



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PMR 3203**

**- PROCESSOS DE JUNÇÃO -**

**- Parte II -**

**2020.1**

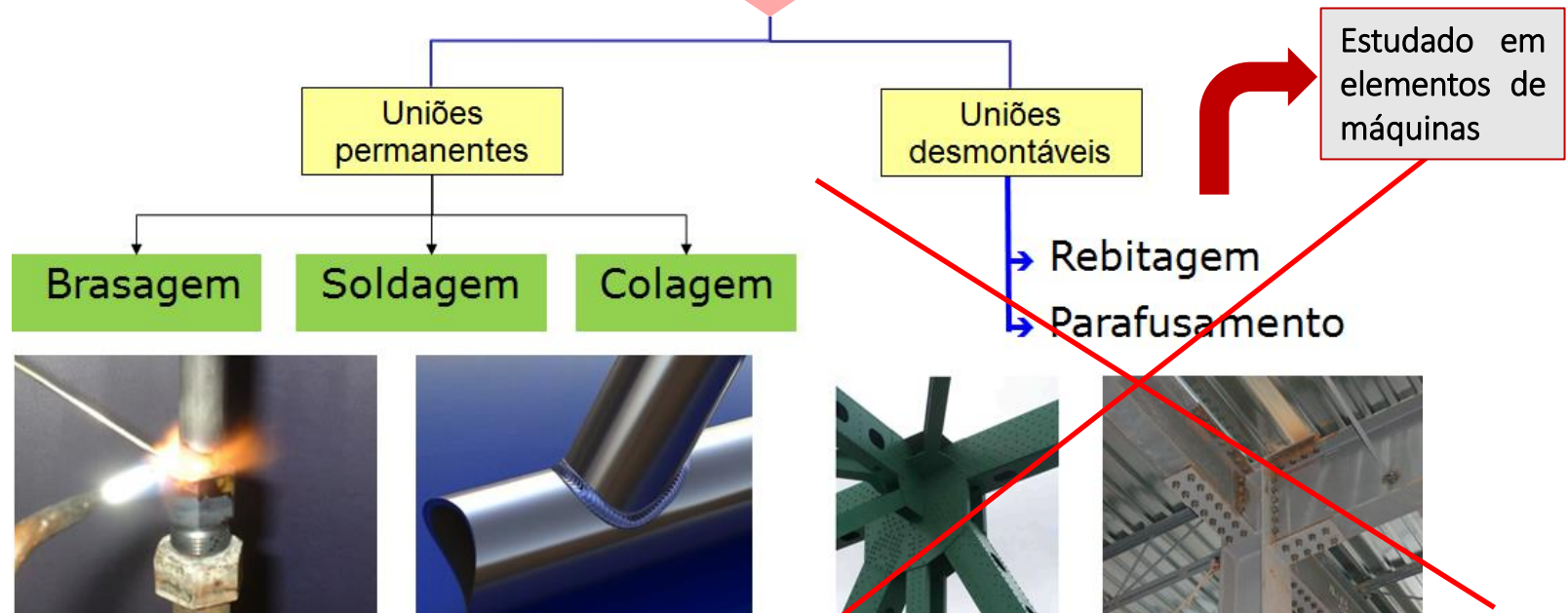


## Tópicos

- ▶ Revisão da aula A8
- ▶ Classificação dos processos de soldagem
- ▶ Processos especiais de soldagem
- ▶ Projeto de juntas soldadas
- ▶ Automatização do processo de soldagem



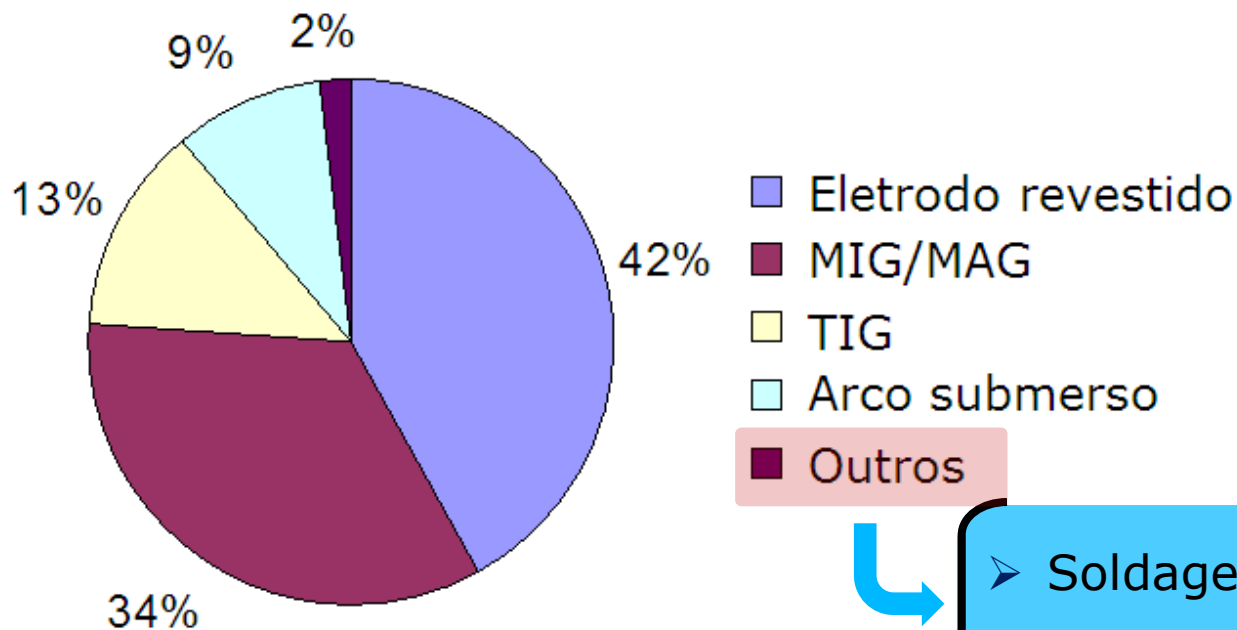
## Divisão dos processos de fabricação





## Processos especiais de soldagem

### ▶ Principais processos de soldagem



- 2%
- Soldagem por plasma
  - Soldagem por Laser
  - Soldagem por feixe de elétrons
  - Soldagem por resistência elétrica (solda ponto)
  - Soldagem por atrito

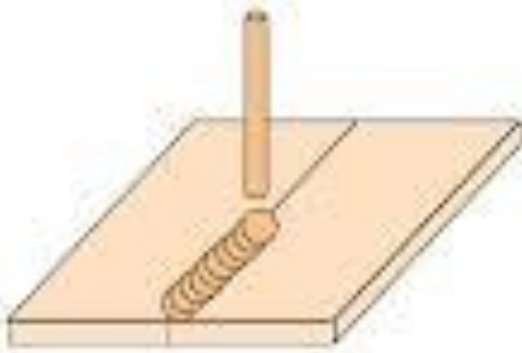


## **Processos especiais de soldagem**

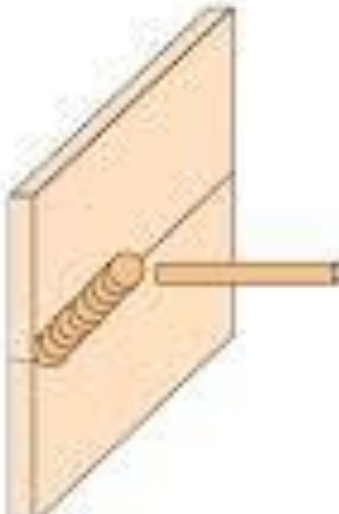
- ▶ Soldagem por plasma
- ▶ Soldagem por feixe de elétrons
- ▶ Soldagem por Laser
- ▶ Soldagem por resistência (solda ponto)
- ▶ Soldagem por atrito



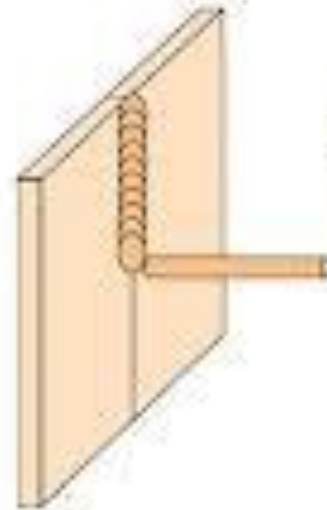
## Posições de soldagem



▶ plana



▶ horizontal



▶ vertical



▶ sobre cabeça



## Soldagem por Plasma

- ▶ Soldagem por plasma ou *Plasma arc welding (PAW)*
- ▶ Processo de soldagem por plasma é caracterizado por utilizar um eletrodo de tungstênio não consumível, semelhante a soldagem TIG.
- ▶ Neste processo o arco é forçado por um pequeno difusor de cobre que estrangula o arco restringindo o fluxo de plasma, aumentando a velocidade de saída.
- ▶ A restrição do arco leva a uma forma de coluna ao invés de cone como no TIG.
- ▶ É necessário a utilização de gás de proteção adicional
- ▶ O fluxo de gás de plasma é muito menor do que o gás de proteção para minimizar turbulência



## Soldagem por Plasma

- ▶ *Plasma arc welding (PAW)*
- ▶ Vídeo

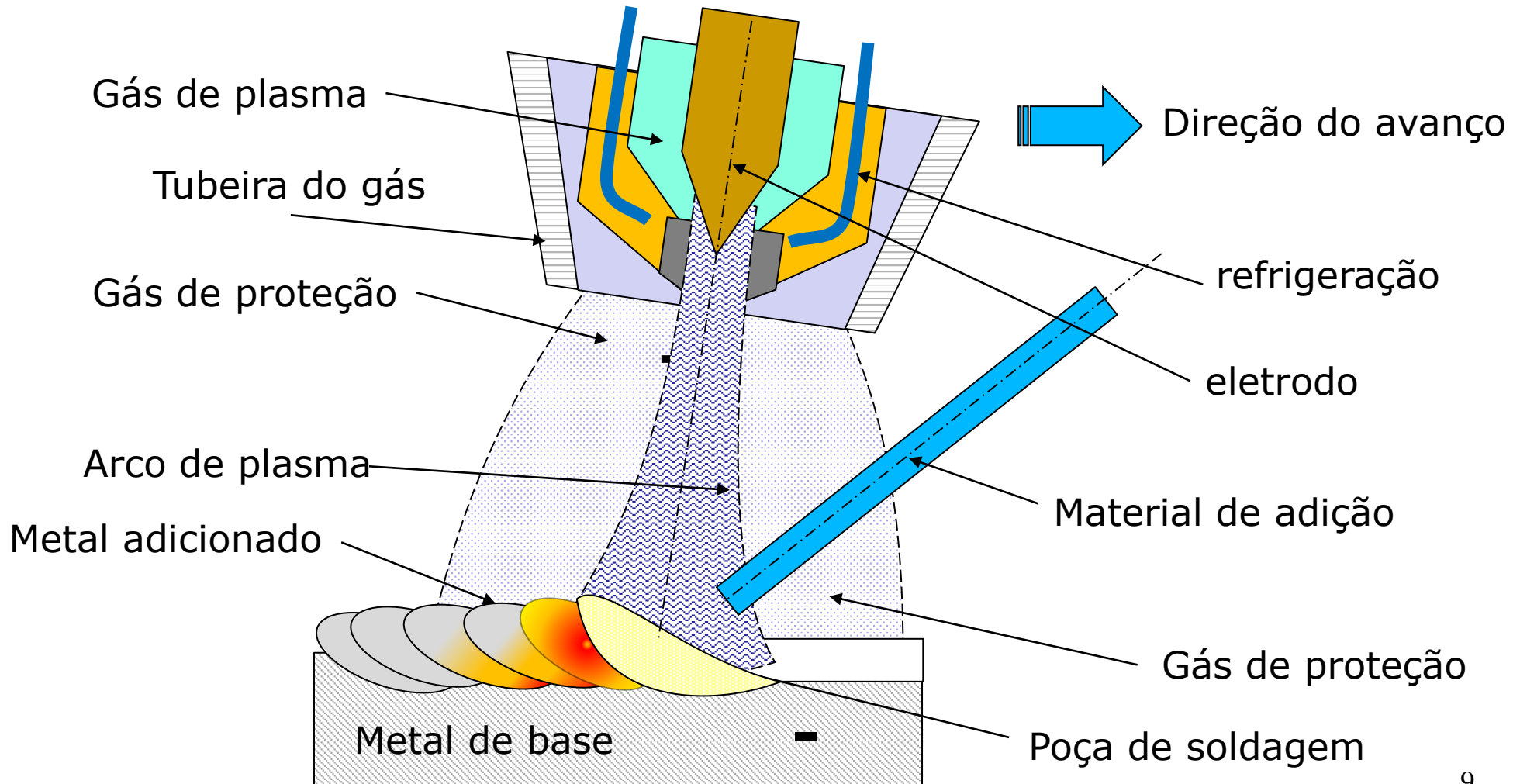
<https://www.youtube.com/watch?v=588EJInHLsc>





## Soldagem por Plasma

► características





## Soldagem por Plasma

### ▶ Vantagens

- ▶ Alta integridade da soldagem, soldagens de alta responsabilidade
- ▶ Velocidade e soldagem comparável a do processo GTAW-TIG
- ▶ Custo de soldagem menor do que a soldagem por Laser
- ▶ Excelente relação custo/benefício para certas aplicações, tais como soldagem de aços inoxidáveis e foles expansíveis (ex. acoplamentos)
- ▶ Boa penetração, melhor do que no TIG
- ▶ Soldagem de superfícies revestidas
- ▶ Soldagem em um único passe em materiais espessos



## Soldagem por Plasma

### ▶ Vantagens

- ▶ A maior estabilidade do arco permite operar a alturas entre eletrodo e peça maiores, reduzindo o risco de contaminação por tungstênio
- ▶ Um eletro pode durar um turno completo antes de ser reafiado (cone da ponta)
- ▶ O custo de equipamento é bem inferior do que o necessário para soldagem a Laser ou Feixe de elétrons
- ▶ A soldagem por plasma proporciona maior vida do eletrodo



