

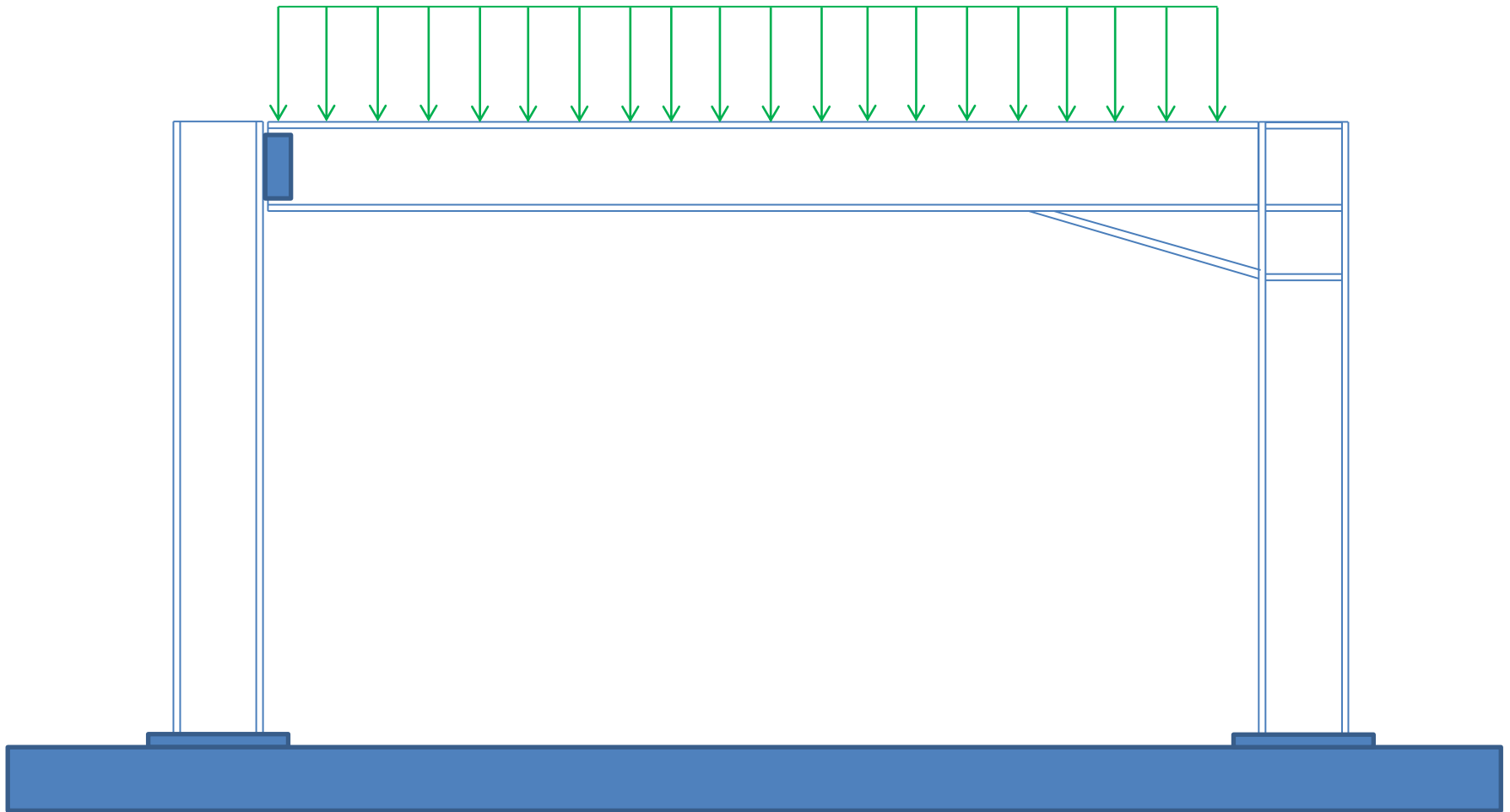
# Ligações Soldadas



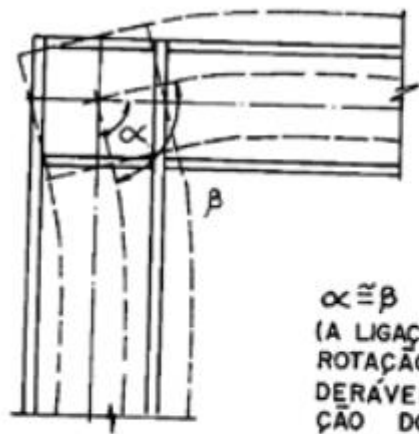
# Ligações Metálicas



# Rigidez das ligações

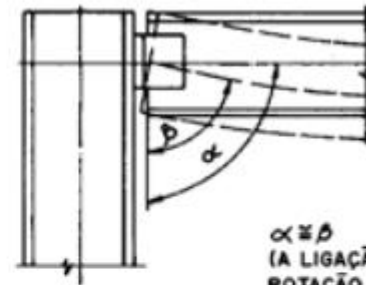


# Rigidez das ligações



$\alpha \cong \beta$   
(A LIGAÇÃO NÃO APRESENTA  
ROTAÇÃO RELATIVA CONSI-  
DERÁVEL APÓS A APLICA-  
ÇÃO DO CARREGAMENTO  
NA ESTRUTURA).

(a) LIGAÇÃO RÍGIDA



$\alpha \neq \beta$   
(A LIGAÇÃO APRESENTA  
ROTAÇÃO RELATIVA A-  
PRECIÁVEL APÓS APLICA-  
ÇÃO DO CARREGAMENTO  
NA ESTRUTURA).

(b) LIGAÇÃO FLEXÍVEL

Fig. 13- Ligações Rígida e Flexível



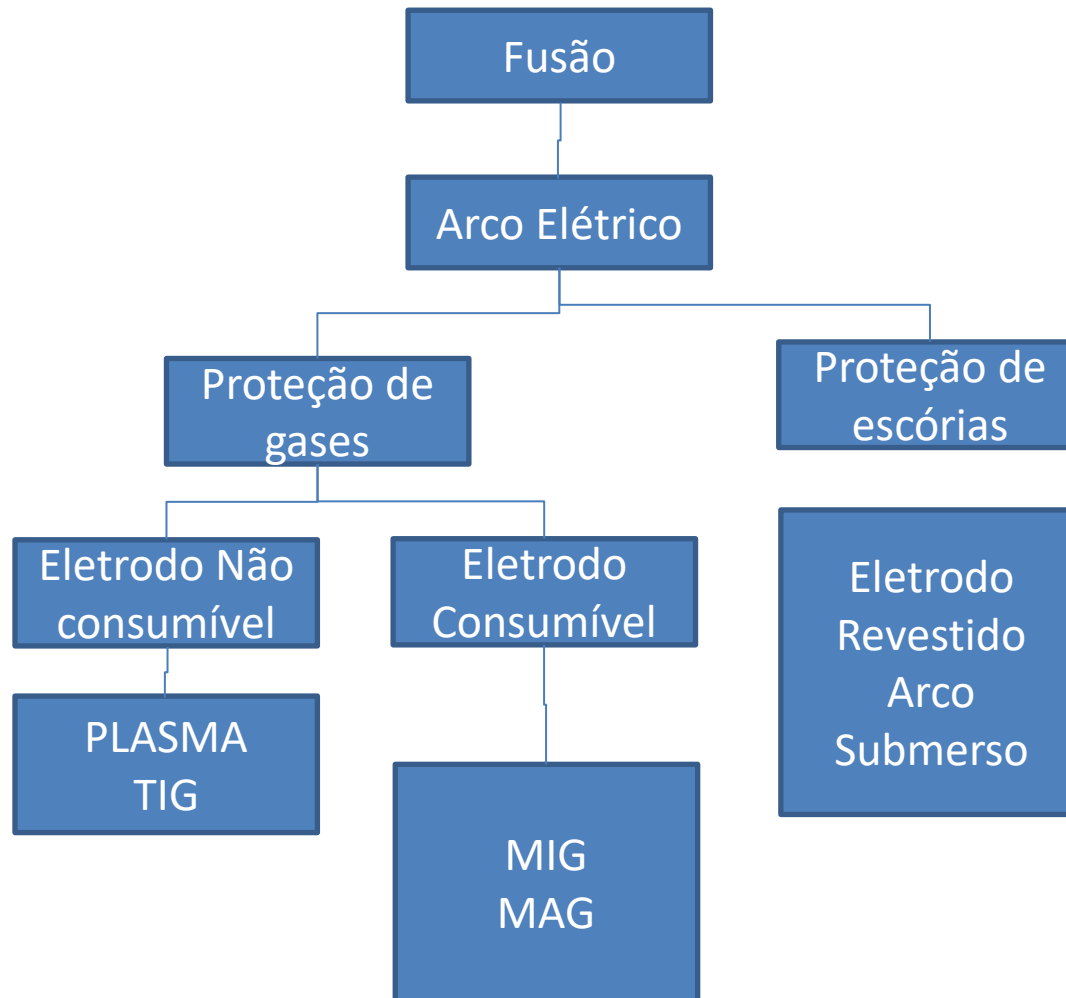
# Ligações Soldadas



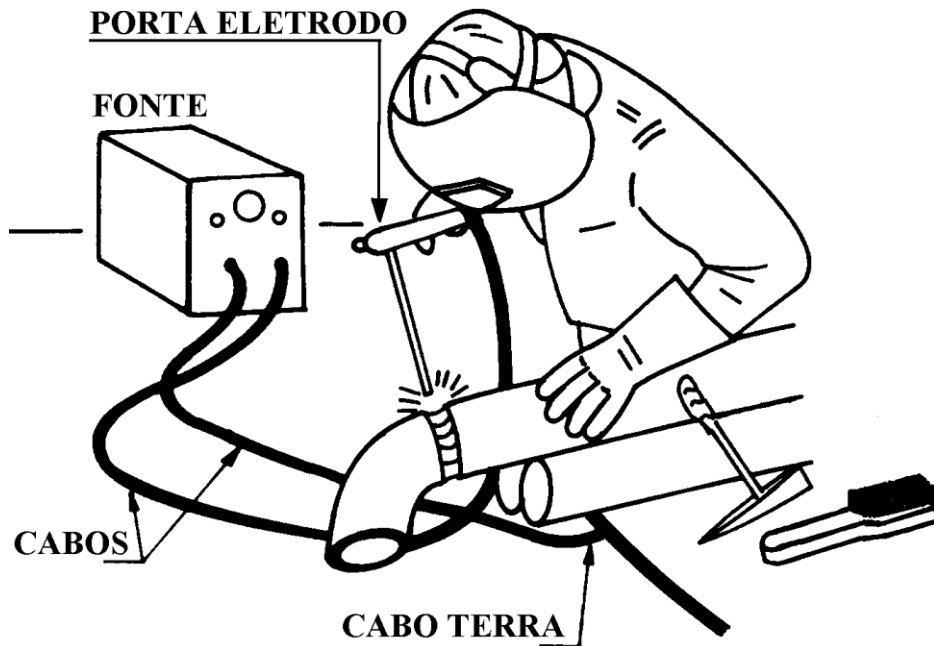
# Ligações Soldadas

Soldagem é a união entre duas partes metálicas usando uma **fonte de calor**, com ou sem aplicação de pressão.

# Ligações Soldadas



# Soldagem por Eletrodo Revestido



**SMAW:** Shielded Metal Arc Welding





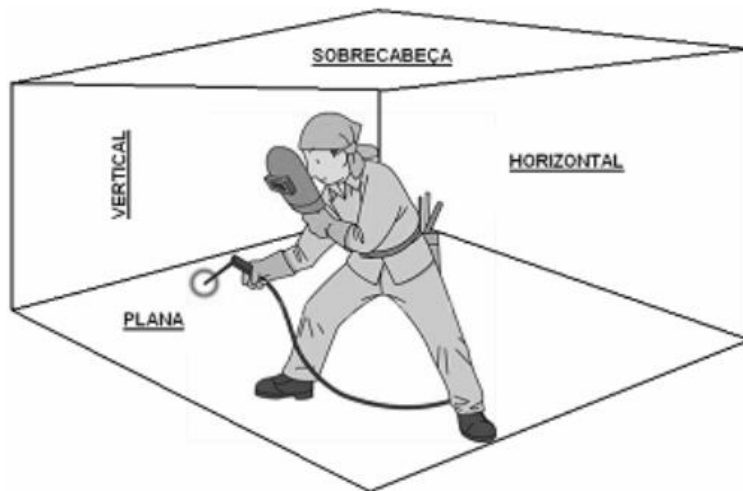
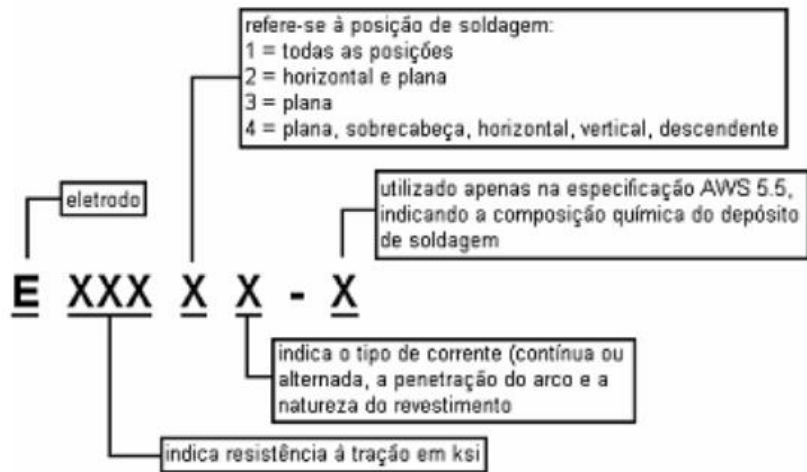


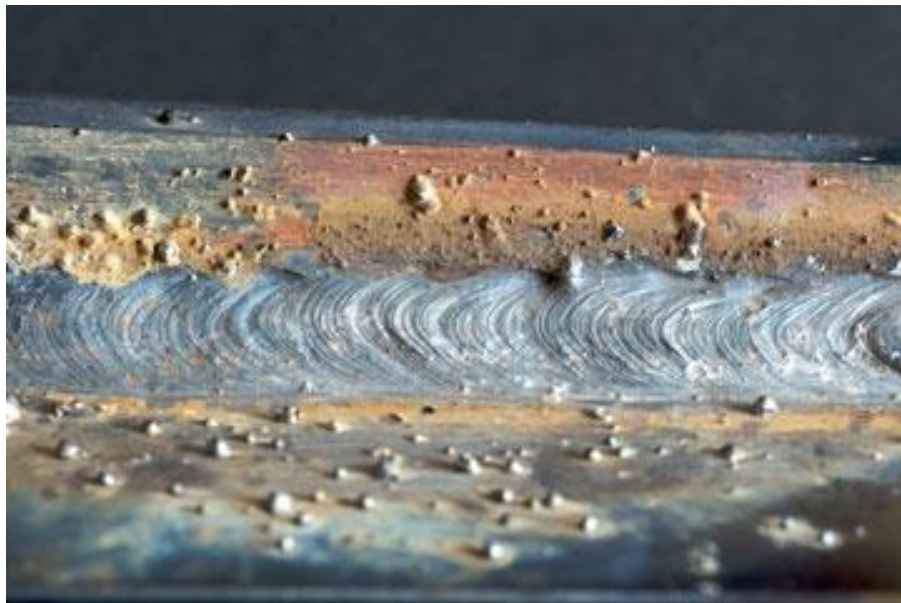
Figura 7 – Posições de soldagem e designação de eletrodos.

