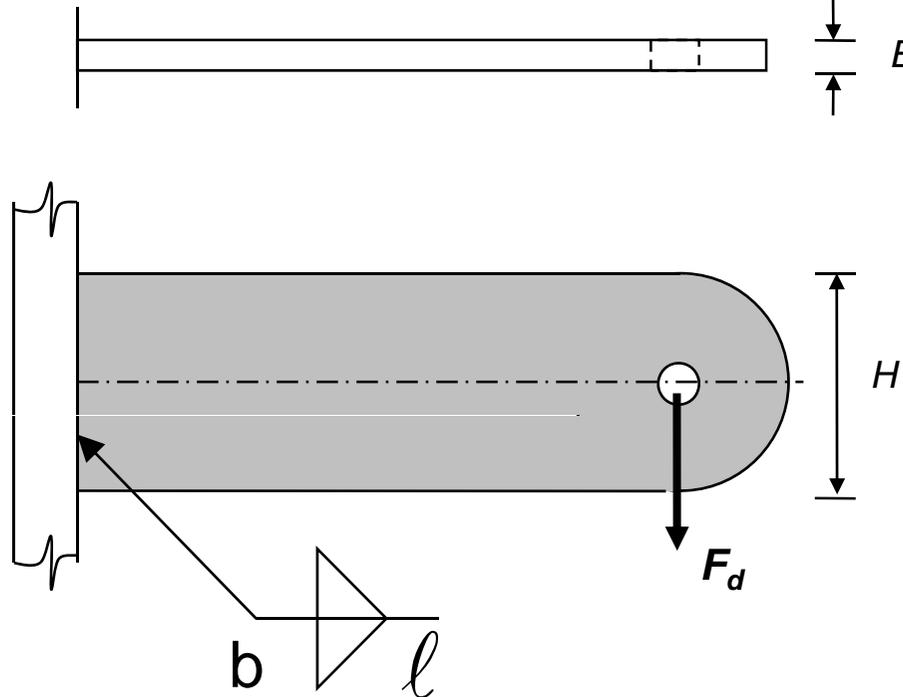


$$\frac{R_d}{l} \geq \frac{F_d}{l} = q_d$$

# LIGAÇÕES SOLDADAS – EXERCÍCIOS

## TRAÇÃO E CORTE NO FILETE

2 filetes:



$$q_x = \frac{1}{2} (\sigma_x B) = \frac{1}{2} \frac{M_d y}{I_z} B$$

$$q_y = \frac{V_d}{2l}$$

$$q_d = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$$

$$\frac{R_d}{l} \geq q_d$$