## Soldagem por Plasma

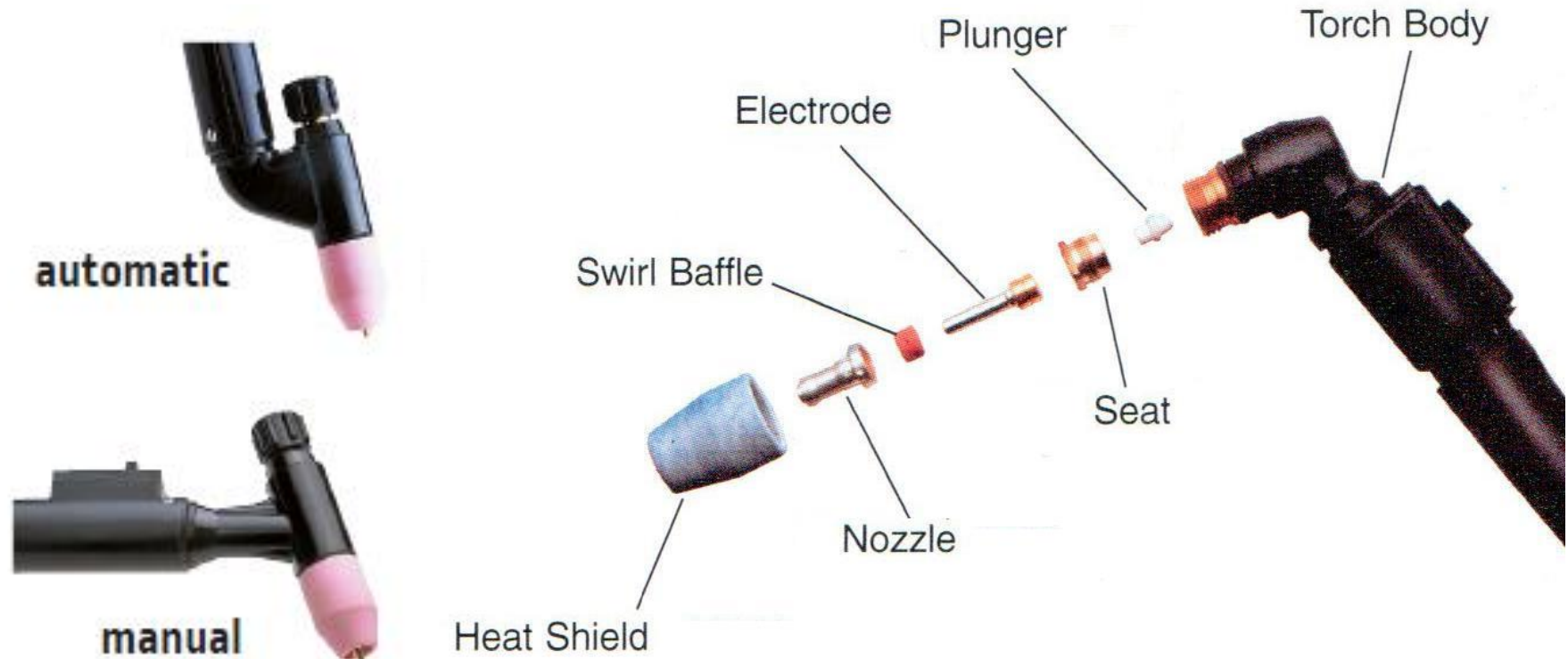
### ▶ Desvantagens

- ▶ A grande quantidade de calor gerada leva a zonas termicamente afetadas maiores, principalmente se comparadas aos processos concorrentes de Laser e feixe de elétrons
- ▶ O equipamento é mais caro do que o TIG
- ▶ Necessidade de refrigeração por água da pistola de soldagem



## Soldagem por Plasma

- ▶ Características da pistola





## Soldagem por Laser

### ► Introdução

- LASER é uma abreviação para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, sendo um feixe de luz coerente (um única fase) monocromático (um único comprimento de onda), com pouca divergência e concentra alta densidade de energia.
- A incidência do feixe de laser provoca um aquecimento rápido da região a ser soldada promovendo a fusão entre as peças, ou entre essas e o material de adição.



## Soldagem por Laser

### ► **Introdução**

- É um processo de união sem contato que necessita de acesso a região de soldagem por um dos lados (vareta de material de adição)
- A soldagem a Laser é empregada geralmente em materiais de difícil soldagem por outros processos ou áreas extremamente pequenas



## Soldagem por Laser

► **Vídeo exemplo**

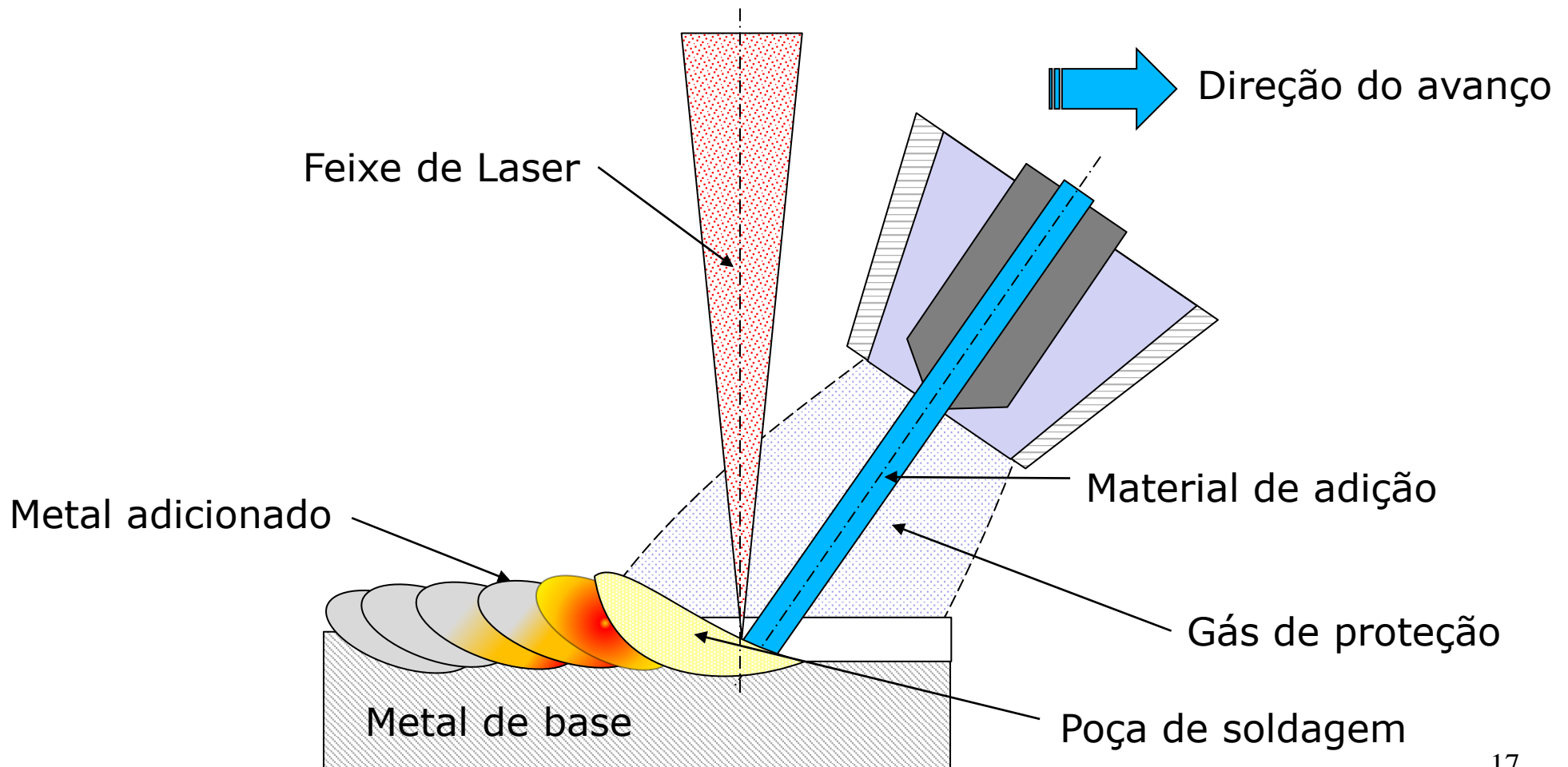
<https://www.youtube.com/watch?v=x6dPhwVFrJU>





## Soldagem por Laser

► características





## Soldagem por Laser

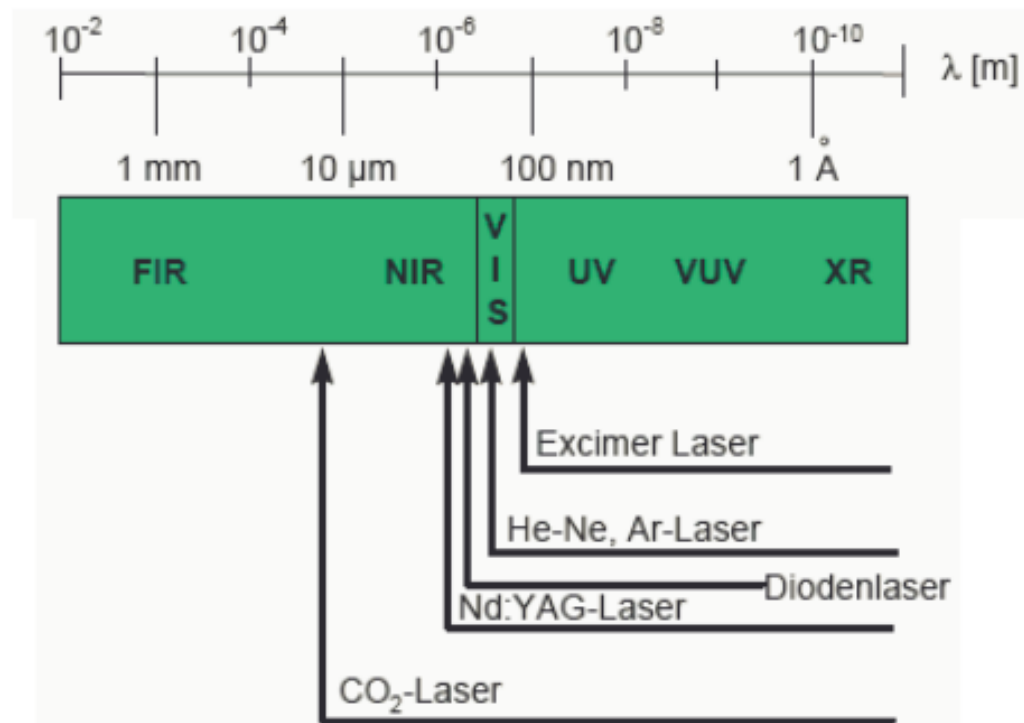
- ▶ Tipos de Laser
- ▶ Todos os tipos de Laser empregados em soldagem podem ser operar com onda contínua ou pulsada
- ▶ Os Laser pulsados utilizam picos de alta energia para criar a solda, ao passo que os Laser contínuos utilizam uma potência média. Isto permite aos Laser pulsados utilizarem menor energia, gerando uma ZTA menor
- ▶ Lasers are used for materials that are difficult to weld using other methods, for hard to access areas and for extremely small components. Inert gas shielding is needed for more reactive materials.



## Soldagem por Laser

### ► Tipos de Laser

- Nd:YAG (Rod Laser)  $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- Yb:YAG (Disc Laser)  $\lambda = 1030 \text{ nm}$
- CO<sub>2</sub> (Gas Laser)  $\lambda = 10600 \text{ nm}$





## Soldagem por Laser

### ► Tipos de Laser

- Os tipos principais de laser empregados na soldagem são:
- Os a gases, os quais usam uma mistura de gases tais com o He e N. Existem também Laser que usam CO ou CO<sub>2</sub> . Esses Lasers utilizam fontes de baixa corrente e alta voltagem para excitar o gás, e iniciar o processo que geral o Laser.
- Laser de estado sólido, tais como o Nd:YaG e os Laser a rubi, operam com comprimento de onda na ordem de 1  $\mu\text{m}$
- Diodos Laser



## Soldagem por Laser

### ▶ **CO<sub>2</sub> X YAG**

#### ▶ **CO<sub>2</sub>**

- Alta potência
- Melhor foco
- Velocidade de soldagem maiores em materiais não refletivos
- Maior penetração em
- Manor custo
- Aparato de segurança menor e mais barato

#### ▶ **YAG**

- Passível do feixe ser distribuído por fibra óptica
- Pode soldar materiais
- Fácil alinhamento do feixe
- Pode se usar Ar como gás de proteção
- Comprimento das fibras ópticas não afeta
- Alto pico de energia com maior energia por pulso



## Soldagem por Laser

### ► Vantagens:

- Opera com aços alta liga sem problemas
- Pode ser transmitido por longas distâncias sem perdas significativas
- A ZTA é muito pequena
- Solda materiais diferentes
- Não é necessário material de adição
- Não necessita remoção de material de proteção
- Extremamente precisa
- Produz soldas profundas e estreitas
- Gera pouca distorção térmica
- Pode ser utilizada em peças pequenas e de pouca espessura
- Alta velocidade de soldagem
- Pode ser empregada para soldar polímeros e compósitos



## Soldagem por Laser

### ► Desvantagens

- A alta taxa de resfriamento pode gerar trincas em alguns materiais
- Elevado custo do equipamento
- Alto custo de manutenção
- Reflexão dos materiais metálicos pode danificar a óptica
- Necessita de posicionamento e movimentação exatos sobre a junta
- Perigo de provocar temperas localizadas
- Necessidade de sistemas de proteção contra radiação
- Difícil de operar soldagens em alumínio, cobre e materiais de alta refletividade
- Baixa eficiência  $\text{CO}_2 < 20\%$ , YAG  $< 5\%$
- Refletividade das superfícies podem limitar a penetração a 25mm
- Incidência de trincas



## Soldagem por Laser

### ► **Soldagem a Laser X Soldagem a Arco**


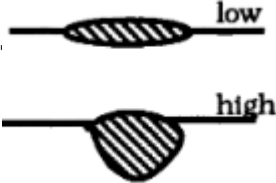
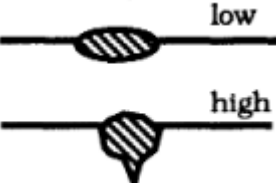
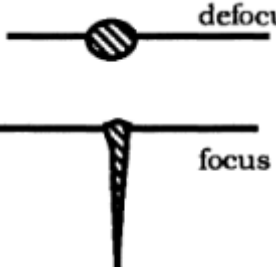
- A forma de transmissão da energia com Laser é diferente da forma proporcionada pelo arco elétrico
- A soldagem a Laser a absorção de energia pelo material é afetada por uma série de fatores tais como o tipo de laser, forma de operação (contínua ou pulsada), densidade de energia incidente, condições do material de base entre outras.
- A natureza do Laser não é elétrica, portanto não é afetada por campos magnéticos ou condições geométricas impostas pelos componentes que estão sendo soldados
- Não produz Raio-X
- Pode ser empregada em materiais não metálicos





## Soldagem por Laser

### ▶ Comparação da densidade de energia

Processo	Intensidade de calor $W^2m$	Profundidade da zona de fusão
▶ Arco submerso	▶ $5 \times 10^6 : 10^8$	▶ 
▶ MIG/MAG/TIG	▶ $5 \times 10^6 : 10^8$	▶ 
▶ Plasma	▶ $5 \times 10^6 : 10^{10}$	▶ 
▶ Laser / feixe de elétrons	▶ $10^{10} : 10^{12}$	▶ 