## E 60 13

- Eletrodo Revestido
- Resistência À ruptura por tração de 60ksi (41,5 kN/cm<sup>2</sup>)
- Permite soldagem em todas as posições
- Revestimento rutílico com silicato de potássio. Recomendado para chapas finas

## E 70 18

- Eletrodo Revestido
- Resistência À ruptura por tração de 70ksi (48,5 kN/cm<sup>2</sup>)
- Permite soldagem em todas as posições
- Requer maior habilidade, uso onde propriedades mecânicas e qualidade da soldagem sejam essenciais, alta penetração de pó de ferro. Recomendado em estruturas metálicas em geral



# Soldagem por eletrodo protegido por gases

**GMAW:** GAS Metal Arc Welding



# Soldagem por eletrodo protegido por gases

## **MIG: METAL INERT GAS**

Utiliza-se gases inertes para proteção da soldagem

## **MAG: METAL ACTIVE GAS**

Utiliza-se gases ativos para proteção da soldagem

## **TIG: Tungsten Inert Gas**

Utiliza-se um eletrodo de Tungstênio (não consumível) e um gás inerte na proteção da soldagem, além de um metal de adição

# VANTAGENS DO GMAW

**Não há formação de escórias**

**Penetração mais uniforme**

**Menor distorção e tensões residuais**

**Mais fácil (treinamento rápido)**

**Maior Produtividade**



# DESVANTAGENS DO GMAW

**Necessita proteção contra o vento**

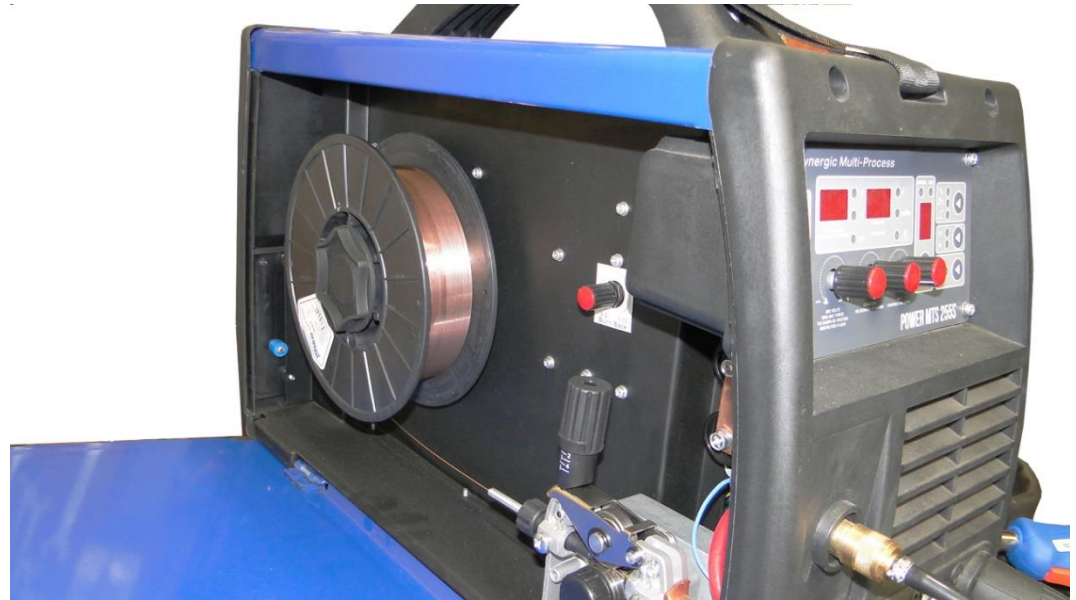
**Não acessa lugares mais estreitos (devido ao bocal do gás)**

**Equipamento grande**

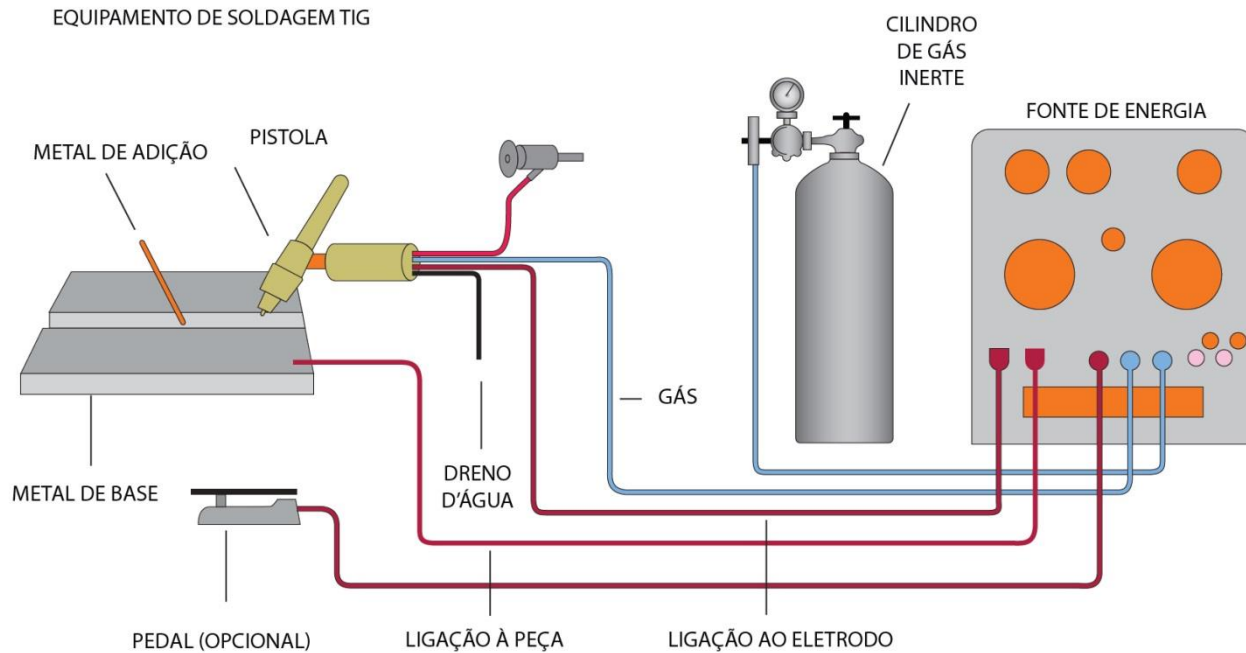
**Custo do gás**



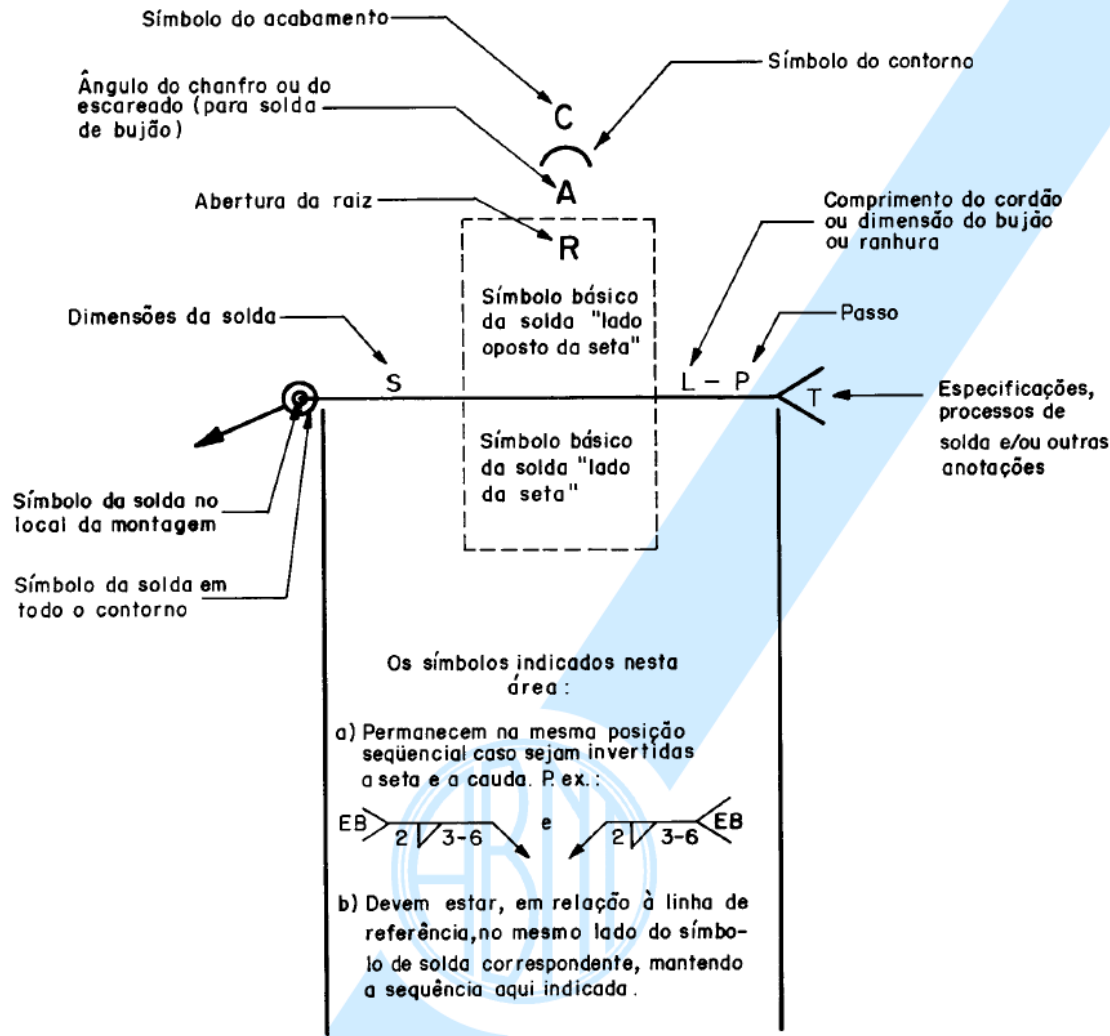
# Equipamento MIG/MAG



# Equipamento TIG

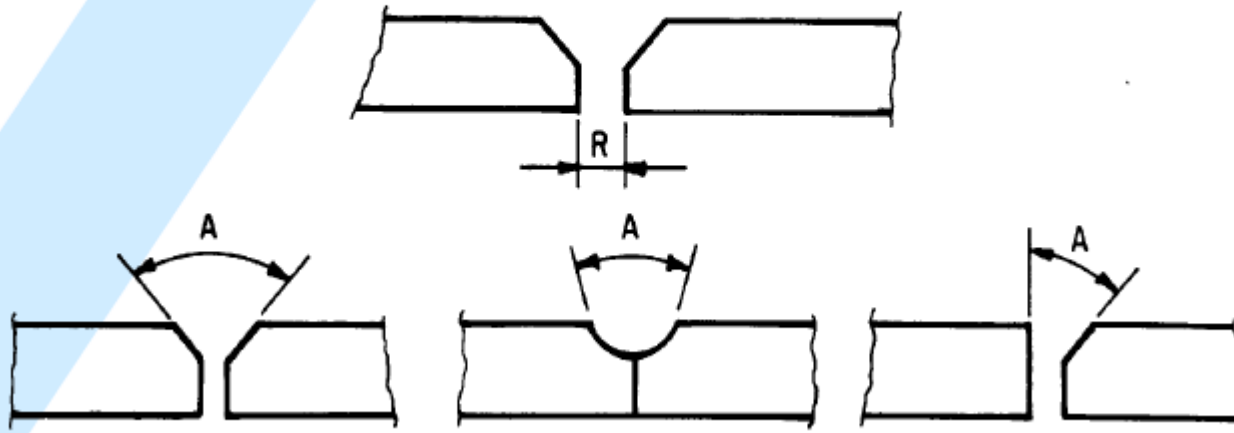


# Símbolos de Soldagem



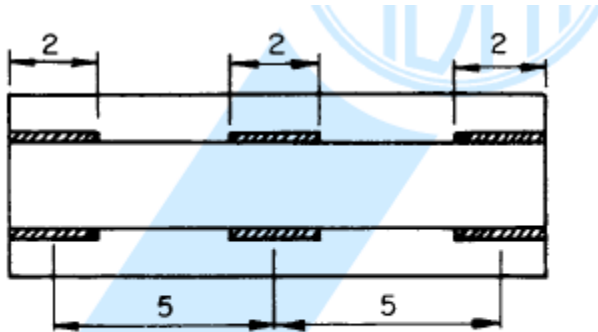
# Símbolos de Soldagem

- a) passo - espaçamento centro a centro das soldas, quando descontínuas;
- b) abertura da raiz (R) - distância entre as peças a unir na raiz da junta;
- c) ângulo de chanfro - ângulo formado entre os dois planos das extremidades das peças que formam o sulco para solda.