## Soldagem por feixe de elétrons

- ▶ Soldagem por feixe de elétrons ou electron beam welding
- ▶ É um processo de soldagem por fusão no qual a fonte de energia é proveniente de um feixe de elétrons de alta velocidade.
- ▶ O calor necessário a fusão é proveniente do impacto com alta energia cinética dos elétrons contra a superfície.
- ▶ Processo de Soldagem de alta produtividade, completamente automatizado, capaz de produzir soldas de alta qualidade com amplo espectro de aplicações (Ex. indústria aero espacial e nuclear).
- ▶ Soldagem por feixe de elétrons é utilizada quando os requisitos de resistência, qualidade e confiabilidade da solda são primários



## Soldagem por feixe de elétrons

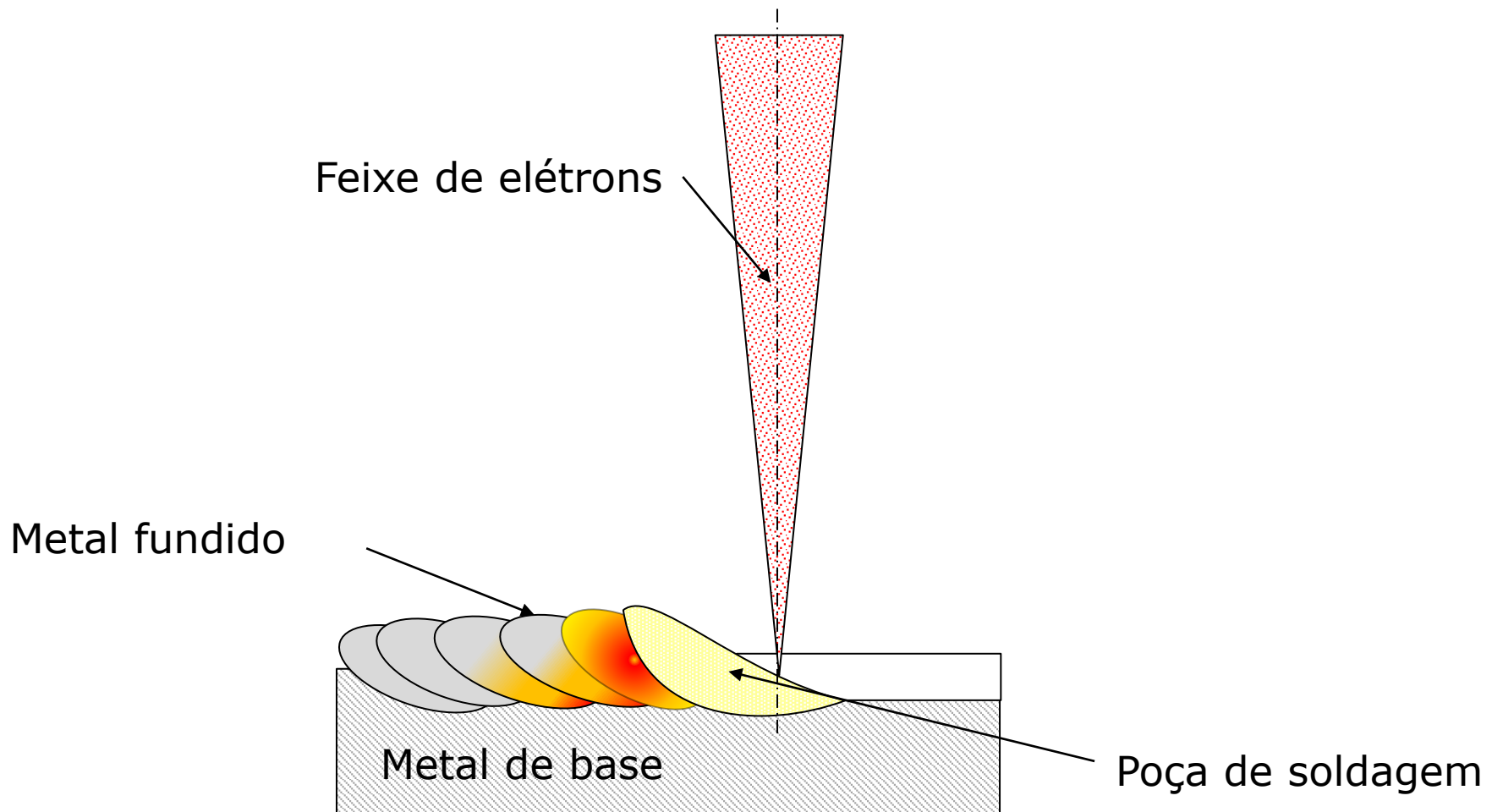
- ▶ Vídeo exemplo

<https://www.youtube.com/watch?v=xYi2x0o--34>



## Soldagem por feixe de elétrons

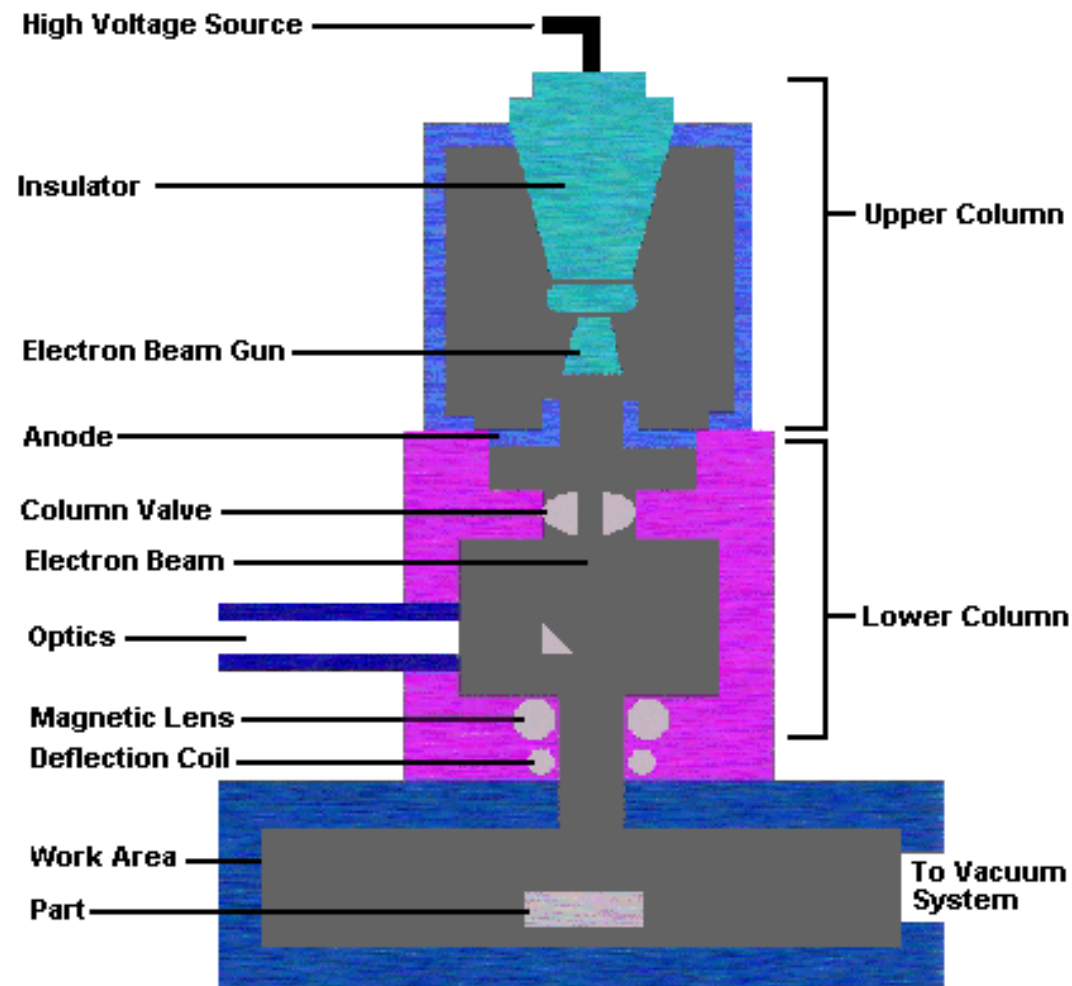
► características





## Soldagem por feixe de elétrons

### ► Equipamento - esquema



Stylized cross section of column and work chamber



## Soldagem por feixe de elétrons

### ► Vantagens

- Comparado com os processos de soldagem a arco voltaico a EBW melhora a resistência da junta entre 15 e 25%
- A ZTA é pequena,
- O cordão de solda com dimensões estáveis, o que é particularmente útil em operações de acabamento
- Elimina óxidos e inclusões de tungstênio, e remove impurezas
- Estrutura cristalina do material fundido é fina
- Soldagem de chapas finas em todas as posições



## Soldagem por feixe de elétrons

### ► Vantagens

- Baixa distorção térmica
- Permite soldar estruturas onde um dos lados está no vácuo
- Qualidade da junta soldada é contínua, processo automatizado
- Não necessita de gases de proteção
- Não utiliza eletrodos de tungstênio
- Não precisa de preparação de juntas
- Pode soldar materiais impossíveis por outros processo (ex. polímeros)



## Soldagem por feixe de elétrons

### ► Desvantagens

- Alto custo do equipamento
- Necessita de câmara de contenção
- Demorada quando necessita ser realizada no vácuo
- Alto custo de preparação
- Emissões de Raio-X
- Alta taxa de solidificação poder gerar trincas
- Operadores habilitados
- Não recomendado para aços com alto teor de carbono (trincas)





## Soldagem por feixe de elétrons

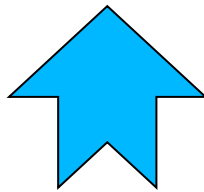
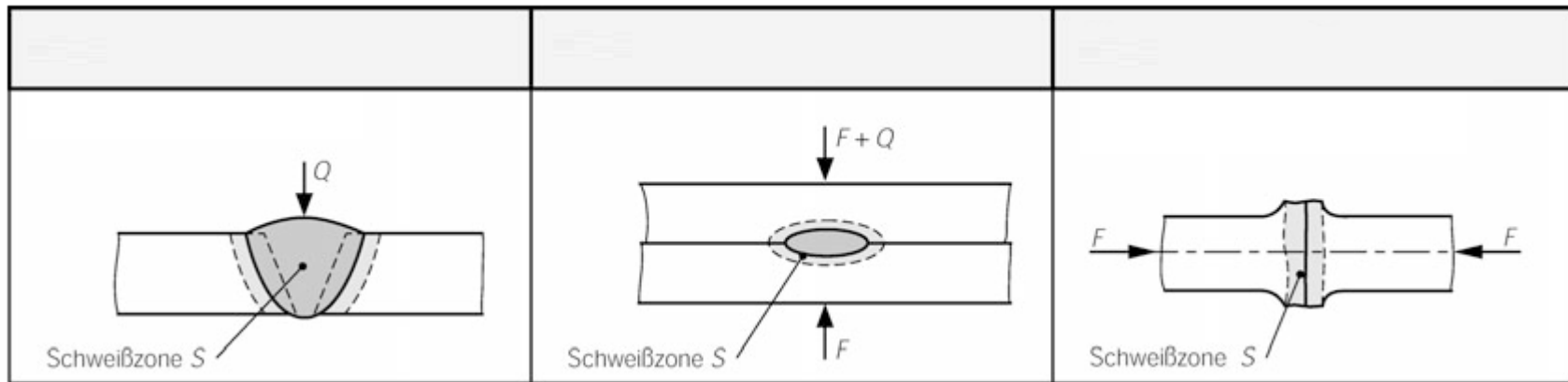
- ▶ Comparação entre soldagem a Laser and EBW

[https://www.youtube.com/watch?v=jOa\\_EV11Mng](https://www.youtube.com/watch?v=jOa_EV11Mng)

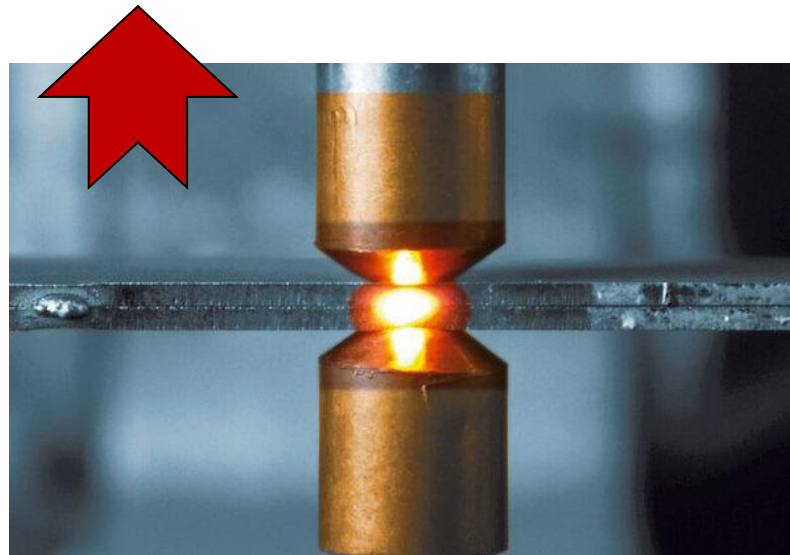


## Soldagem por resistência elétrica

### ▶ introdução



- ▶ Soldagem ER, AS, TIG, MIG, MAG, Plasma, FE, Laser

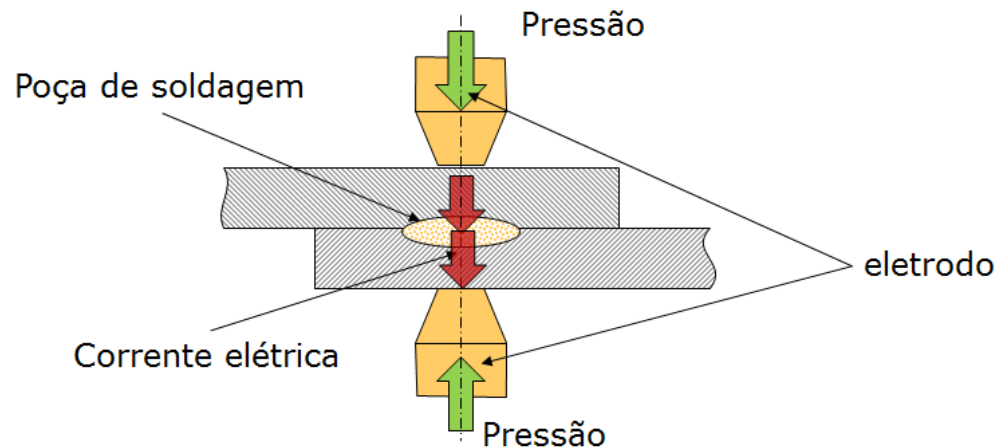




## Soldagem por resistência elétrica

- ▶ Soldagem por resistência elétrica ou resistance spot weld (RW)
- ▶ A soldagem por resistência é um processo termo elétrico no qual o calor necessário a fusão do material é gerado na interface das peças a serem unidas.
- ▶ O calor é gerado através da passagem de corrente elétrica aplicada de forma precisa, e controlada em um ponto onde os eletrodos aplicam pressão.

- ▶ Visão geral





## Soldagem por resistência elétrica

- ▶ Vídeo exemplo de soldagem por resistência

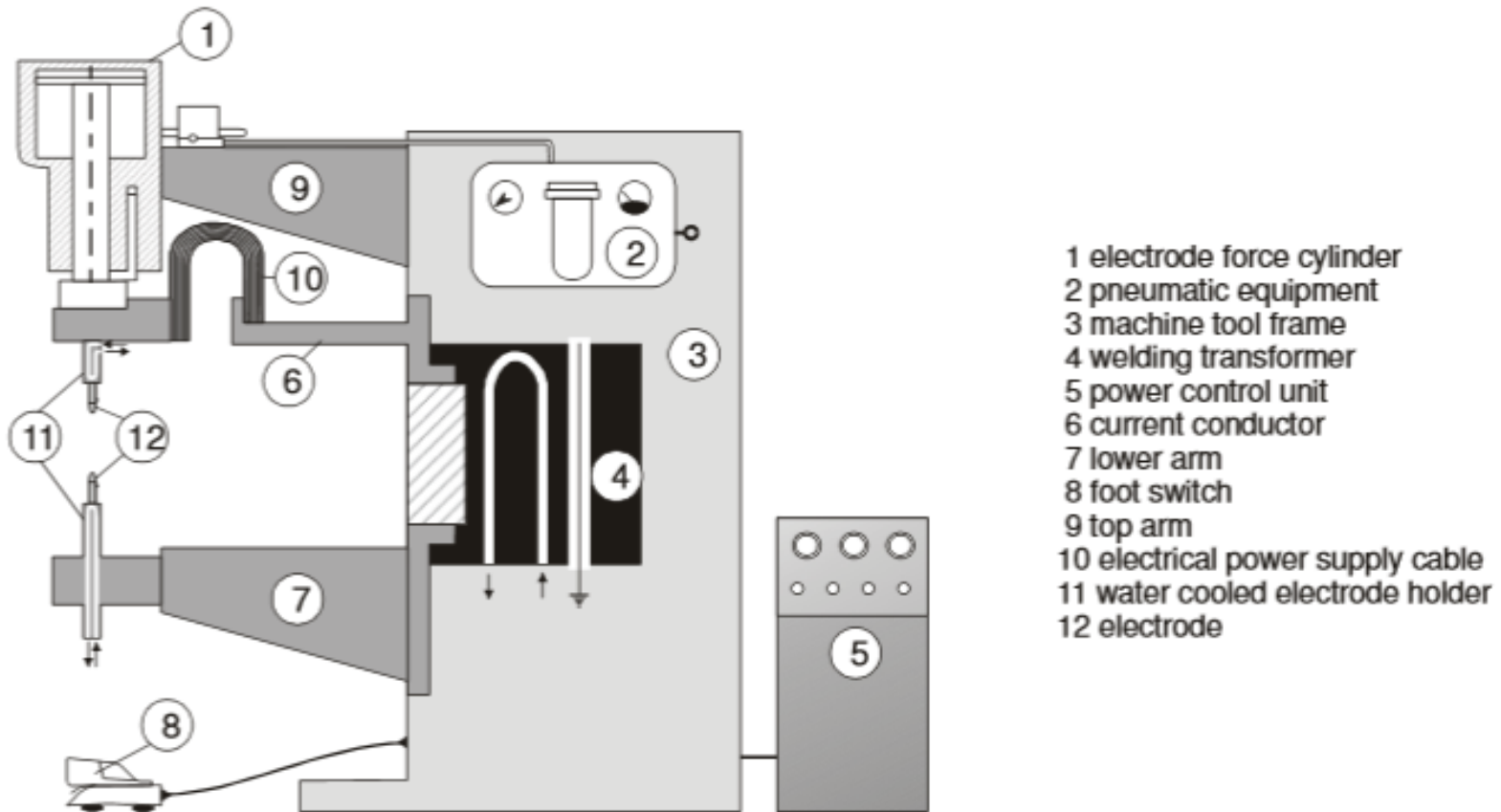
<https://www.youtube.com/watch?v=AwL1CAg43PU>

<https://www.youtube.com/watch?v=PcfV9dnMNgY>



## Soldagem por resistência elétrica

- ▶ Equipamento para soldagem por resistência





## Soldagem por resistência elétrica

### ► Vantagens

- Rápida e fácil de ser executada
- Não necessita de gases de proteção e similares
- Não necessita de material de adição
- Não tem chamas, arcos e outras fontes de calor perigosas
- Operador não precisa ser treinado
- Pode ser automatizada
- Alta produtividade (200 pontos de solda / 6 seg. na indústria automobilística)
- Versatilidade de materiais
- Soldagem de chapas finas
- Soldagem de múltiplas chapas em uma única operação



## Soldagem por resistência elétrica

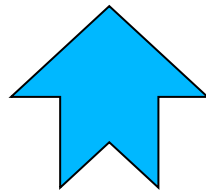
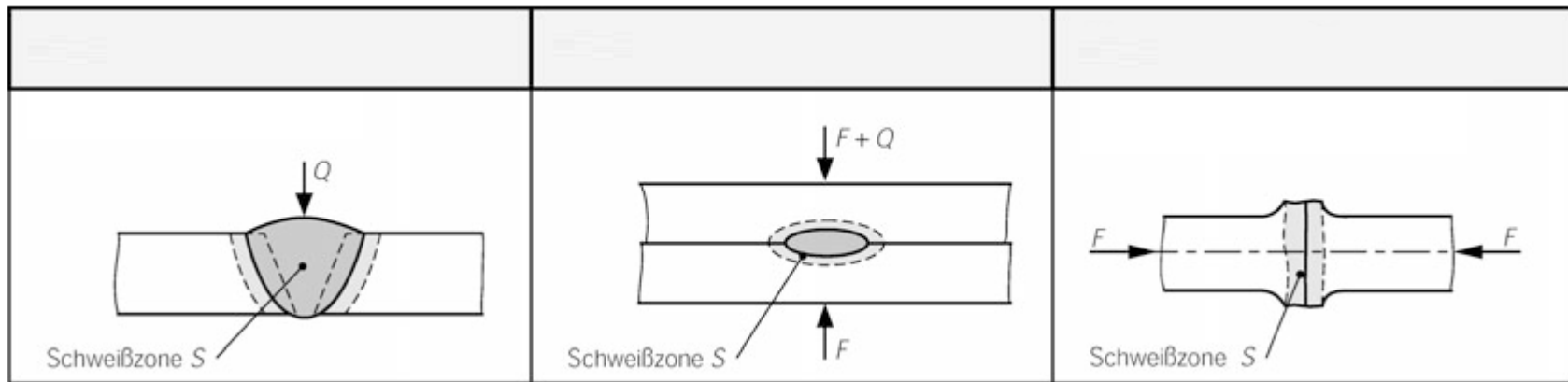
### ► Desvantagens

- Cria pontos de soldagem e não juntas contínuas
- Os pontos de soldagem tem menor resistência do que os obtidos em outros processos
- Resistencia da solda depende da temperatura, da pressão aplicadas, da limpeza das superfícies, da forma e tamanho dos eletrodos
- Os pontos de soldagem tornam-se concentradores de tensão, gerando problemas de fadiga
- Tem limitações geométricas, acesso por ambos os lados a serem unidos
- Necessidade de cabos longos

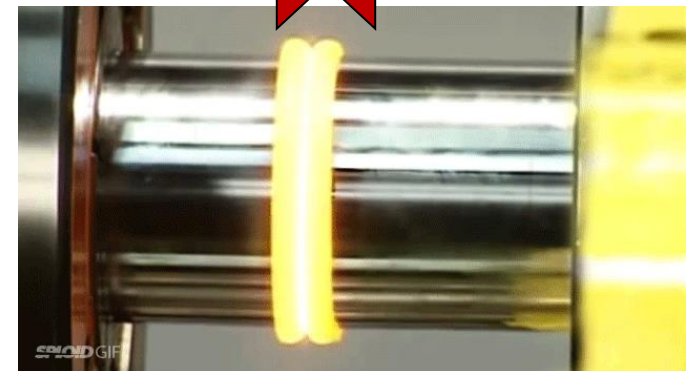
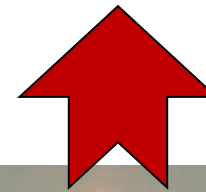
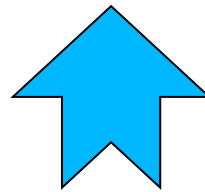


## Soldagem por atrito

- ▶ Soldagem por atrito ou *friction weld* (FW)



- ▶ Soldagem ER,  
AS, TIG, MIG,  
MAG, Plasma,  
FE, Laser







## Soldagem por atrito

- ▶ Soldagem por atrito ou *friction weld* (FW)
- ▶ A soldagem por atrito é um processo de união por estado sólido no qual a união é produzida através da coalescência dos materiais, utilizando calor gerado pelo atrito e a aplicação e pressão externa
- ▶ A qualidade da solda se equivale ao forjamento,
- ▶ Em condições normais não há fusão de material
- ▶ Materiais de adição e gases e insumos de proteção não são necessários



## Soldagem por atrito

- ▶ Vídeo exemplo

<https://www.youtube.com/watch?v=42MUVQNPrXE>



## Soldagem por atrito

- Combinações de materiais soldáveis por atrito

	Zirconium Alloys	Valve Materials (Automotive)	Vanadium	Uranium	Tungsten Carbide Cemented	Tungsten	Titanium Alloys	Titanium	Thorium	Tantalum	Steel - Tool	Steel - Stainless	Steel - Sintered	Steel - Maraging	Steel - Free Machining	Steel - Carbon	Steel - Alloys	Silver	Niobium Alloys	Niobium	Nimonic	Nickel Alloys	Nickel	Monel	Molybdenum	Magnesium Alloys	Magnesium	Lead	Iron Sintered	Copper Nickel	Copper	Columbium	Cobalt	Ceramic	Cast Iron	Carbides Cemented	Bronze	Brass	Aluminum Alloys	Aluminum				
Aluminum	■																																											
Aluminum Alloys		■																																										
Brass																																												
Bronze																																												
Carbides Cemented																																												
Cast Iron																																												
Ceramic																																												
Cobalt																																												
Columbium																																												
Copper																																												
Copper Nickel																																												
Iron Sintered																																												
Lead																																												
Magnesium																																												
Magnesium Alloys																																												
Molybdenum																																												
Monel																																												
Nickel																																												
Nickel Alloys																																												
Nimonic																																												
Niobium																																												
Niobium Alloys																																												
Silver																																												
Silver Alloys																																												
Steel - Alloys																																												
Steel - Carbon																																												
Steel - Free Machining																																												
Steel - Maraging																																												
Steel - Sintered																																												
Steel - Stainless																																												
Steel - Tool																																												
Tantalum																																												
Thorium																																												
Titanium																																												
Titanium Alloys																																												
Tungsten																																												
Tungsten Carbide Cemented																																												
Uranium																																												
Vanadium																																												
Valve Materials (Automotive)																																												
Zirconium Alloys																																												



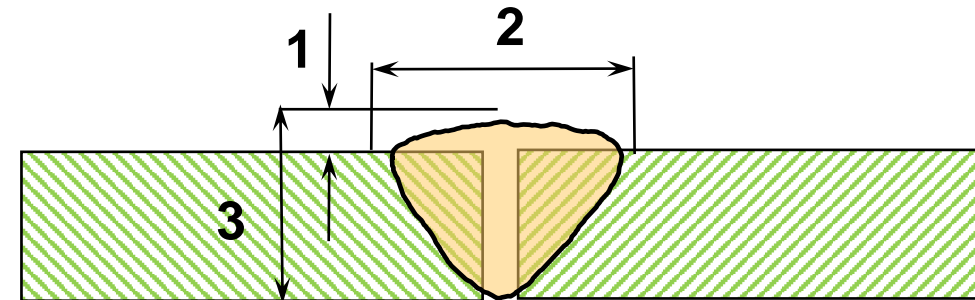
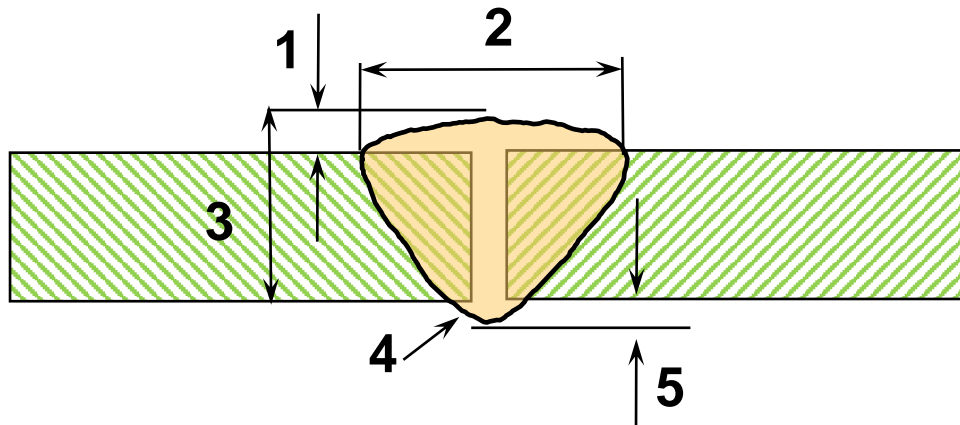
## Projeto de juntas soldadas

- ▶ Projeto de juntas soldadas se refere a forma como as peças a serem soldadas são posicionadas e alinhadas entre si de forma a garantir a máxima resistência, penetração, menor consumo de material e custo.