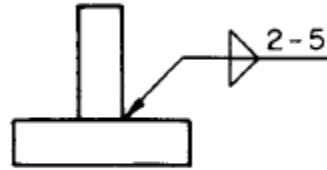


## NBR 7165

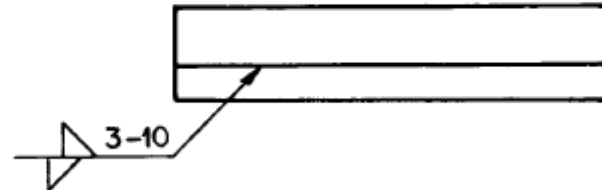
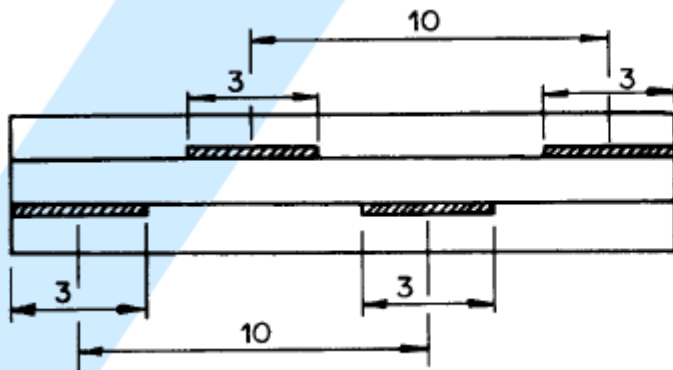
# Símbolos de Soldagem



Significado



Representação



# Símbolos de Soldagem

Símbolos Básicos de Solda									
Rebordo	Filete	Tampão	Ranhura ou Chanfro					Filetes convexos	
			Reto	V	Meio V	U	J	Duplo	Simples
									
Símbolos Suplementares									
Solda com chapa de base	Afastamento	Toda volta	Solda de campo	Contorno					
				Esmerilhar	Convexa				
									



# Símbolos de Soldagem

Significado	Representação 1	Representação 2


		-
		-
		-
		-

# Símbolos de Soldagem

		-
		-
		-

		-
		-
		-

# ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Método de inspeção	Características	Limitações
Visual	O mais comum e mais económico. Particularmente bom para soldas com um único passe.	Detecta somente trincas superficiais grosseiras, excessos e falta de solda e imperfeições.
Líquido penetrante	Utilizado quando a geometria da peça é complexa, dificultando a operação do equipamento de partículas magnéticas. Uso instantâneo em qualquer lugar. Detecta defeitos superficiais como trincas (micro-trincas da ordem de 0,001 mm de largura), fissuras, porosidade, mordeduras.	Detecta somente descontinuidades superficiais. Ondulações de soldas reentrantes e ranhuras podem dar falsas indicações. Exame de custo mais elevado do que o de partículas magnéticas.
Partícula magnética	Detecta defeitos na superfície e sub-superfície como trincas, fissuras, porosidade, mordeduras e sobreposição, descontinuidades lineares da ordem de 0,5mm, além de descontinuidades mascaradas por esmerilhamento, óxidos etc., e as escondidas sob pinturas. É um exame mais rápido e económico do que o anterior. Indicações podem ser coletadas e preservadas em fitas plásticas.	Requer relativa lisura da superfície. Falta de cuidado no uso de pontas magnetizadas podem desprezar defeitos de golpeamento de arco. Necessita que o campo magnético seja gerado perpendicularmente à descontinuidade. Necessita em certos casos de desmagnetização da peça. Limpeza posterior. Depende da força do campo magnético.
Radiográfico	Detecta defeitos internos como porosidade, escória, vazios, fissuras, irregularidades, falta de fusão. Indicado para espessuras entre 4 mm e 70 mm. Um filme negativo é registro permanente. Distinção mais fácil do tipo de descontinuidade detectada. Executado em qualquer tipo de superfície.	Defeitos devem ocupar mais que aproximadamente 1,5% da espessura para ser registrado. Somente fissuras paralelas ao colidimento são registradas. Necessidade de acesso pelos dois lados da superfície inspecionada. Radiação perigosa, havendo a necessidade de evacuação de todo pessoal próximo à área em que está sendo realizada a radiografia. Tempo de exposição aumenta com a espessura. Custo mais elevado do que o ultra-sônico. Resultado duvidoso para soldas de filete.
Ultra-sônico	Detecta fissuras em qualquer orientação, escória, falta de fusão, inclusões, rupturas lamelares, vazios. Pode examinar minuciosamente quase qualquer espessura comercial. Alta sensibilidade na detecção de pequenos defeitos. Precisão na localização da descontinuidade e estimativa do tamanho. Inspeção rápida. Necessidade de acesso por somente uma superfície do elemento ensaiado.	Superfícies devem ser lisas. Equipamento deve ser frequentemente calibrado. Operador deve ser qualificado. Grânulos excessivamente grosseiros fornecem falsas indicações. Defeitos classificados por tamanho podem não ser muito exatos. O sistema pode ser sensível a pequenos defeitos que não são nocivos à estrutura. Falta de registro permanente. Difícil aplicação em peças de geometria complexa.

**Tabela 8 – Compatibilidade do metal-base com o metal da solda a, b**

	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>	ABNT NBR 6648 (CG-26 - $t \leq 20$ mm) ABNT NBR 6649 (CF-26) ABNT NBR 6650 (CF-26) ABNT NBR 7007 (MR 250 - $t \leq 19$ mm)	ASTM A36 ( $t \leq 19$ mm) ASTM A500 Grau A ASTM A500 Grau B	AWS A5.1 - E60XX, E70XX  AWS A5.5 <sup>e</sup> E70XX-X	AWS A5.17 - F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX  AWS A5.23 <sup>e</sup> F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS)  AWS A5.28 <sup>e</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>e</sup> - E6XTX-X, E6XT-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM
<b>Grupo II</b>	ABNT NBR 5000 (G-30) ABNT NBR 5000 (G-35) ABNT NBR 5004 (F-32/Q-32) ABNT NBR 5004 (F-35/Q-35) ABNT NBR 5004 (Q-40) ABNT NBR 5008 (CGR 400) <sup>d</sup> ABNT NBR 5008 (CGR 500) <sup>d</sup> ABNT NBR 5008 (CGR 500A) <sup>d</sup> ABNT NBR 5920 (CFR 500) <sup>d</sup> ABNT NBR 5921 (CFR 400) <sup>d</sup> ABNT NBR 5921 (CFR 500) <sup>d</sup> ABNT NBR 6648 (CG-26 - $t > 19$ mm)  ABNT NBR 6648 (CG-28) ABNT NBR 6649 (CF-28) ABNT NBR 6650 (CF-28) ABNT NBR 6650 (CF-30) ABNT NBR 7007 (MR 250 - $t > 19$ mm)  ABNT NBR 7007 (AR-350) ABNT NBR 7007 (AR-350 COR) ABNT NBR 8261 (Graus B e C)	ASTM A36 ( $t > 19$ mm) ASTM A242 <sup>d</sup> ASTM A572 Grau 42 ASTM A572 Grau 50 ASTM A572 Grau 55 ASTM A992 ASTM A588 <sup>d</sup>	AWS A5.1 - E7015, E7016, E7018, E7028  AWS A5.5 <sup>e</sup> E7015-X, E7016-X, E7018-X	AWS A5.17 - F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX  AWS A5.23 <sup>e</sup> F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS)  AWS A5.28 <sup>e</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>e</sup> - E7XTX-X, E7XTX-XM
<b>Grupo III</b>	ABNT NBR 5000 (G-42) ABNT NBR 5000 (G-45) ABNT NBR 5004 (Q-42) ABNT NBR 5004 (Q-45) ABNT NBR 7007 (AR-415)	ASTM A572 Grau 60 ASTM A572 Grau 65 ASTM A913 <sup>c</sup>	AWS A5.5 <sup>e</sup> - E8015-X, E8016-X, E8018-X	AWS A5.23 <sup>e</sup> - F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX	AWS A5.28 <sup>e</sup> - ER80S-XXX, E80C-XXX	AWS A5.29 <sup>e</sup> - E8XTX-X, E8XTX-XM
<b>a</b>	Em juntas constituídas de metais-base de grupos diferentes, podem ser usados metais da solda compatíveis com o metal-base de maior resistência ou de menor resistência, devendo-se usar eletrodos de baixo hidrogênio para a segunda opção. O preaquecimento deve ser baseado no grupo de maior resistência.					
<b>b</b>	Quando for feito alívio de tensões nas soldas, o metal da solda não pode conter mais de 0,05% de vanádio.					
<b>c</b>	As limitações da AWS D1.1 relativas à entrada de calor não se aplicam ao ASTM A913, graus 60 e 65.					
<b>d</b>	Podem ser necessários processos e materiais de soldagem especiais (por exemplo: eletrodos de baixa liga E80XX-X) para atender às características de resistência à corrosão atmosférica e de resistência ao choque do metal-base - ver AWS D1.1.					
<b>e</b>	Metais de solda dos grupos B3, B3L, B4, B4L, B5, B5L, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, B9, ou qualquer grau BXH, na AWS A5.5, A5.23, A5.28 e A5.29, não são pré-qualificados.					



**Tabela 9 – Força resistente de cálculo de soldas**

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}^a, b, d$	Nível de resistência requerida do metal de solda (relação de compatibilidade)
Penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado	Compatibilidade parcial
	Tração normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^{e, g}$	Compatibilidade total
	Compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^{e, g}$	É permitido o uso de metal de solda com resistência nominal inferior ao metal base em até 10 ksi (70MPa)
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,6A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^g$	Compatibilidade total <sup>j</sup>
Penetração parcial	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda <sup>c</sup>	Não precisa ser considerado	Compatibilidade parcial
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^g$ b) Metal da solda: $0,6A_wf_w/\gamma_{w1}^h$	Compatibilidade parcial
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,6A_wf_w/\gamma_{w2}^i$	Compatibilidade parcial
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda <sup>c</sup>	Não precisa ser considerado	Compatibilidade parcial
	Cisalhamento na seção efetiva (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)	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,6A_wf_w/\gamma_{w2}^{f, i}$	Compatibilidade parcial
Tampão em furos ou rasgos	Cisalhamento paralelo às superfícies em contato, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,6A_wf_w/\gamma_{w2}^i$	Compatibilidade parcial

<sup>a</sup> Para definição de áreas efetivas de soldas, ver 6.2.2.

<sup>b</sup> O metal da solda a ser usado para cada metal-base é obtido na Tabela 8, respeitando-se a relação de compatibilidade desta tabela.

<sup>c</sup> Soldas de filete e soldas de penetração parcial, ligando os elementos componentes de perfis soldados (mesas e almas), podem ser calculadas sem considerar as tensões de tração ou de compressão nesses elementos, paralelas ao eixo da solda; devem ser consideradas, entretanto, as tensões de cisalhamento causadas pelas forças cortantes e os efeitos locais.

<sup>d</sup> Em soldas sujeitas a tensões não uniformes, as forças solicitante e resistente de cálculo são determinadas com base em comprimentos efetivos unitários.

<sup>e</sup> Nesse caso, quando houver duas classes de resistência de metal da solda na Tabela 8, só pode ser usada a classe de maior resistência.

<sup>f</sup> Ver 6.2.5.2.

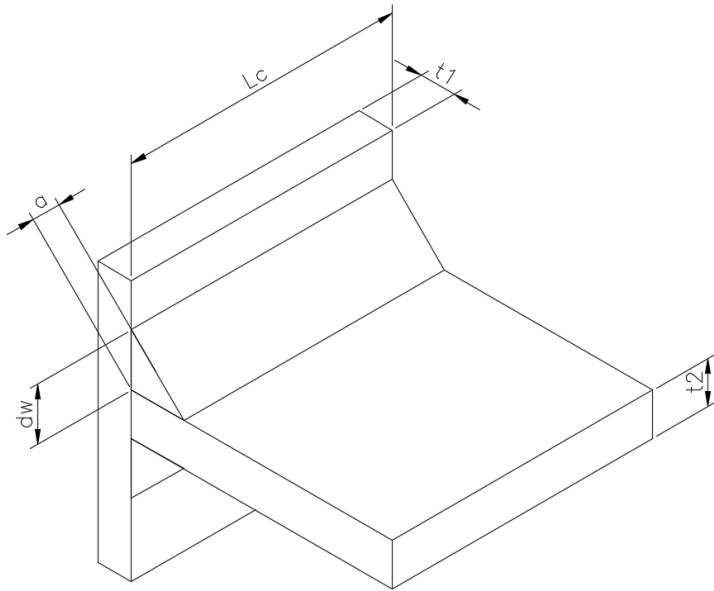
<sup>g</sup> O valor de  $\gamma_{a1}$  é dado em 4.9.2.

<sup>h</sup> O valor de  $\gamma_{w1}$  é igual a 1,25 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,05 para combinações excepcionais.

<sup>i</sup> O valor de  $\gamma_{w2}$  é igual a 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,15 para combinações excepcionais.

<sup>j</sup> A compatibilidade parcial é permitida em soldas de chanfro entre alma e mesas de perfis soldados transmitindo forças de cisalhamento.