## Projeto de juntas soldadas

### ► Denominações da juntas soldadas

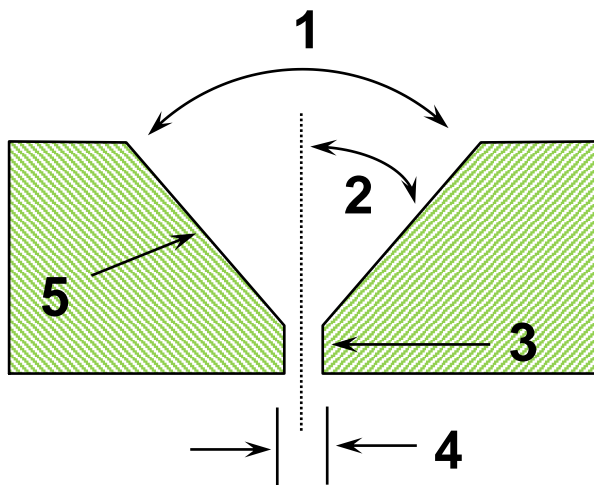


- 1 - Reforço da solda
- 2 - Largura do cordão
- 3 - Penetração
- 4 - Raiz
- 5 - Reforço da raiz

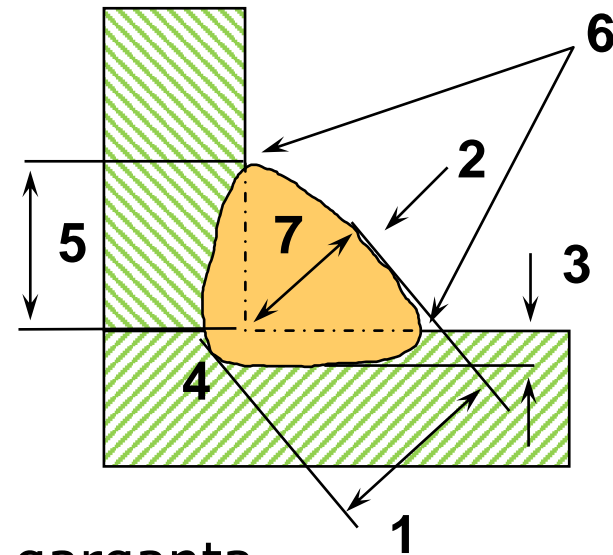


## Projeto de juntas soldadas

### ► Denominações da juntas soldadas



- 1 - ângulo do chanfro
- 2 - ângulo da face
- 3 - largura da face da raiz
- 4 - folga da raiz
- 5 - face do chanfro

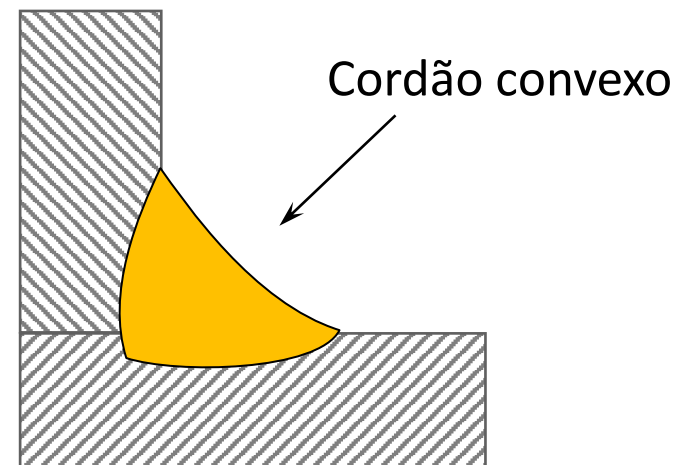
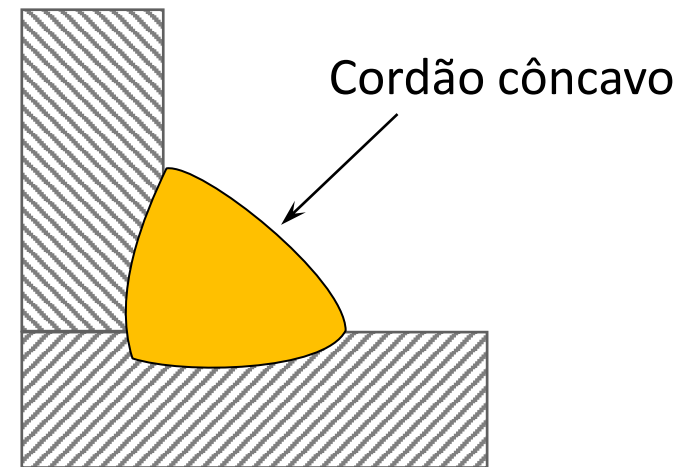
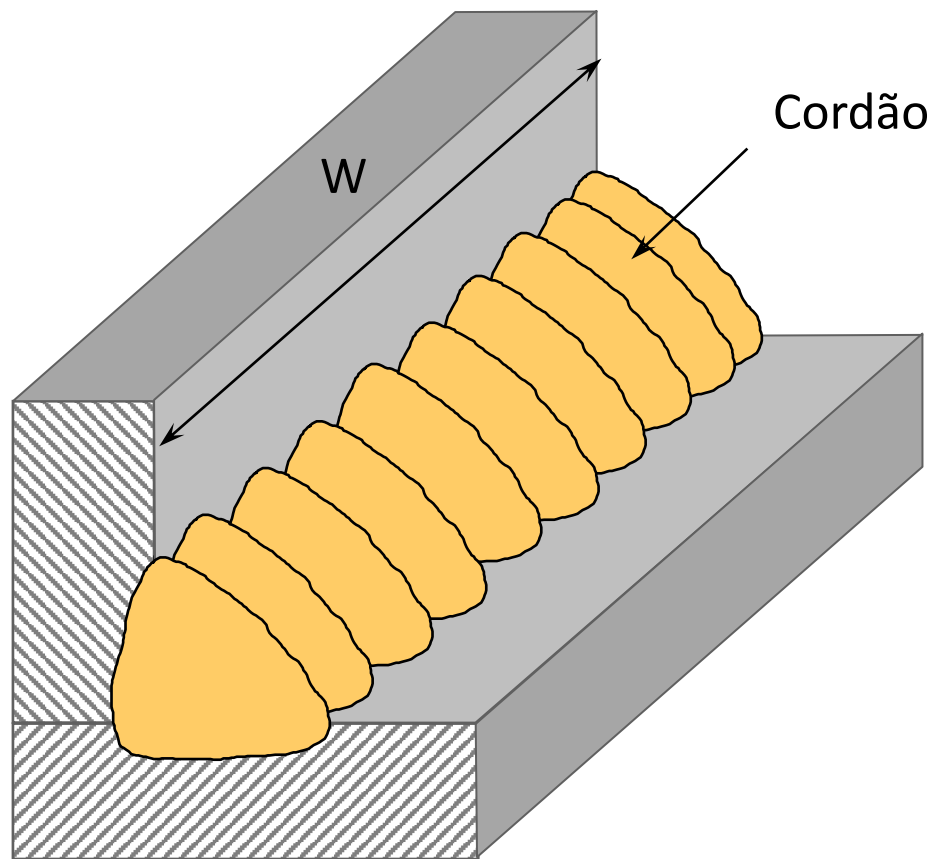


- 1 - garganta
- 2 - face do cordão de solda
- 3 - profundidade de fusão
- 4 - raiz
- 5 - perna
- 6 - largura da solda
- 7 - garganta teórica



## Projeto de juntas soldadas

► Denominações da juntas soldadas

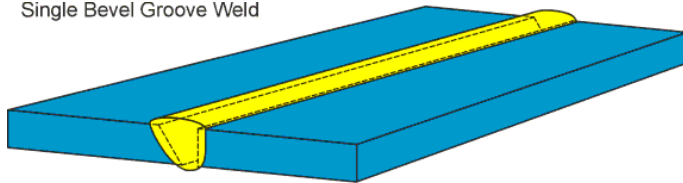




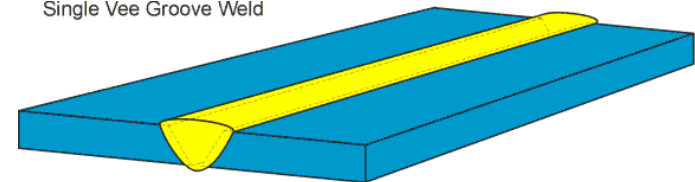
## Projeto de juntas soldadas

### ► Preparação das juntas soldadas

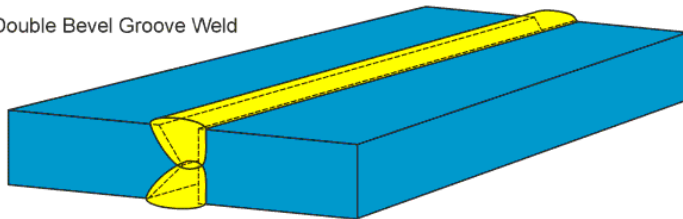
Single Bevel Groove Weld



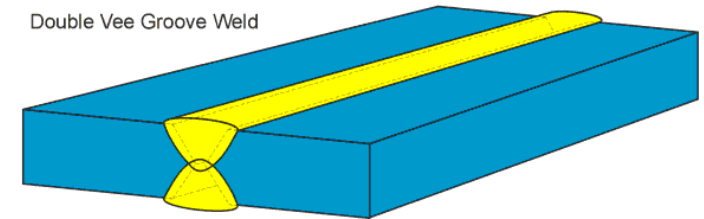
Single Vee Groove Weld



Double Bevel Groove Weld



Double Vee Groove Weld



### ► Chanfrada / plana



### ► Chanfrada em V



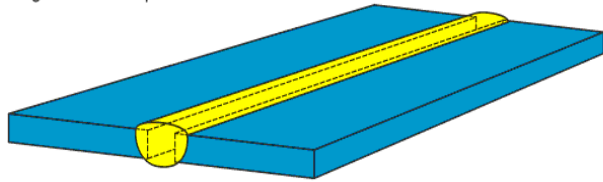




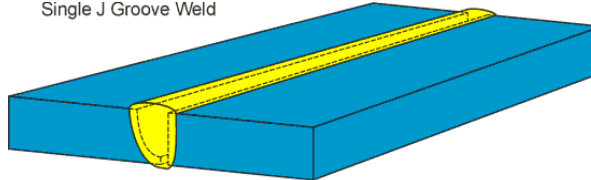
## Projeto de juntas soldadas

### ► Preparação das juntas soldadas

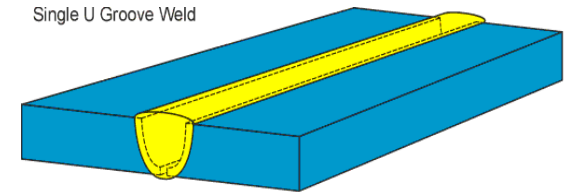
Single Welded Square Groove Weld



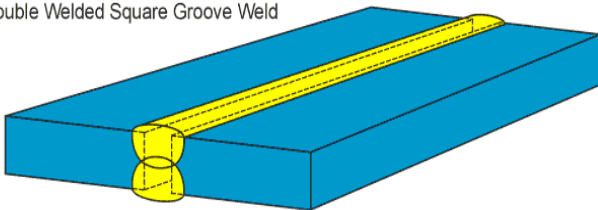
Single J Groove Weld



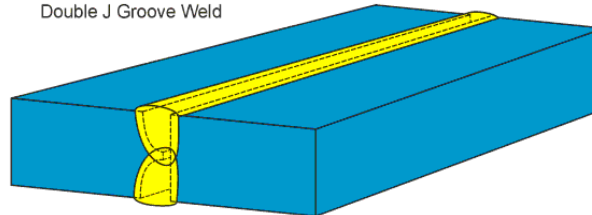
Single U Groove Weld



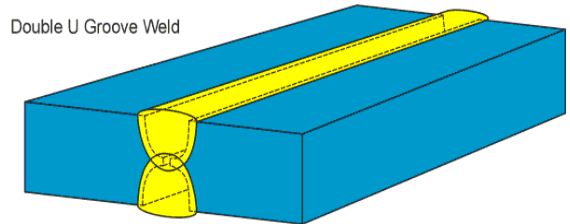
Double Welded Square Groove Weld



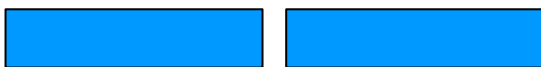
Double J Groove Weld



Double U Groove Weld



► face



► J



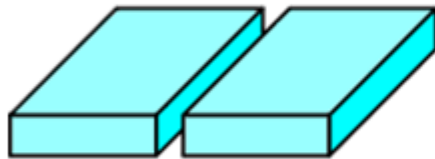
► U



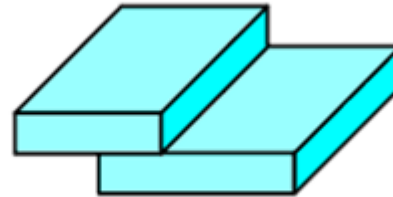


## Projeto de juntas soldadas

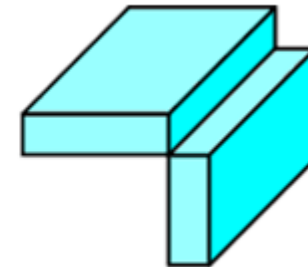
► Principais tipos de juntas soldadas



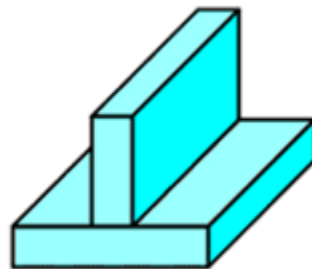
Face ou topo



Sobrepostas



em ângulo



em T

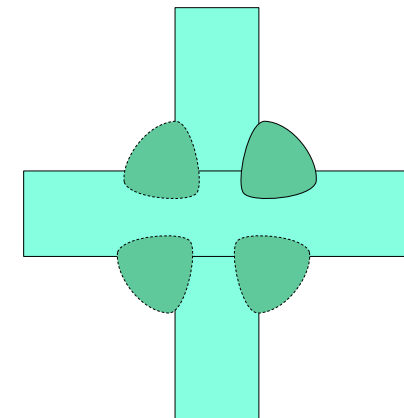
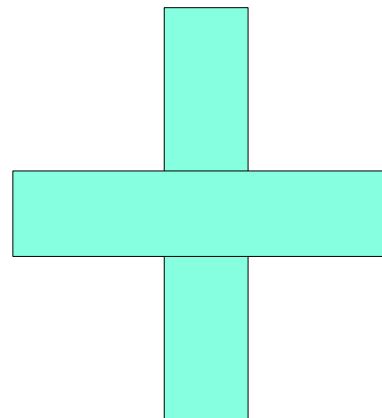
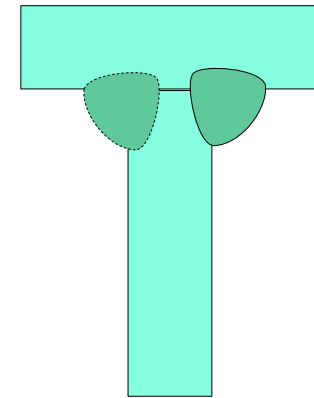
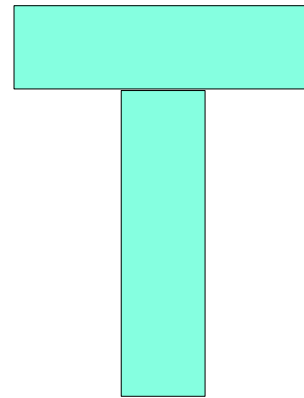
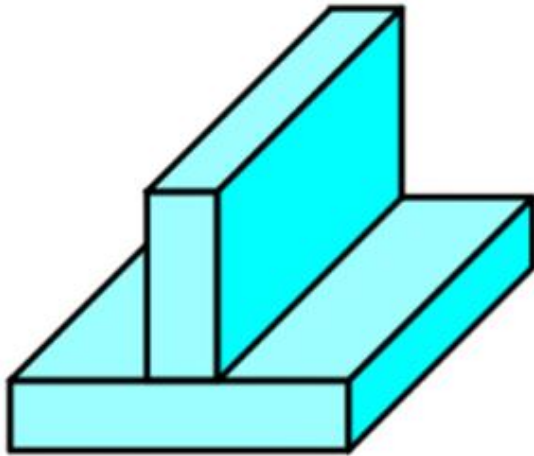


de face em ângulo



## Projeto de juntas soldadas

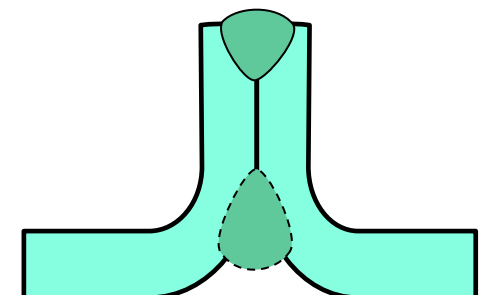
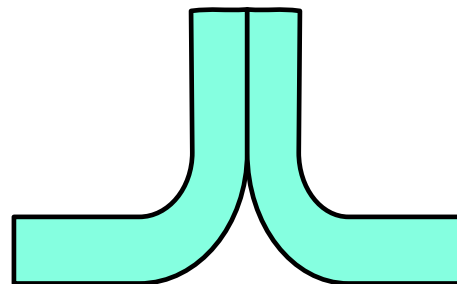
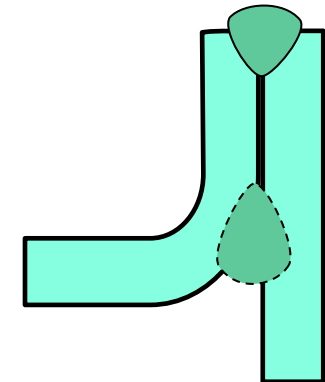
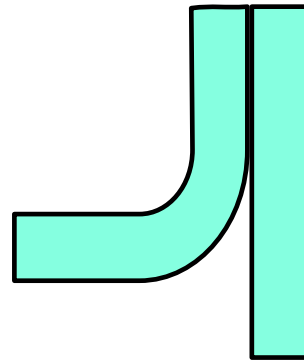
► Juntas em T





## Projeto de juntas soldadas

- ▶ Juntas de face em ângulo





## Projeto de juntas soldadas

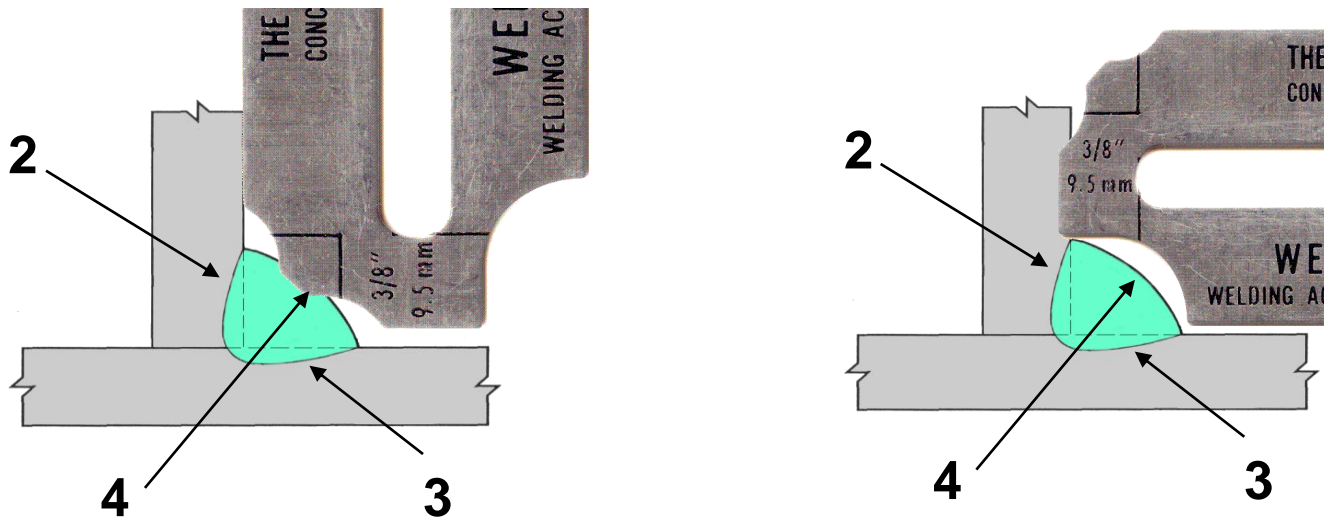
- ▶ Avaliação da junta soldada





## Projeto de juntas soldadas

### ► Avaliação da junta soldada



1. Selecionar o padrão adequado
2. Medir a altura da perna 1
3. Medir a altura da perna 2
4. Verificar a dimensão do pescoço



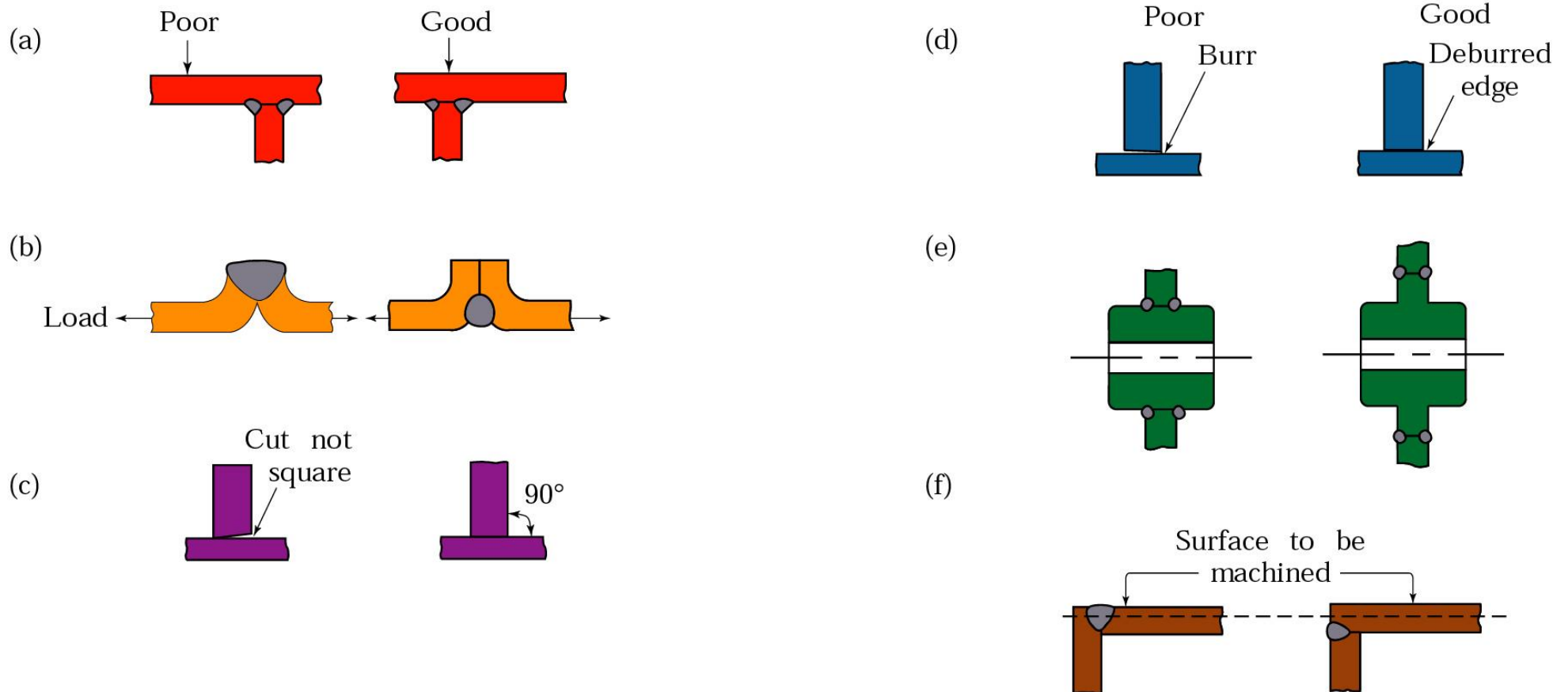
## Projeto de juntas soldadas

- ▶ Considerações para seleção do tipo de juntas soldadas
  - Acessibilidade a junta
  - Resistência requerida
  - Tipo de carregamento – estático ou dinâmico
  - Espessura da chapa metálica
  - Processo de soldagem a ser empregado
  - Material
  - Requisitos de
  - Custo



## Projeto de juntas soldadas

### ► Recomendações de projeto







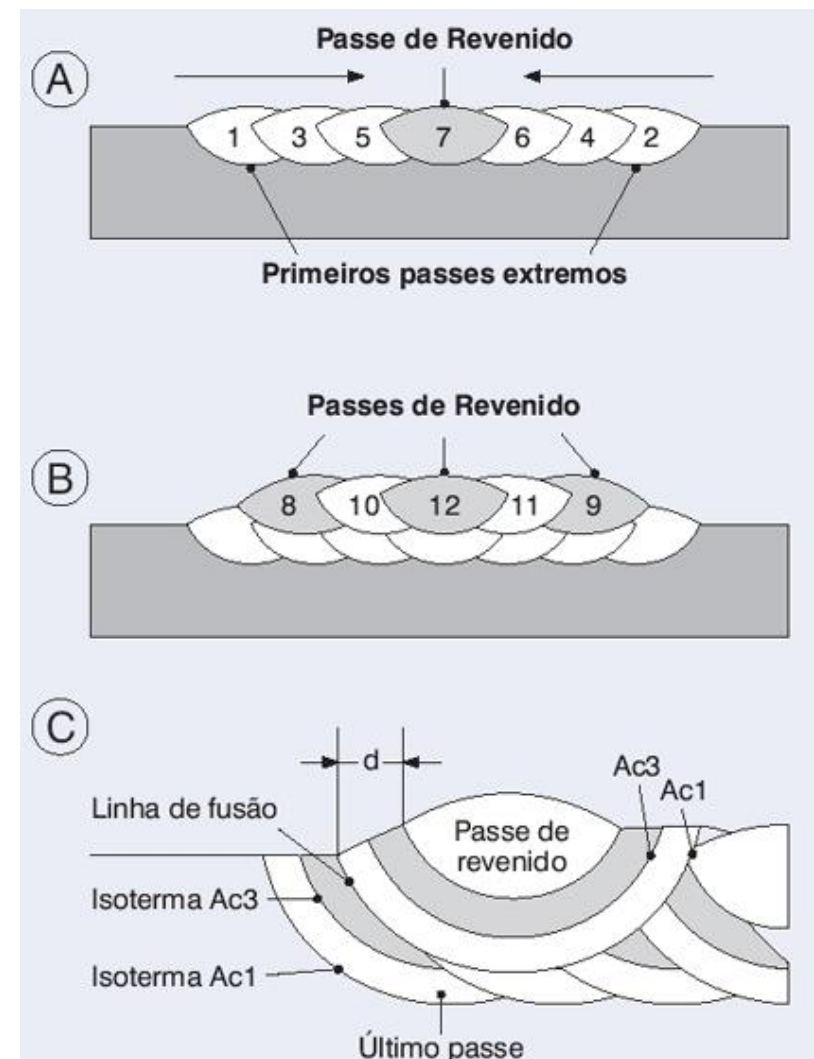
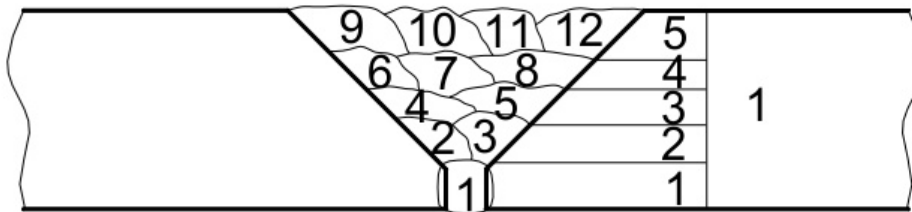
## Projeto de juntas soldadas