# Resistência de soldas de Filete



$a$  = Garganta efetiva do filete de solda

$L_c$  = comprimento do filete de solda

$A_w$  = área efetiva do filete de solda

$A_{MB}$  = área do metal Base

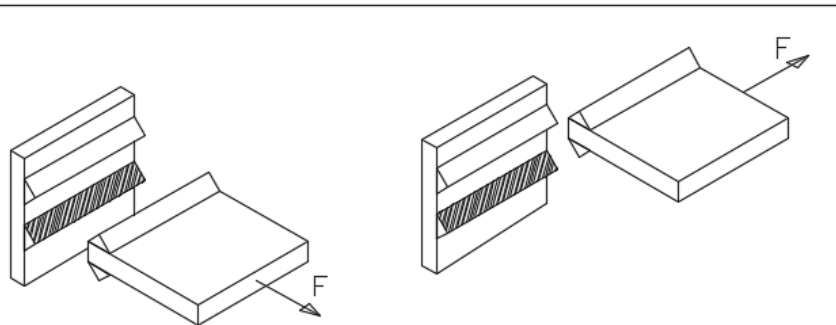
$$a = 0,707 \cdot d_w$$

$$A_w = a \cdot \sum L_c$$

$$A_{MB} = d_w \cdot \sum L_c$$



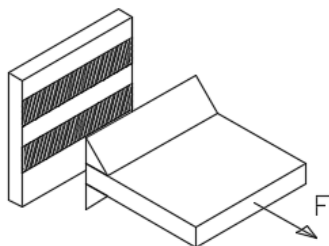
# Resistência de soldas de Filete



Cisalhamento na seção efetiva da solda

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot A_w \cdot F_w}{1,35}$$

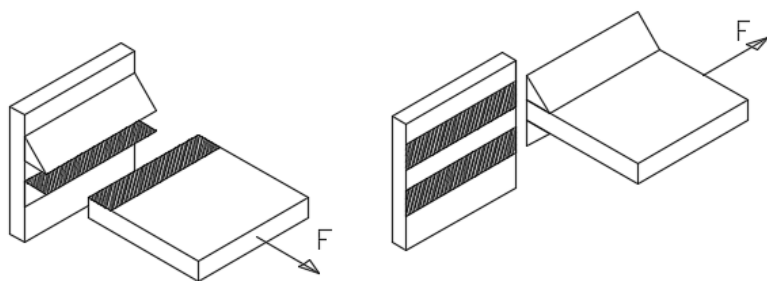
$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot 0,707 d_w \cdot 2 \cdot L_c \cdot F_w}{1,35}$$



Tração no Metal-Base

$$F_{wRd} = \frac{A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{d_w \cdot 2 L_c \cdot F_y}{1,10}$$



Cisalhamento no metal base

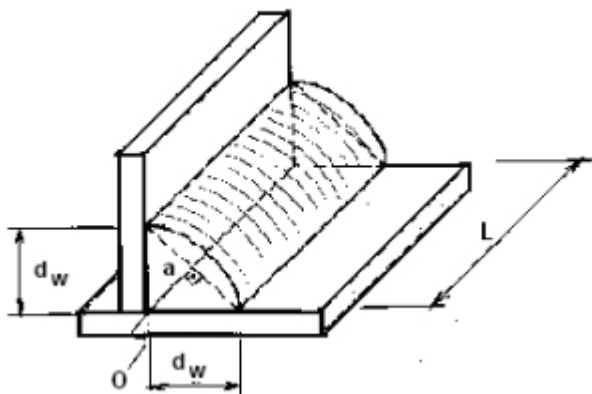
$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot L_c \cdot F_y}{1,10}$$

# Dimensões mínimas

**Tabela 10 — Tamanho mínimo da perna de uma solda de filete**

Menor espessura do metal-base na junta mm	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, $d_w$ <sup>a</sup> mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19	8
<sup>a</sup> Executadas somente com um passe.	



**6.2.6.2.2** O tamanho máximo da perna de uma solda de filete que pode ser usado ao longo de bordas de partes soldadas é o seguinte:

- ao longo de bordas de material com espessura inferior a 6,35 mm, não mais do que a espessura do material;
- ao longo de bordas de material com espessura igual ou superior a 6,35 mm, não mais do que a espessura do material subtraída de 1,5 mm, a não ser que nos desenhos essa solda seja indicada como reforçada durante a execução, de modo a obter a espessura total desejada da garganta.

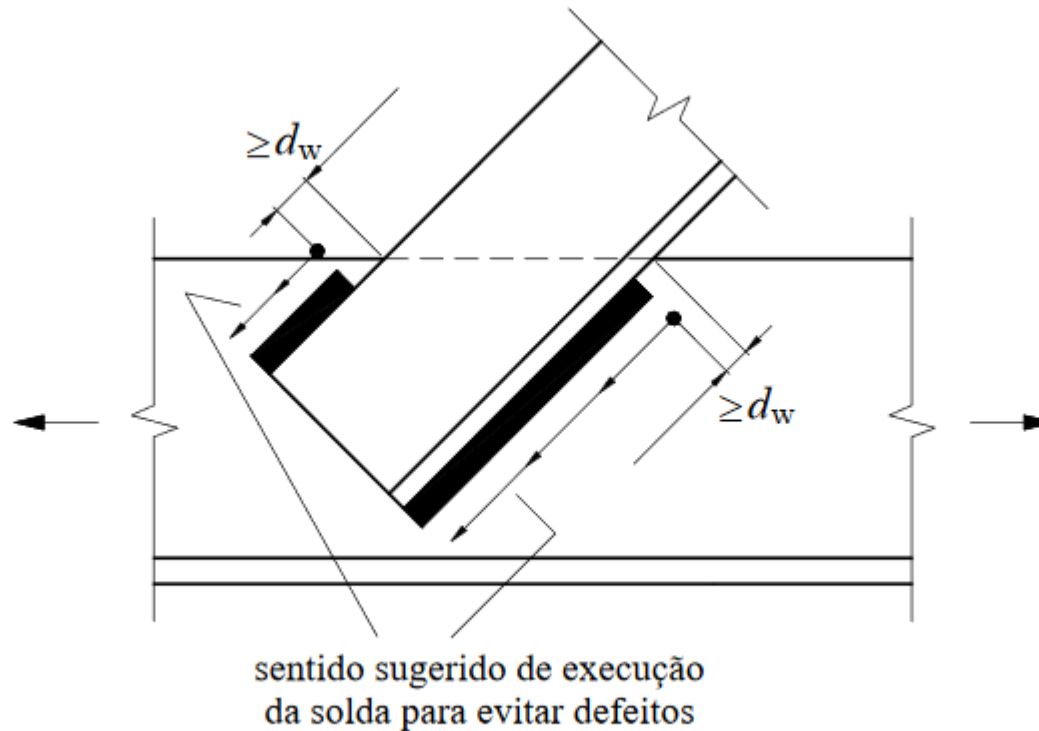
**6.2.6.2.4** Podem ser usadas soldas intermitentes de filete, dimensionadas para transmitir solicitações de cálculo, quando a resistência de cálculo exigida for inferior à de uma solda contínua do menor tamanho de perna permitido, e também para ligar elementos de barras compostas. O comprimento efetivo de qualquer segmento de solda intermitente de filete não pode ser menor que 4 vezes o tamanho da perna, nem menor que 40 mm. O uso de soldas intermitentes requer cuidados especiais com flambagens locais e com corrosão.

**Tabela 9 — Espessura mínima da garganta efetiva de uma solda de penetração parcial**

Menor espessura do metal-base na junta mm	Espessura mínima da garganta efetiva <sup>a</sup> mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19 até 37,5	8
Acima de 37,5 até 57	10
Acima de 57 até 152	13
Acima de 152	16
<sup>a</sup> Ver 6.2.2 para definição de garganta efetiva.	

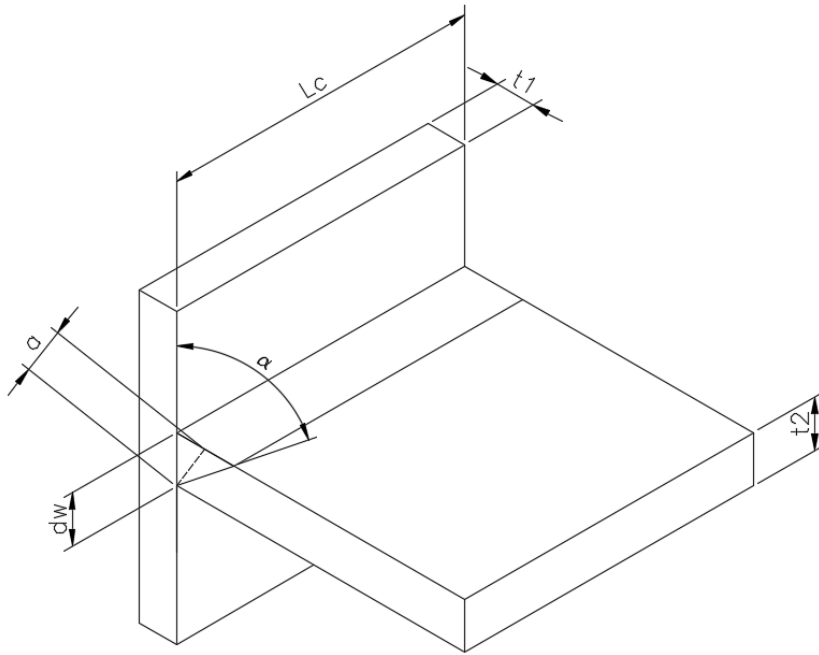
# Dimensões mínimas

- d) soldas de filete em lados opostos de um plano comum devem ser interrompidas no canto comum a ambas as soldas.



**Figura 14 — Filetes de solda próximos de bordas tracionadas**

# Resistência de soldas de Penetração Total



$a$  = Garganta efetiva do filete de solda

$L_c$  = comprimento do filete de solda

$A_w$  = área efetiva do filete de solda

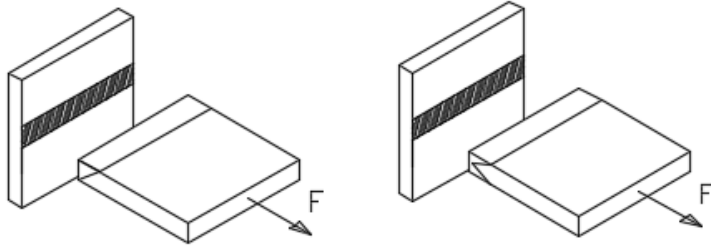
$A_{MB}$  = área do metal Base

$a$  = determinado caso a caso

$$A_w = a \cdot \sum L_c$$

$$A_{MB} = d_w \cdot \sum L_c$$

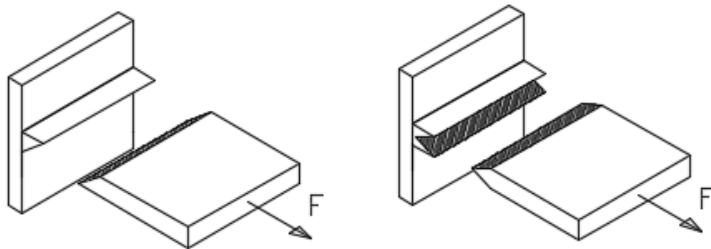
# Resistência de soldas de penetração total



Tração Normal à seção efetiva da solda

$$F_{wRd} = \frac{A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

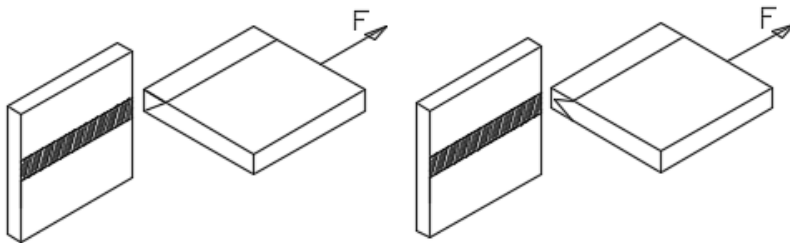
$$F_{wRd} = \frac{t_2 \cdot L_c \cdot F_y}{1,10}$$



Cisalhamento na seção efetiva

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{t_2}{\cos \alpha} L_c \cdot F_y}{1,10} \text{ (exemplo)}$$



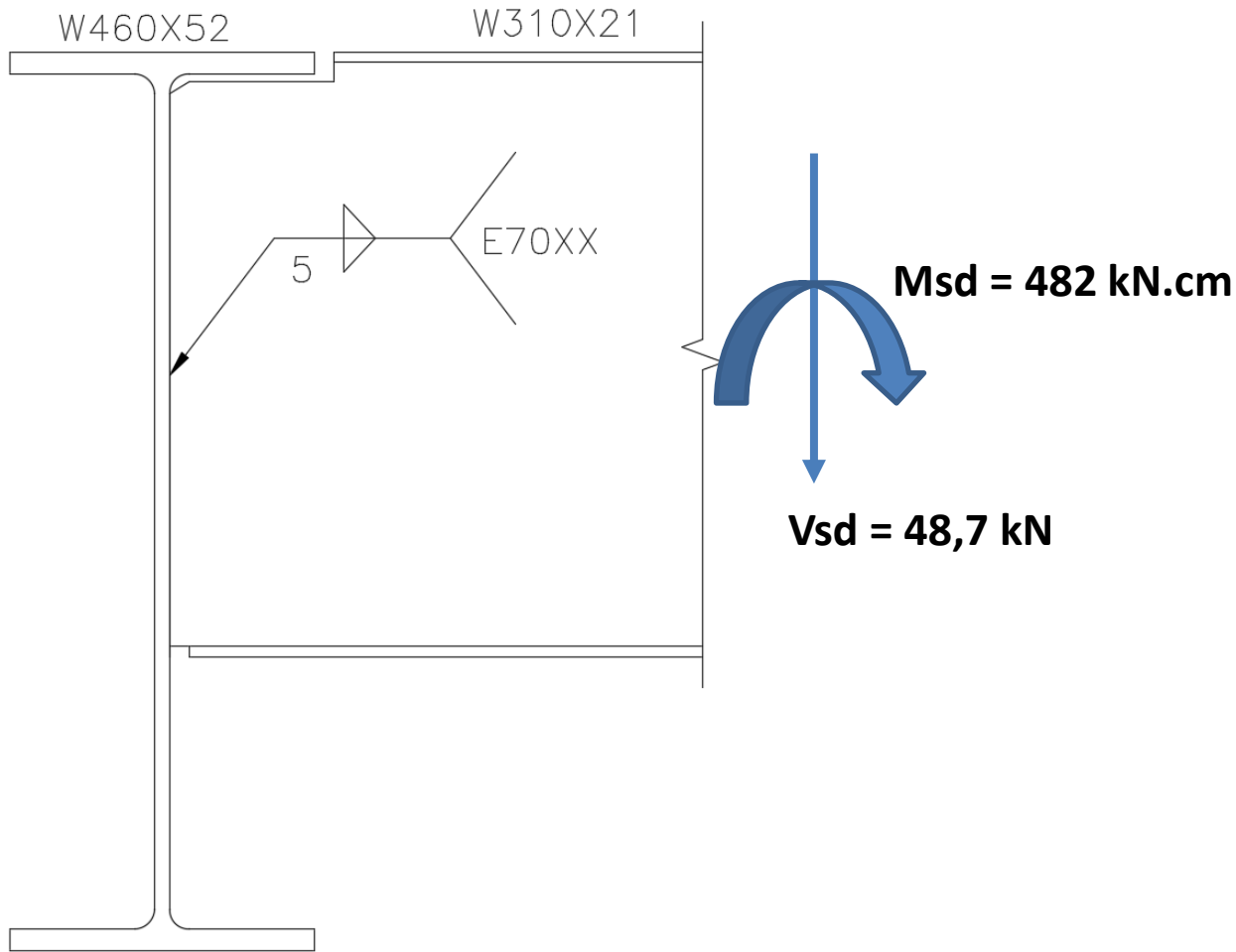
Cisalhamento na seção efetiva

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot t_2 \cdot L_c \cdot F_y}{1,10}$$

# Exercício 01

Dimensione a ligação viga-Viga abaixo

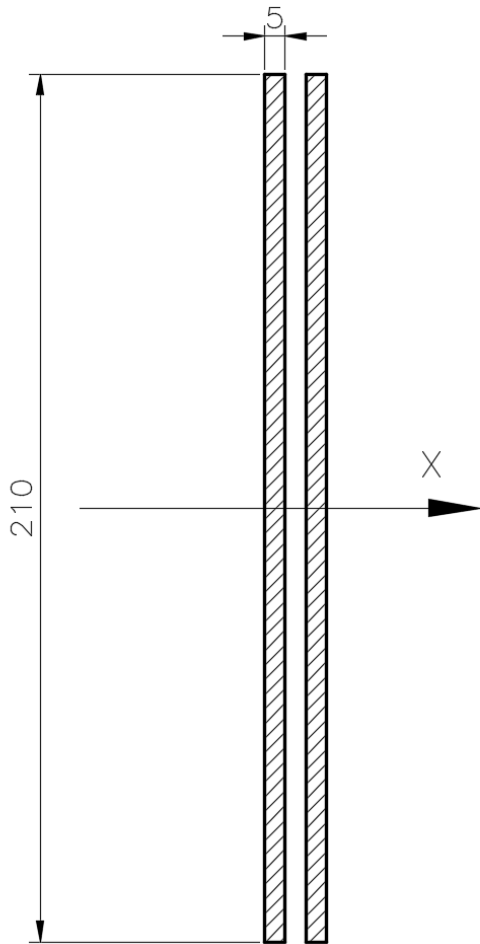




# Exercício 01

A menor das duas espessuras de metal base é a alma do perfil W310X21 (5,1mm)

Adotando de forma arbitrária a espessura da perna de solda de 5mm (E70XX) com comprimento de 70% da altura do perfil ( $0,7 \times 303 \sim 210\text{mm}$ )



**Esforço vertical por cm:**

$$V_{sd} = \frac{48,7}{2 \cdot 21} = 1,16 \text{ kN}$$

**Esforço horizontal por cm:**

$$I = 2 \cdot \left( \frac{0,5 \cdot 21^3}{12} \right) = 771,75 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_h = \frac{M \cdot y}{I} \rightarrow \frac{482 \cdot 10,5}{771,75} = 6,56 \text{ kN/cm}^2$$

$$H_{sd} = 6,56 \cdot 0,5 = 3,28 \text{ kN}$$

**Resultante:**

$$F_{sd} = \sqrt{3,28^2 + 1,16^2} = 3,48 \text{ kN}$$

# Exercício 01

## Verificação da Resistência da Solda

$$V_{w,Rd} = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 48,5}{1,35} = 7,61 \text{ kN}$$

## Verificação da Resistência do Metal Base (Tração):

$$V_{MB,Rd} = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 34,5}{1,10} = 15,68 \text{ kN}$$

## Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):

$$V_{MB,Rd} = \frac{0,6 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 34,5}{1,10} = 9,41 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = 7,61 \text{ kN} > 3,48 \text{ kN OK}(45,72\%)$$

# Exercício 01

## Determinação da mínima espessura do filete de solda

### Verificação da Resistência da Solda

$$3,48 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 1 \cdot 48,5}{1,35} \rightarrow d_w = \mathbf{0,228cm}$$

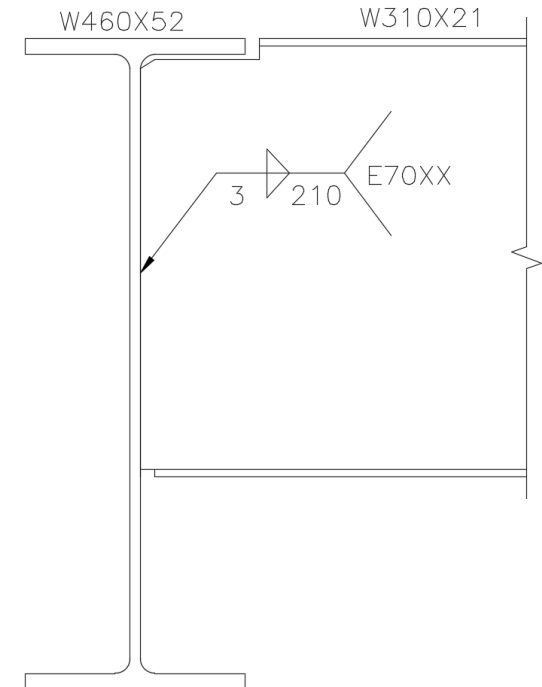
### Verificação da Resistência do Metal Base (Tração):

$$3,48 = \frac{d_w \cdot 1 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,11cm$$

### Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):

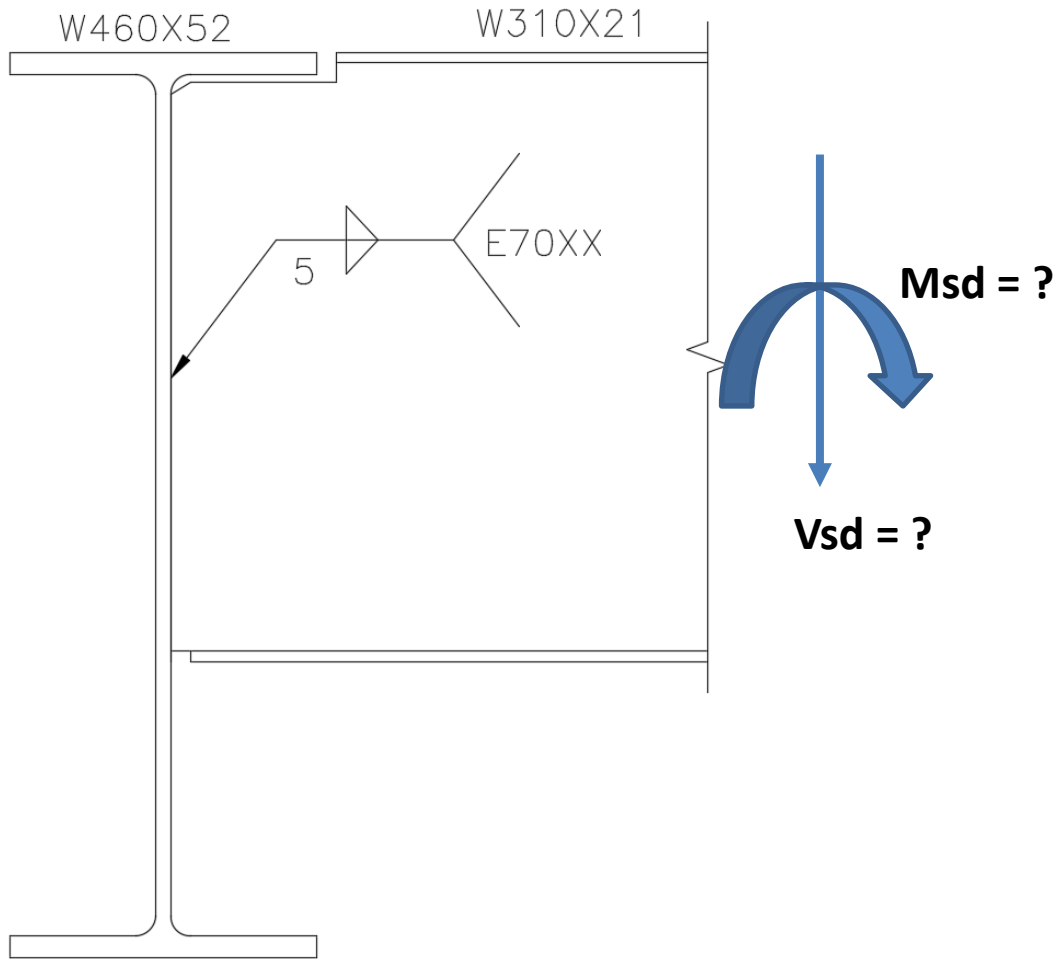
$$3,48 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 1 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,19cm$$

$$d_w = \mathbf{0,228 \text{ adotar } 3mm}$$



# Exercício 02

Dimensione a ligação viga-Viga abaixo



# Exercício 02

Quando não sabemos exatamente quais esforços atuam no perfil, podemos adotar sua máxima capacidade como ponto de partida

## Máxima capacidade ao esforço cortante da Viga W310X21

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot 30,3 \cdot 0,51 \cdot 34,5}{1,10} = 291 \text{ kN}$$

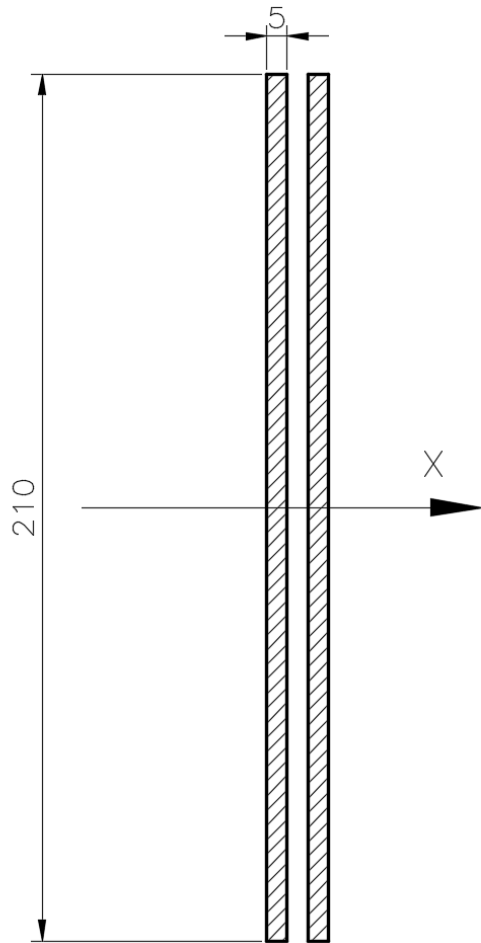
## Momento fletor para conter a W460X52

$$M_{br} = \frac{0,024 \cdot M_{sd} \cdot L}{n \cdot C_b \cdot L_{bb}} \quad M_{br} = \frac{0,024 \cdot \left( \frac{Z_x \cdot F_y}{1,10} \right) \cdot L}{n \cdot C_b \cdot L_{bb}} \rightarrow \frac{0,024 \cdot \left( \frac{1095,9 \cdot 34,5}{1,10} \right) \cdot 800}{3 \cdot 1.200} = 1100 \text{ kN.cm}$$

## Método aproximado:

$$M_{br} = 0,03 \cdot Z \cdot F_y \rightarrow 0,03 \cdot 1095,9 \cdot 34,5 = 1134 \text{ kN.cm}$$

# Exercício 02



**Esforço vertical por cm:**

$$V_{sd} = \frac{291}{2 \cdot 21} = 6,93 \text{ kN}$$

**Esforço horizontal por cm (adotando  $d_w=1\text{cm}$ ):**

$$I = 2 \cdot \left( \frac{1 \cdot 21^3}{12} \right) = 1543,5 \text{ cm}^4/\text{cm}^2$$

$$\sigma_h = H_{sd} = \frac{M \cdot y}{I} \rightarrow \frac{1134 \cdot 10,5}{1543,5} = 7,71 \text{ kN}$$

**Resultante:**

$$F_{sd} = \sqrt{6,93^2 + 7,71^2} = 10,52 \text{ kN}$$

# Exercício 02

## Determinação da mínima espessura do filete de solda

### Verificação da Resistência da Solda

$$10,52 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 1 \cdot 48,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,69cm$$

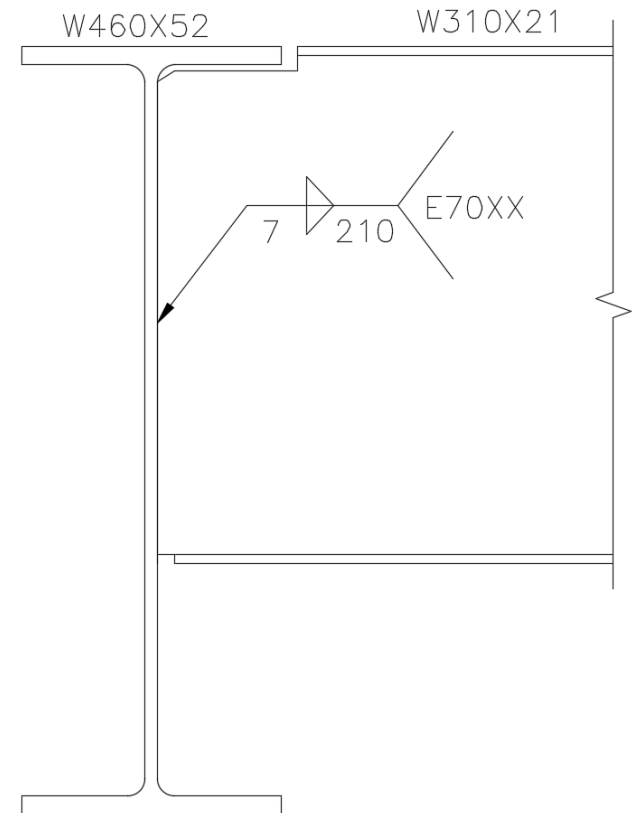
### Verificação da Resistência do Metal Base (Tração):

$$10,52 = \frac{d_w \cdot 1 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,335cm$$

### Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):

$$10,52 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 1 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,56cm$$

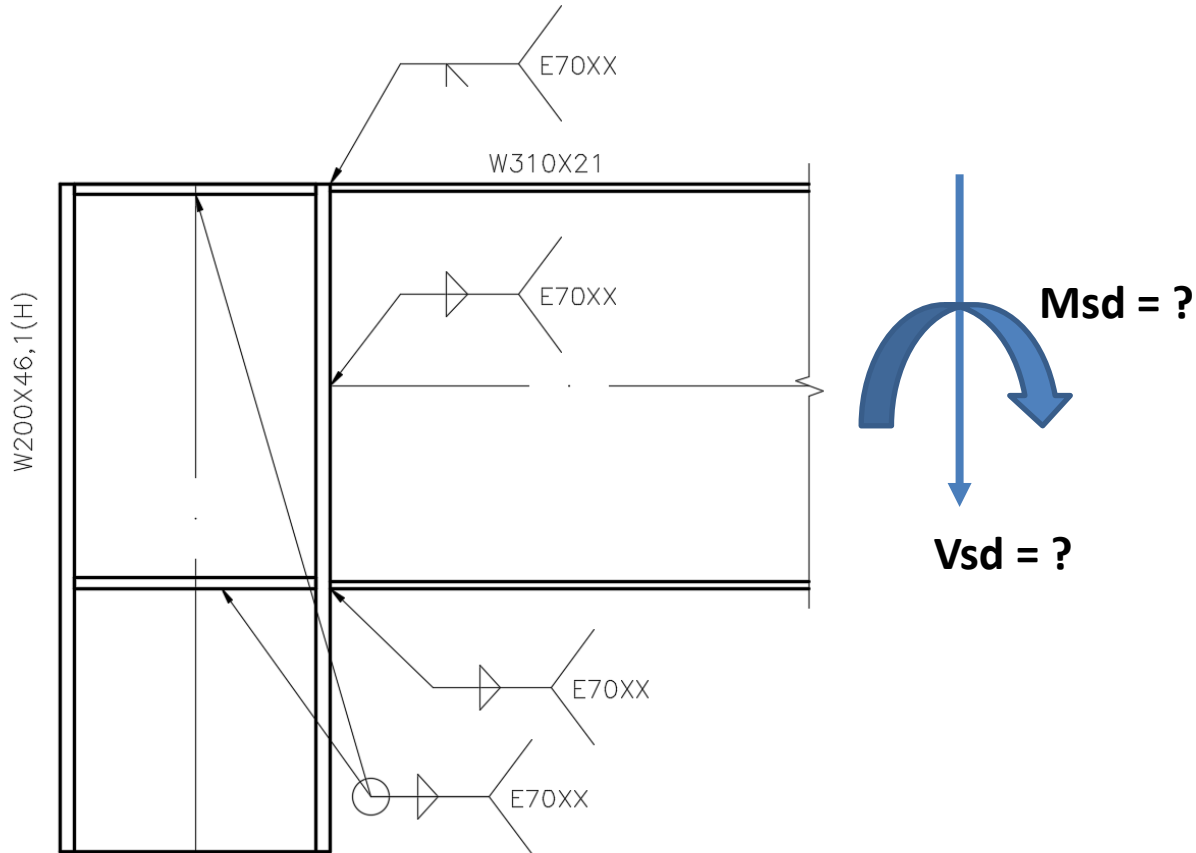
$$d_w = 0,69 \text{ adotar } 7mm$$





# Exercício 03

Dimensione a ligação viga-Coluna abaixo



# Exercício 03

## Verificação das soldas do perfil W310X21

*Para simplificação atribuiremos os esforços de momento às mesas e os esforços de cisalhamento à alma*

### Esforço máximo de tração/compressão nas mesas (conservador)

$$F_t = F_c = \frac{M_{pl}}{1,10 \cdot d} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,10 \cdot d} \rightarrow \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,10 \cdot 30,3} = 302 \text{ kN}$$

### Esforço máximo de tração/compressão nas mesas (exato)

$$F_t = F_c = \frac{A_{mesa} \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,5 \cdot [A_g - (d' \cdot t_w)] \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,5 \cdot [27,2 - (27,2 \cdot 0,51)] \cdot 34,5}{1,1} = 209 \text{ kN}$$

### Máxima capacidade ao esforço cortante da Viga W310X21

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot 30,3 \cdot 0,51 \cdot 34,5}{1,10} = 291 \text{ kN}$$

# Exercício 03

## Verificação da solda da mesa superior do perfil W310X21

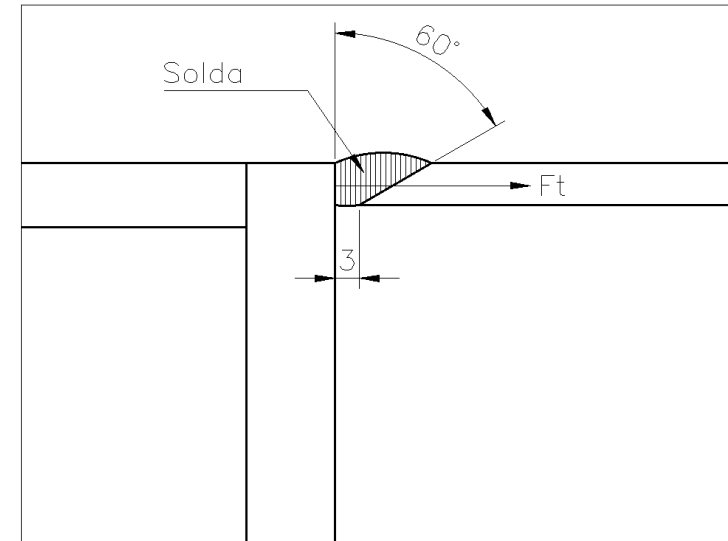
*Solda de penetração total com chanfro a 60° e abertura de raiz 3mm*

*Tração Normal à seção efetiva da solda:*

$$F_{wRd} = \frac{A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{t_f \cdot b_f \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,57 \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} = 180,6 \text{ kN} < 209 \text{ kN Não OK!}$$

*Considerando a capacidade máxima do perfil W310X21 à flexão, a mesa da coluna falha por excesso de tensão de tração.*



# Exercício 03

## Alternativa 1: realizar o chanfro na coluna

*Solda de penetração total com chanfro V a 120° e abertura de raiz 3mm*

*Tração na seção efetiva*

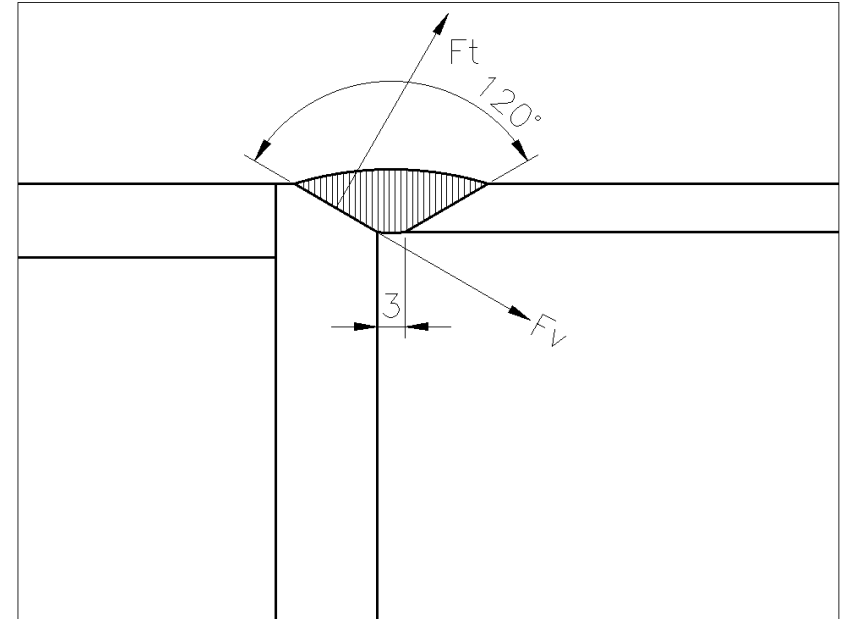
$$F_t = 209 \cdot \cos 60 = 104,5 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{\frac{0,57}{\cos 60} \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} = 361 \text{ kN} > 104,5 \text{ kN OK}$$

*Cisalhamento na seção efetiva*

$$F_v = 209 \cdot \sin 60 = 181 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{0,57}{\cos 60} \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} = 217 \text{ kN} > 181 \text{ kN OK}$$



# Exercício 03

**Alternativa 2: Realizar o chanfro na W310X21 e reforçar com solda de filete por baixo**

*Solda de penetração total com chanfro a 60° e abertura de raiz 3mm com reforço de filete*

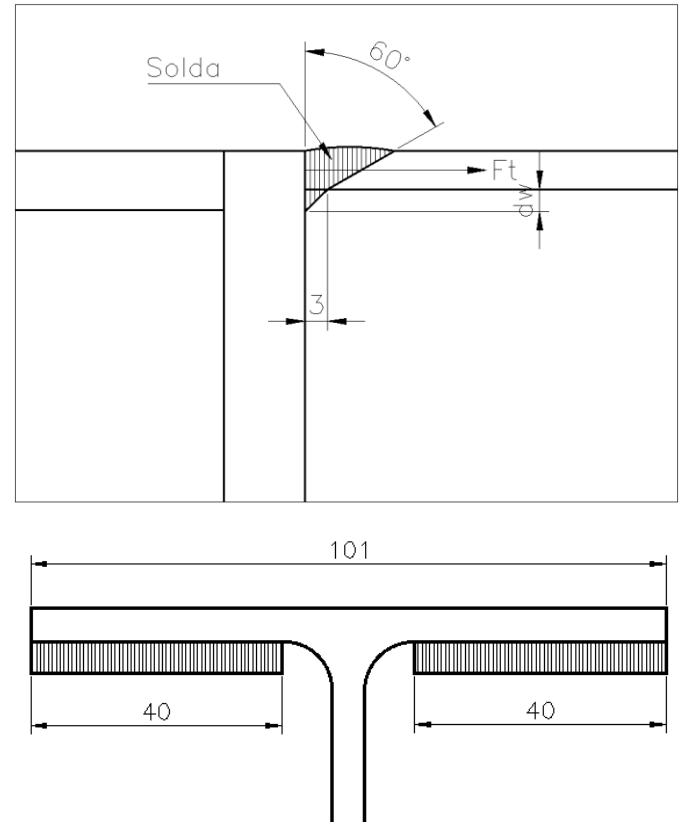
*Tração Normal à seção efetiva da solda:*

$$F_{wRd} = \frac{A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{t_f \cdot b_f \cdot F_y}{1,10} + \frac{d_w \cdot 2 \cdot 4}{1,10}$$

$$209 = \frac{0,57 \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} + \frac{d_w \cdot 2 \cdot 4 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,1133$$

*Adota-se reforço com filete de 3mm e abertura de raiz = 3mm*



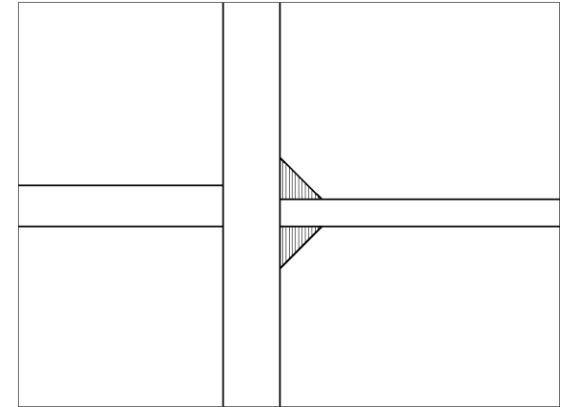
# Exercício 03

## Verificação da solda da mesa inferior do perfil W310X21

*Solda de filete*

### Verificação da Resistência da Solda

$$209 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot (10,1 + 2,4) \cdot 48,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,76cm$$



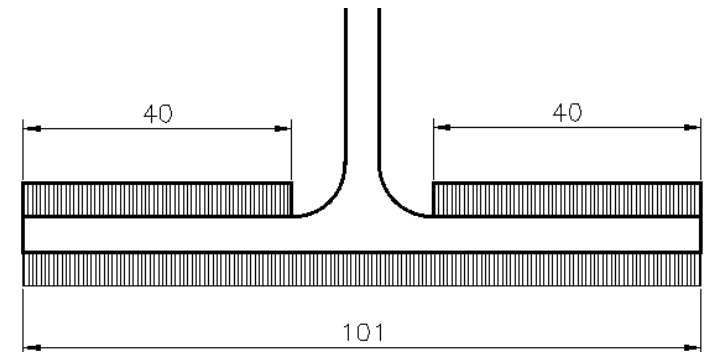
### Verificação da Resistência do Metal Base (Tração):

$$209 = \frac{d_w \cdot (10,1 + 2,4) \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,368cm$$

### Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):

$$209 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot (10,1 + 2,4) \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,61cm$$

**$d_w = 0,76$  adotar 8mm**



# Exercício 03

**Alternativa: Realizar abertura para ampliação do filete de solda superior**

*Solda de filete*

**Verificação da Resistência da Solda**

$$209 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 10,1 \cdot 48,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,67cm$$