- Composição e preenchimento do cordão de solda

1 Cordão de solda

5 Camadas

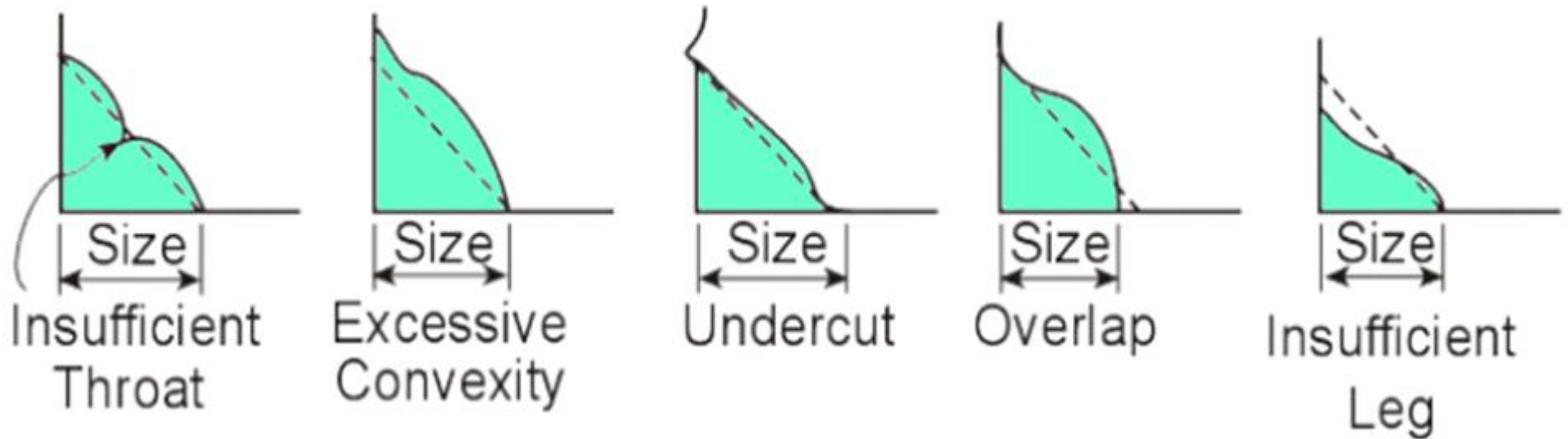
12 Passes





## Defeitos de juntas soldadas

► Principais defeitos





## Defeitos de juntas soldadas

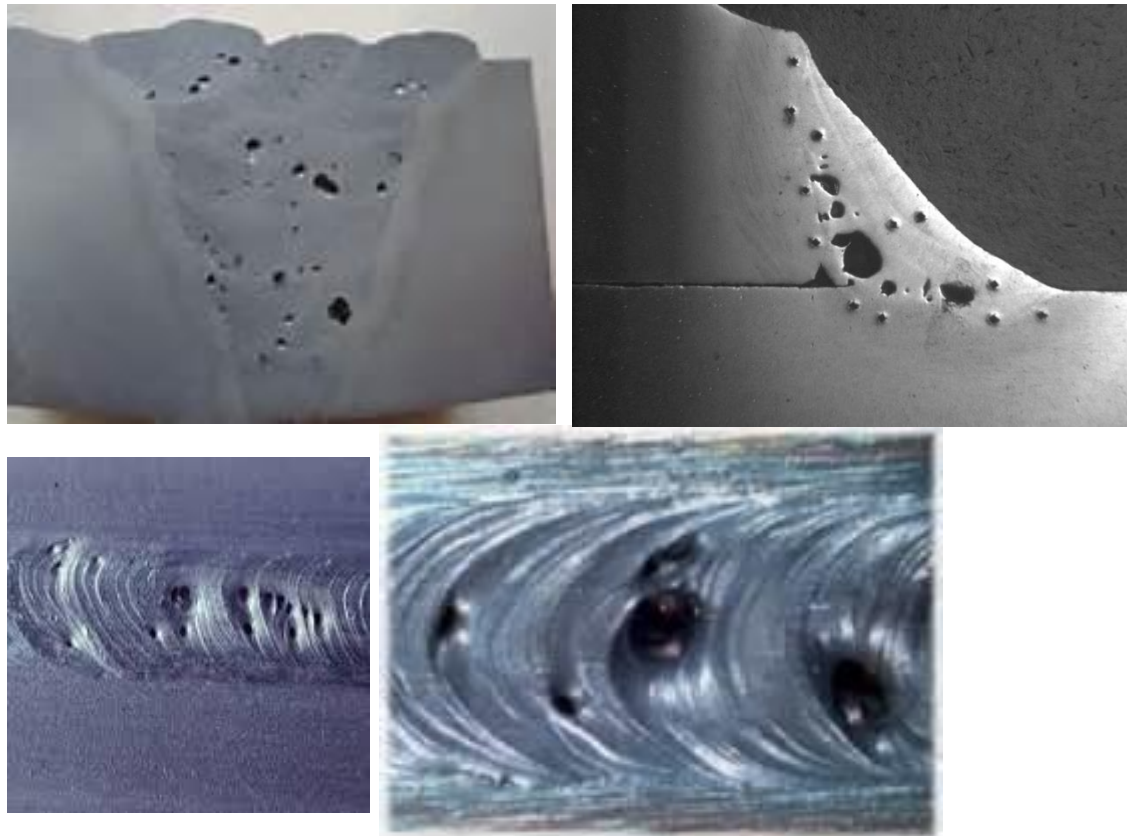
- ▶ Falta de penetração – é o defeito mais comum na soldagem
- ▶ Causas: arco muito curto, parâmetros inadequados, velocidade errada





## Defeitos de juntas soldadas

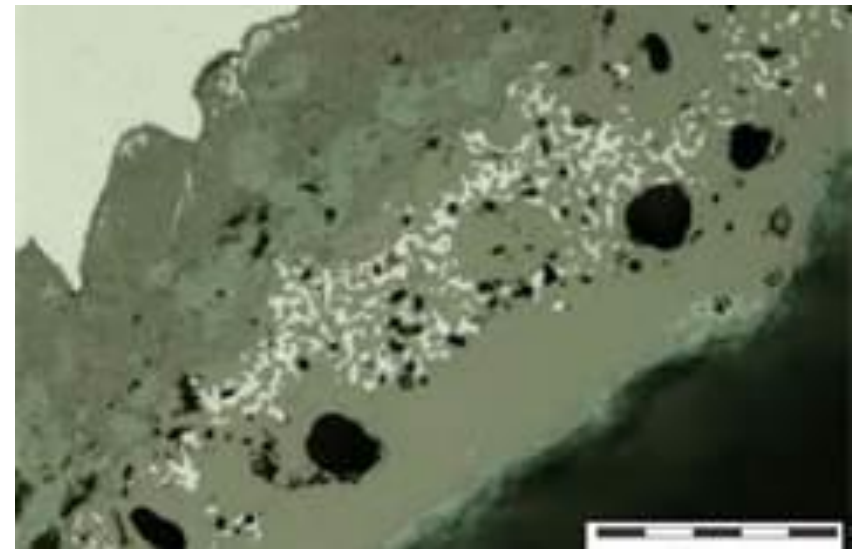
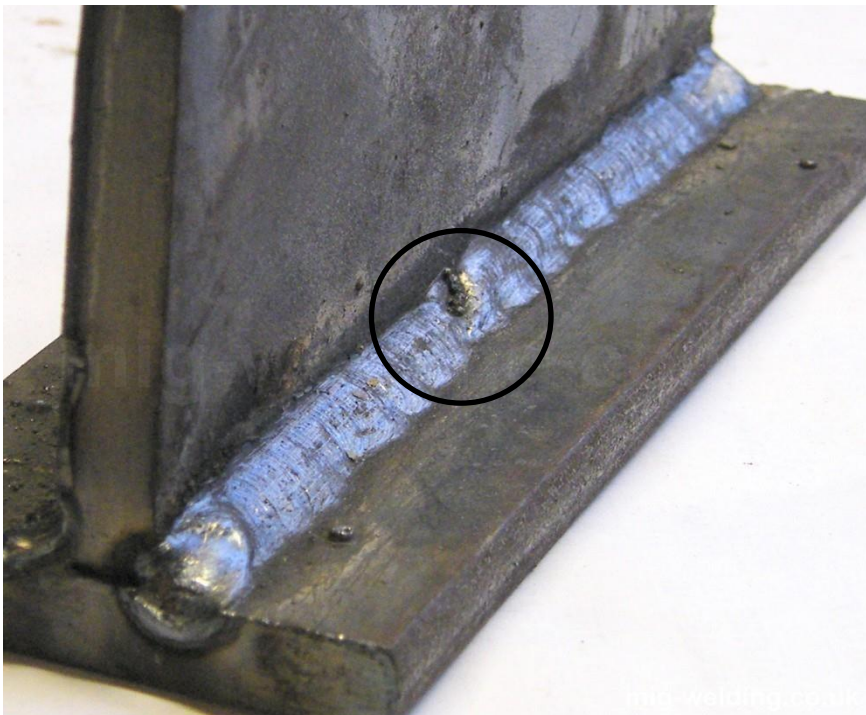
- ▶ Porosidade
- ▶ Causas: falha ou falta de gás de proteção, eletrodo milhado (caso for ER), contaminação da junta (ex. graxas)





## Defeitos de juntas soldadas

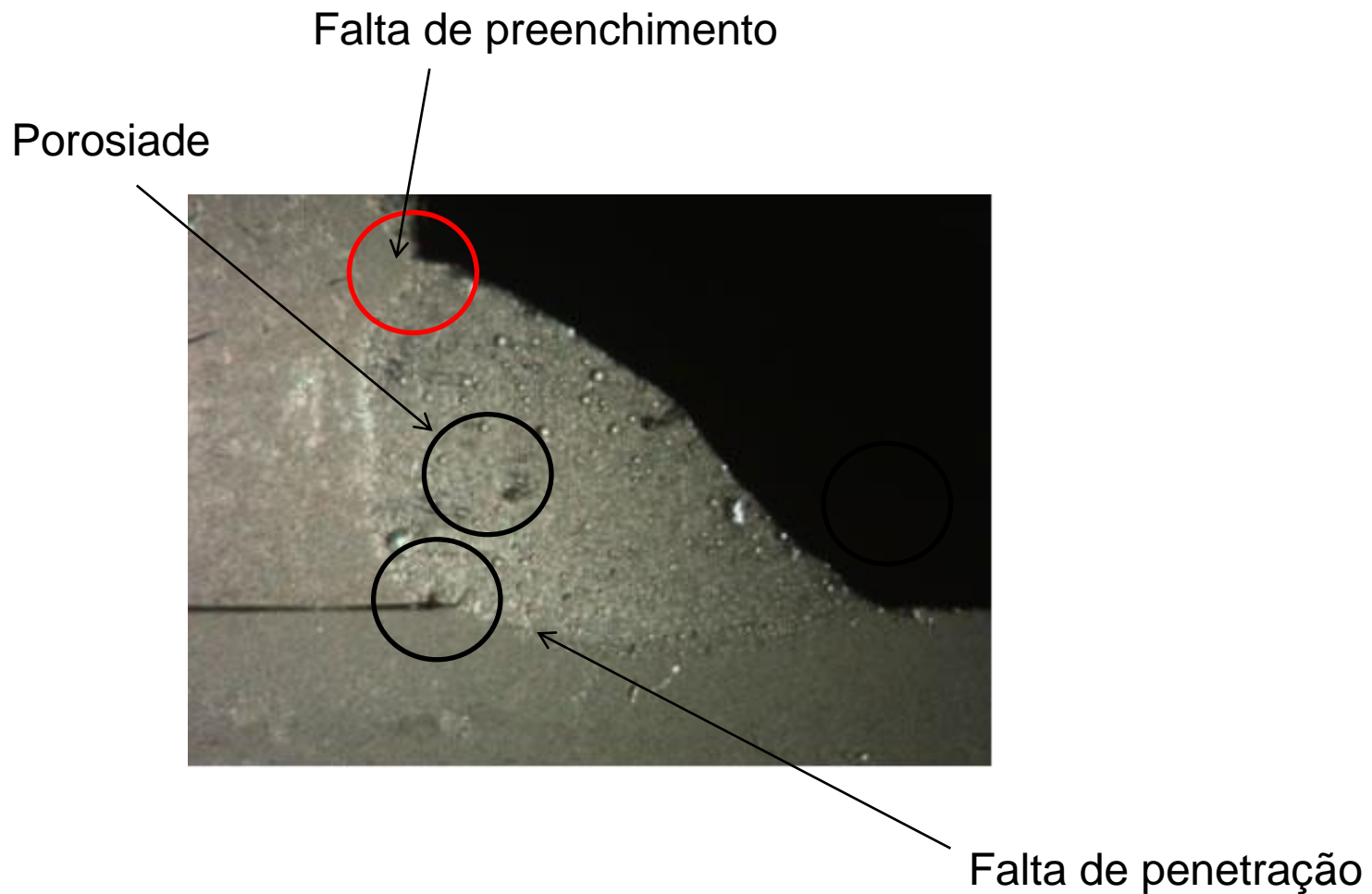
- ▶ Inclusão de escória
- ▶ Causas: limpeza incompleta





## Defeitos de juntas soldadas

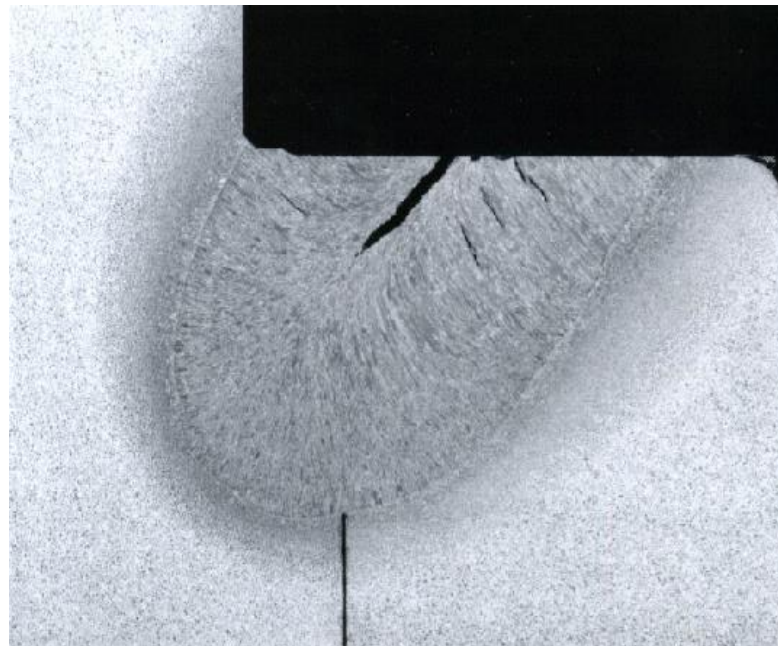
### ► Falta de penetração





## Defeitos de juntas soldadas

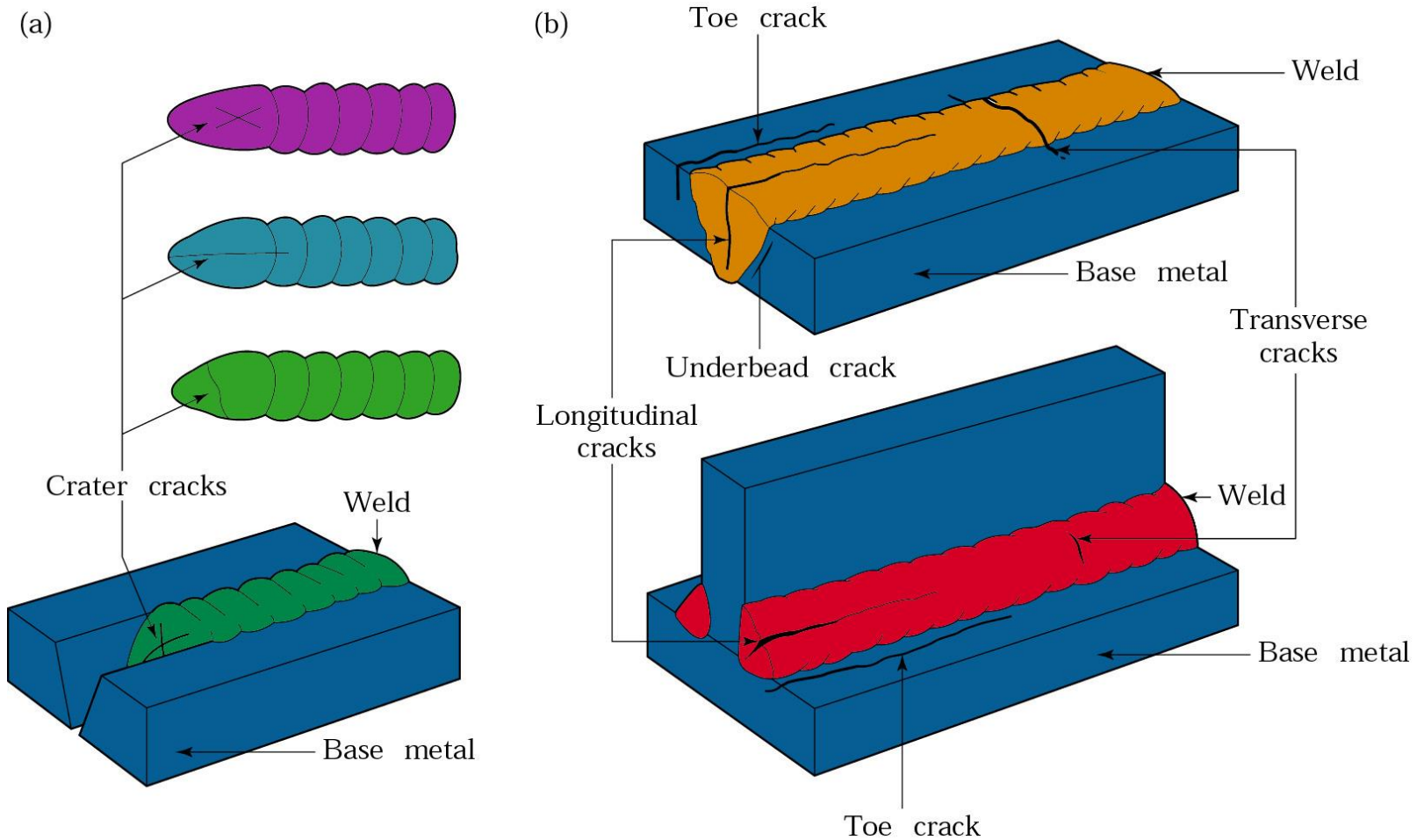
- ▶ Trincas
- ▶ Causas: solidificação muito rápida, contaminação por S e P, metal tem baixa resistência a alta temperatura, junta inadequada ou não preparada adequadamente