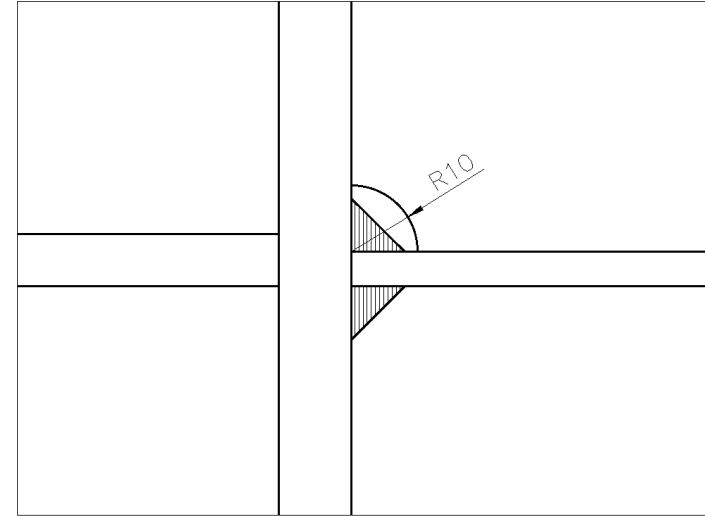
**Verificação da Resistência do Metal Base (Tração):**

$$209 = \frac{d_w \cdot 2 \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,329cm$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):**

$$209 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,55cm$$

**$d_w = 0,67$  adotar 7mm**





# Exercício 03

## Verificação da solda na alma do perfil W310X21

*Solda de Filete  $L = 210mm$*

### Verificação da Resistência da Solda

$$291 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 21 \cdot 48,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,46cm$$

### Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):

$$291 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 21 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,368cm$$

**$d_w = 0,46$  adotar 5mm**

# Exercício 03

## Verificação da espessura dos Enrijecedores

*Cada enrijecedor recebe  $209/2 = 104,5$  kN de tração / compressão*

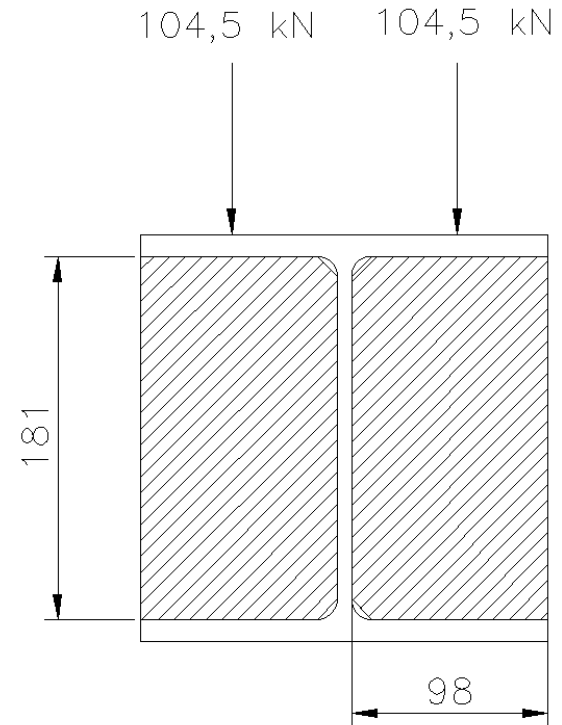
## Cálculo da espessura necessária do enrijecedor

$$104,5 = \frac{A \cdot F_y}{1,1} = \frac{t \cdot (9,8 - 1) \cdot 25}{1,1} \rightarrow 0,522cm$$

## Esbeltez do enrijecedor para seção compacta

$$\frac{b}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow t \approx \frac{b}{16} = \frac{9,8}{16} = 0,6125cm$$

**Adota-se enrijecedor  $t = 6,35mm$  (A36)**



# Exercício 03

**Verificação da solda na alma do perfil W200X46,1 (enrijecedor inferior)**

*Solda de Filete  $L = 140\text{mm}$  (E60XX)*

**Verificação da Resistência da Solda**

$$104,5 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 14 \cdot 41,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,286\text{cm}$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):**

$$104,5 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 14 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,198\text{cm}$$

**$d_w = 0,286$  adotar 3mm**

# Exercício 03

**Verificação da solda na mesa do perfil W200X46,1 (enrijecedor inferior)**

*Solda de Filete  $L = 88\text{mm}$  (E60XX)*

**Verificação da Resistência da Solda**

$$104,5 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 8,8 \cdot 41,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,455\text{cm}$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):**

$$104,5 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 8,8 \cdot 25}{1,10} \rightarrow d_w = 0,435\text{cm}$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (tração):**

$$104,5 = \frac{d_w \cdot 2 \cdot 8,8 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,19\text{cm}$$

**$d_w = 0,455$  adotar 5mm**

# Exercício 03

## **Verificação da solda na alma do perfil W200X46,1 (enrijecedor Superior)**

*Solda de penetração total L= 140mm (E60XX) chanfro 60° abertura raiz = 3mm*

*Cisalhamento Normal à seção efetiva da solda (Coluna W200X46,1):*

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot t \cdot L_c \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,6 \cdot 0,635 \cdot 14 \cdot 34,5}{1,10} = 167,3 \text{ kN} > 104,5 \text{ OK}$$

*Cisalhamento Normal à seção efetiva da solda (Enrijecedor):*

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{t}{\cos 60} \cdot L_c \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,6 \cdot \frac{0,635}{\cos 60} \cdot 14 \cdot 25}{1,10} = 242 \text{ kN} > 104,5 \text{ OK}$$

# Exercício 03

## **Verificação da solda na mesa do perfil W200X46,1 (enrijecedor Superior)**

*Solda de penetração total L= 88mm (E60XX) chanfro 60° abertura raiz = 3mm*

*tração Normal à seção efetiva da solda (Coluna W200X46,1):*

$$F_{wRd} = \frac{t \cdot L_c \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,635 \cdot 8,8 \cdot 34,5}{1,10} = 175,26 \text{ kN} > 104,5 \text{ OK}$$

*(Enrijecedor):*

*Tração na seção efetiva*

$$F_t = 104,5 \cdot \cos 60 = 52,25 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{\frac{0,635}{\cos 60} \cdot 8,8 \cdot 25}{1,10} = 254 \text{ kN} > 52,25 \text{ kN OK}$$

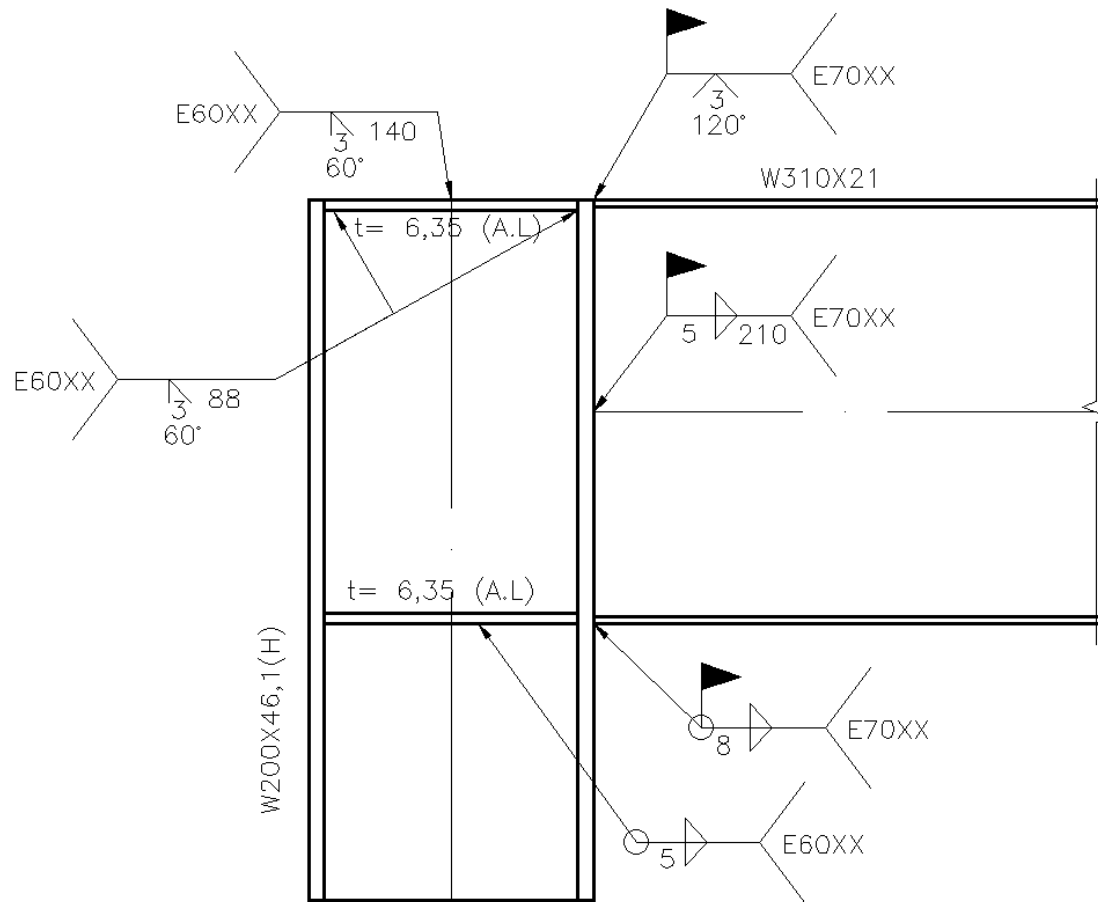
*Cisalhamento na seção efetiva*

$$F_v = 104,5 \cdot \sin 60 = 90,5 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{0,635}{\cos 60} \cdot 8,8 \cdot 25}{1,10} = 152,4 \text{ kN} > 90,5 \text{ kN OK}$$

# Exercício 03

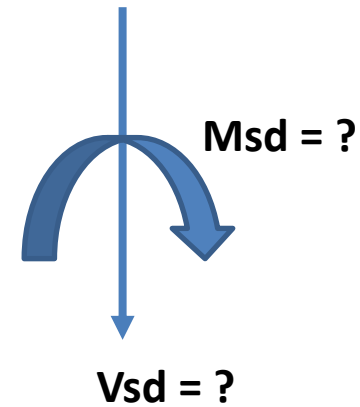
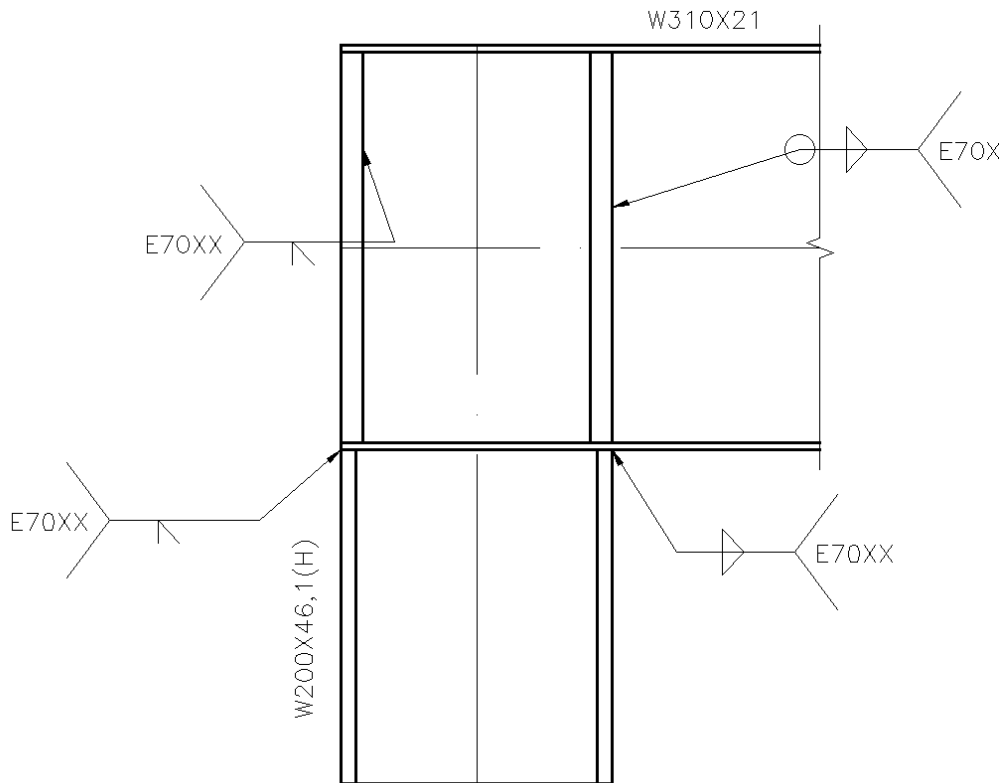
## Detalhamento da ligação





# Exercício 04

Dimensione a ligação viga-coluna



# Exercício 04

## Verificação das soldas do perfil W200X46,1

*No caso de ligação rígida, o momento fletor na extremidade de ambas peças é idêntico*

### Esforço máximo de tração/compressão nas mesas da coluna

$$F_t = F_c = \frac{M_{pl}}{1,10 \cdot d} = \frac{Z_x \cdot F_y}{1,10 \cdot d} \rightarrow \frac{291,9 \cdot 34,5}{1,10 \cdot 20,3} = 451 \text{ kN}$$

### Capacidade máxima de esforço tração/compressão da coluna

$$F_t = F_c = \frac{A_{mesa} \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,5 \cdot [A_g - (d' \cdot t_w)] \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,5 \cdot [58,6 - (16,1 \cdot 0,72)] \cdot 34,5}{1,1} = 737 \text{ kN}$$

### Máxima capacidade ao esforço cortante da Coluna W200X46,1

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot 20,3 \cdot 0,72 \cdot 34,5}{1,10} = 275 \text{ kN}$$

# Exercício 04

## Verificação da solda da mesa externa do perfil W200X46,1

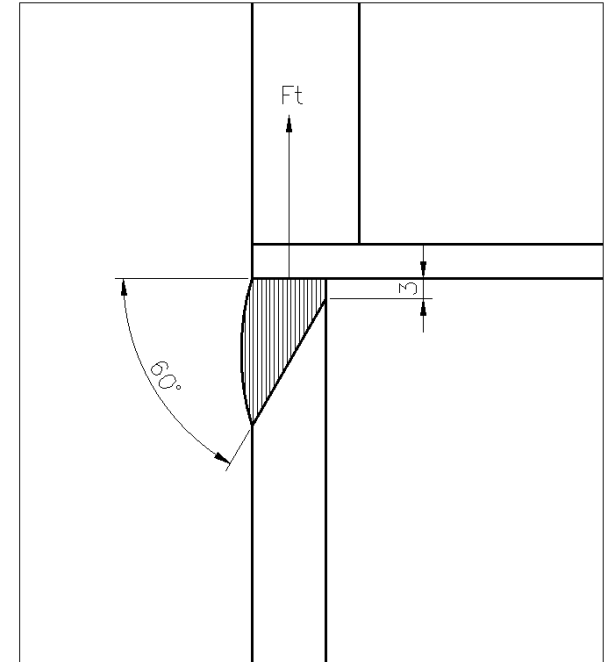
*Solda de penetração total com chanfro a 60° e abertura de raiz 3mm*

*Tração Normal à seção efetiva da solda:*

$$F_{wRd} = \frac{A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{t_f \cdot b_f \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{1,1 \cdot 10,134,5}{1,10} = 348 \text{ kN} < 451 \text{ kN Não OK!}$$

*Considerando a capacidade máxima do perfil W310X21 à flexão, a mesa da coluna falha por excesso de tensão de tração.*



# Exercício 04

**Realizar o chanfro na W200X46,1 e reforçar com solda de filete à direita**

*Solda de penetração total com chanfro a 60° e abertura de raiz 3mm com reforço de filete*

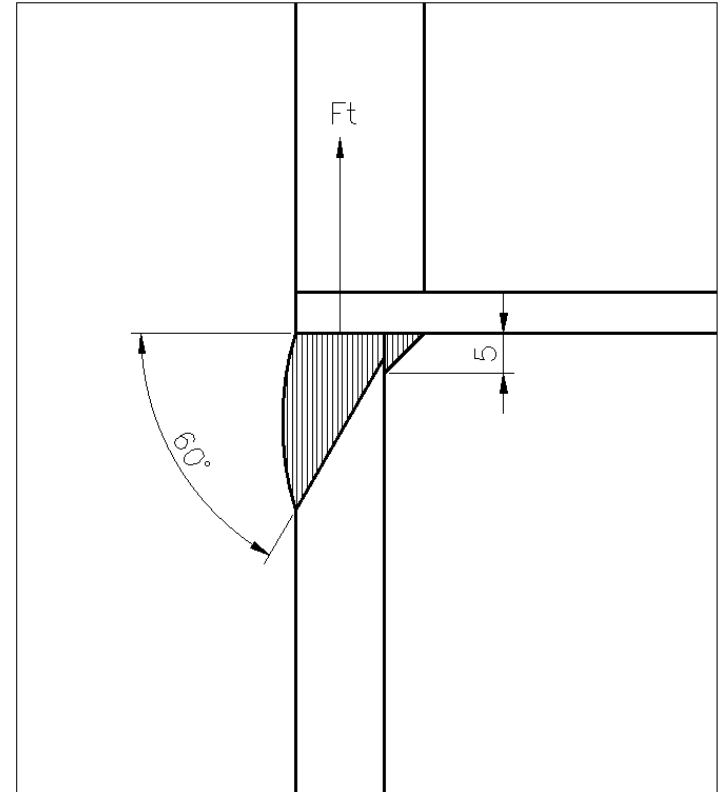
*Tração Normal à seção efetiva da solda:*

$$F_{wRd} = \frac{A_{MB} \cdot F_y}{1,10}$$

$$F_{wRd} = \frac{t_f \cdot b_f \cdot F_y}{1,10} + \frac{d_w \cdot 2 \cdot 4}{1,10}$$

$$451 = \frac{1,10 \cdot 10,1 \cdot 34,5}{1,10} + \frac{d_w \cdot 2 \cdot 4 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,41$$

*Adota-se reforço com filete de 5mm e abertura de raiz = 3mm*



# Exercício 04

*Verificação da Mesa do perfil W200X46,1*

*Tração na seção efetiva*

$$F_t = 451 \cdot \cos 60 = 226 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{\frac{0,72}{\cos 60} \cdot 10,134,5}{1,10} = 481 \text{ kN} > 226 \text{ kN OK}$$

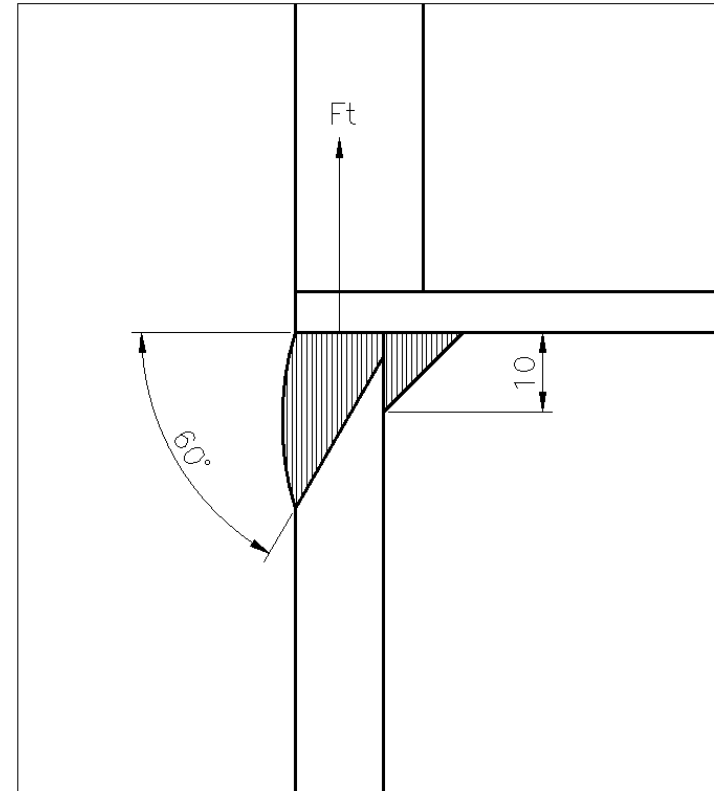
*Cisalhamento na seção efetiva*

$$F_v = 451 \cdot \sin 60 = 391 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{0,72}{\cos 60} \cdot 10,134,5}{1,10} = 273 \text{ kN} < 391 \text{ kN NÃO OK}$$

**NECESSÁRIO AUMENTAR O FILETE DE REFORÇO**

$$391 = 273 + \frac{0,6 \cdot (d_w + 0,3) \cdot 10,134,5}{1,10} \rightarrow 0,92 \rightarrow \text{Adotar } d_w = 10\text{mm}$$



# Exercício 04

## Verificação da solda da mesa interna do perfil W200X46,1

*Solda de filete*

### Verificação da Resistência da Solda

$$451 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot (10,1 + 2,4) \cdot 48,5}{1,35} \rightarrow d_w = 1,64cm$$

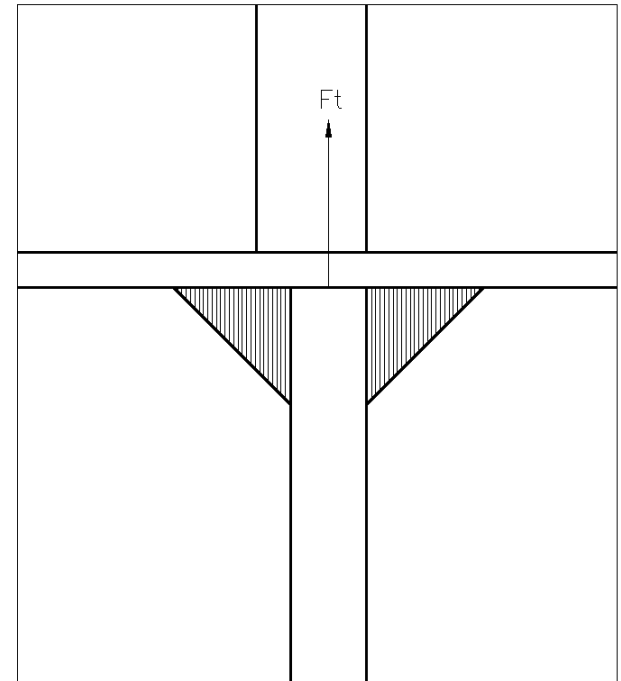
### Verificação da Resistência do Metal Base (Tração):

$$451 = \frac{d_w \cdot (10,1 + 2 \cdot 4) \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,794cm$$

### Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):

$$451 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot (10,1 + 2,4) \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 1,32cm$$

**$d_w = 1,64$  adotar 17mm**



# Exercício 04

## Verificação da espessura dos Enrijecedores

*Cada enrijecedor recebe 451/2 ~ 226 kN de tração / compressão*

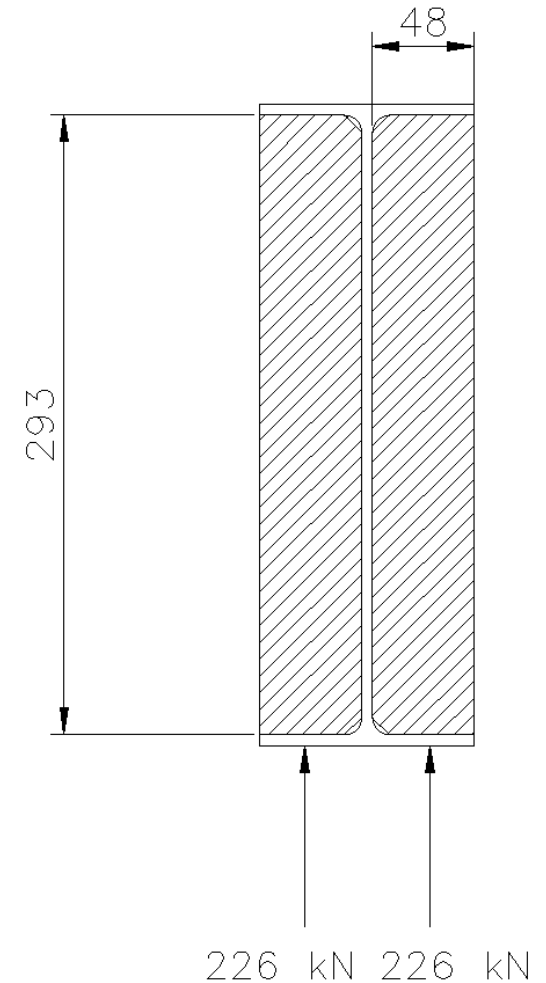
### Cálculo da espessura necessária do enrijecedor

$$226 = \frac{A \cdot F_y}{1,1} = \frac{t \cdot (4,8 - 1) \cdot 25}{1,1} \rightarrow 2,62 \text{ cm}$$

### Esbeltez do enrijecedor para seção compacta

$$\frac{b}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow t \approx \frac{b}{16} = \frac{48}{16} = 0,3 \text{ cm}$$

**Adota-se enrijecedor  $t = 31,75 \text{ mm}$  (A36)**





# Exercício 04

**Verificação da solda na alma do perfil W310X21 (enrijecedor interno)**

*Solda de Filete  $L = 210\text{mm}$  (E60XX)*

**Verificação da Resistência da Solda**

$$226 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 21 \cdot 41,5}{1,35} \rightarrow d_w = 0,42\text{cm}$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):**

$$226 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 21 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,146\text{cm}$$

**$d_w = 0,42$  adotar 5mm**

# Exercício 04

**Verificação da solda na mesa do perfil W310X21 (enrijecedor interno)**

*Solda de Filete  $L = 38mm$  (E60XX)*

**Verificação da Resistência da Solda**

$$226 = \frac{0,6 \cdot 0,707 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 3,8 \cdot 41,5}{1,35} \rightarrow d_w = 2,28cm$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (Cisalhamento):**

$$226 = \frac{0,6 \cdot d_w \cdot 2 \cdot 3,8 \cdot 25}{1,10} \rightarrow d_w = 2,18cm$$

**Verificação da Resistência do Metal Base (tração):**

$$226 = \frac{d_w \cdot 2 \cdot 3,8 \cdot 34,5}{1,10} \rightarrow d_w = 0,95cm$$

**$d_w = 2,28$  adotar 23mm**

# Exercício 04

## **Verificação da solda na alma do perfil W310X21 (enrijecedor externo)**

*Solda de penetração total L= 210mm (E60XX) chanfro 60° abertura raiz = 3mm*

*Cisalhamento Normal à seção efetiva da solda (Coluna W200X46,1):*

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot t \cdot L_c \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,6 \cdot 3,175 \cdot 21 \cdot 34,5}{1,10} = 1254 \text{ kN} > 226 \text{ OK}$$

*Cisalhamento Normal à seção efetiva da solda (Enrijecedor):*

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{t}{\cos 60} \cdot L_c \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{0,6 \cdot \frac{3,175}{\cos 60} \cdot 21 \cdot 25}{1,10} = 1818 \text{ kN} > 226 \text{ OK}$$

# Exercício 04

## Verificação da solda na mesa do perfil W310,21 (enrijecedor externo)

*Solda de penetração total  $L = 38\text{mm}$  (E60XX) chanfro  $60^\circ$  abertura raiz =  $3\text{mm}$*

*tração Normal à seção efetiva da solda (Viga W310X21)*

$$F_{wRd} = \frac{t \cdot L_c \cdot F_y}{1,10} \rightarrow \frac{3,175 \cdot 38 \cdot 34,5}{1,10} = 378 \text{ kN} > 226 \text{ kN}$$

*(Enrijecedor):*

*Tração na seção efetiva*

$$F_t = 226 \cdot \cos 60 = 113 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{\frac{3,175}{\cos 60} \cdot 38 \cdot 25}{1,10} = 548 \text{ kN} > 113 \text{ kN OK}$$

*Cisalhamento na seção efetiva*

$$F_v = 226 \cdot \sin 60 = 196 \text{ kN}$$

$$F_{wRd} = \frac{0,6 \cdot \frac{3,175}{\cos 60} \cdot 38 \cdot 25}{1,10} = 329 \text{ kN} > 196 \text{ kN OK}$$

# Exercício 04

## Detalhamento da ligação