## Defeitos de juntas soldadas

### ► Trincas

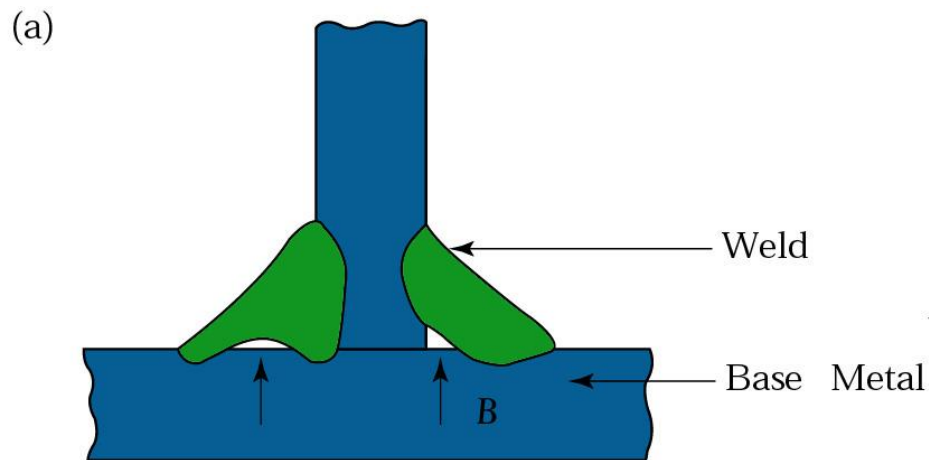




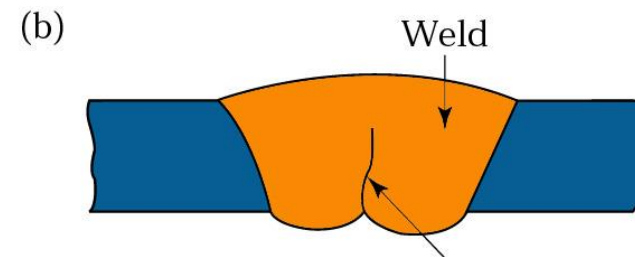


## Defeitos de juntas soldadas

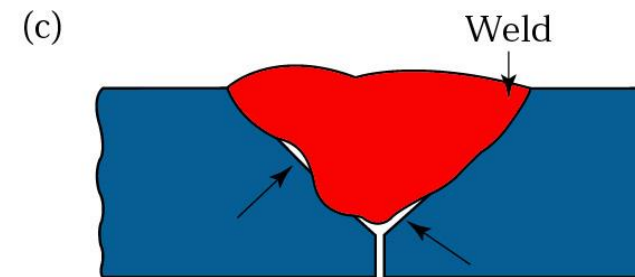
- ▶ Fusão incompleta
- ▶ Causas: parâmetros incorretos de soldagem



Incomplete fusion in fillet welds. B is often termed 'bridging'



Incomplete fusion from oxide or dross at the center of a joint, especially in aluminum

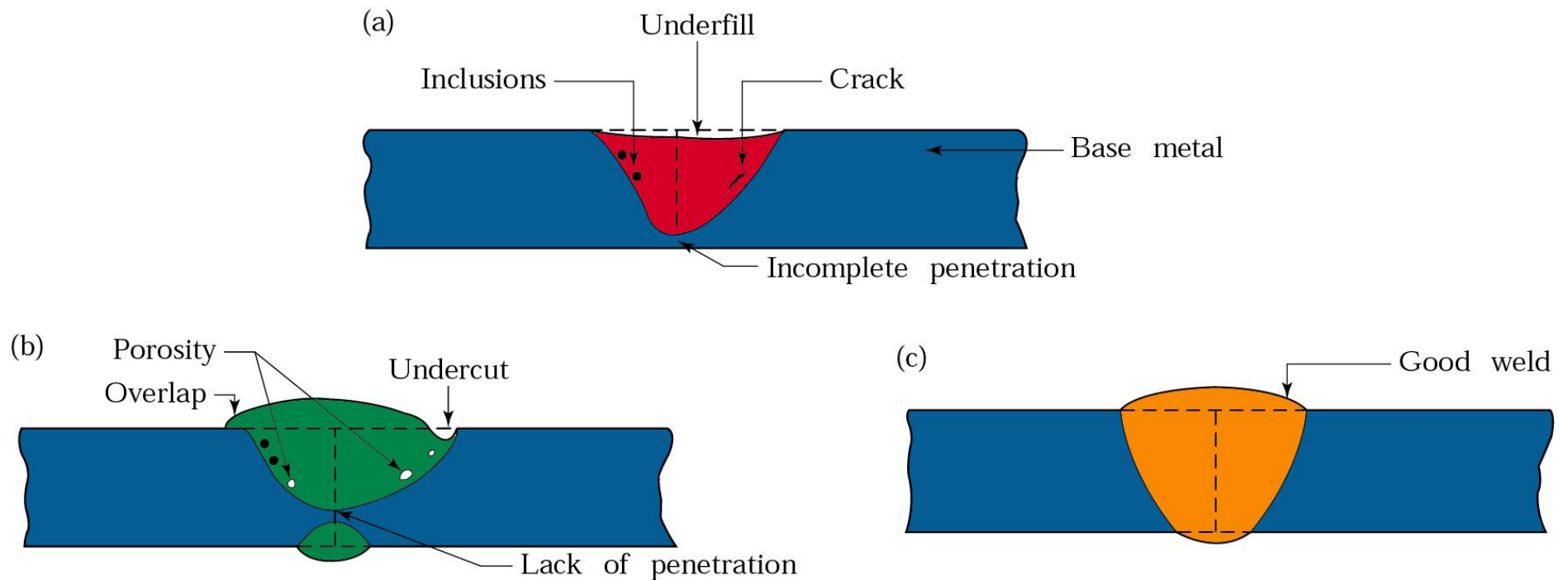


Incomplete fusion in a groove weld



## Defeitos de juntas soldadas

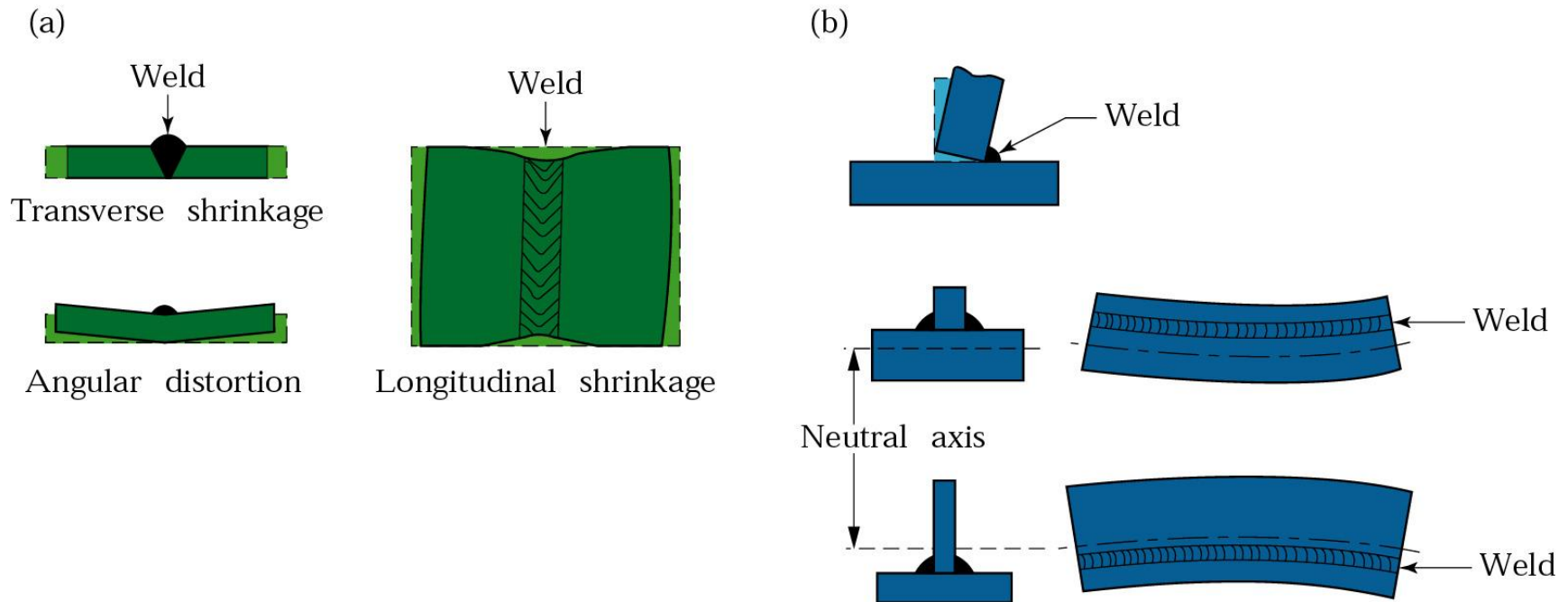
- ▶ Descontinuidades na fusão
- ▶ Causas: parâmetros incorretos





## Defeitos de juntas soldadas

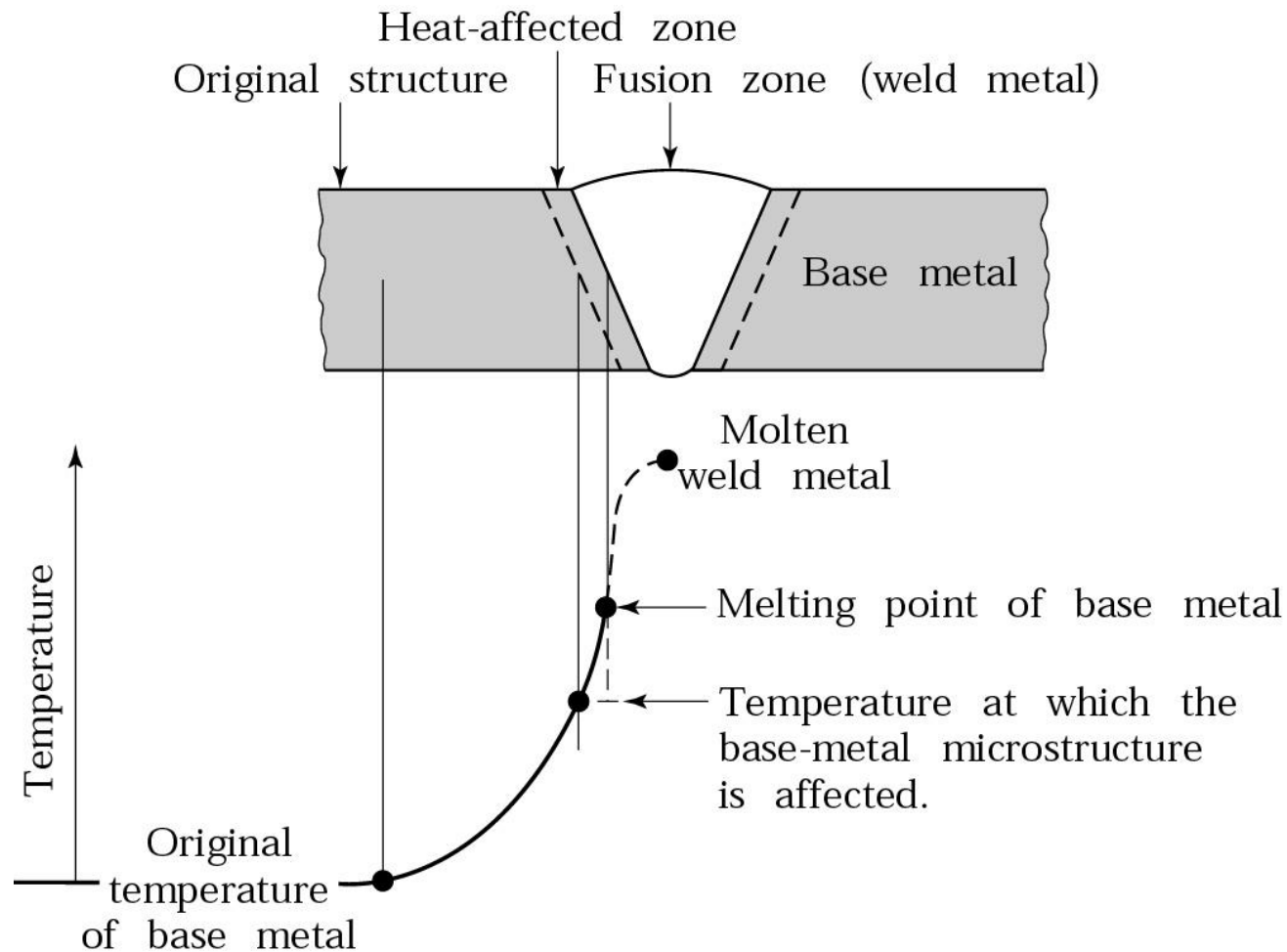
- ▶ Deformação após a soldagem
- ▶ Causas: expansão térmica diferencial entre os componentes soldados e diferentes taxas de resfriamento





## Metalurgia da soldagem

- ▶ Típica zona de fusão na soldagem oxiacetileno e a arco elétrico

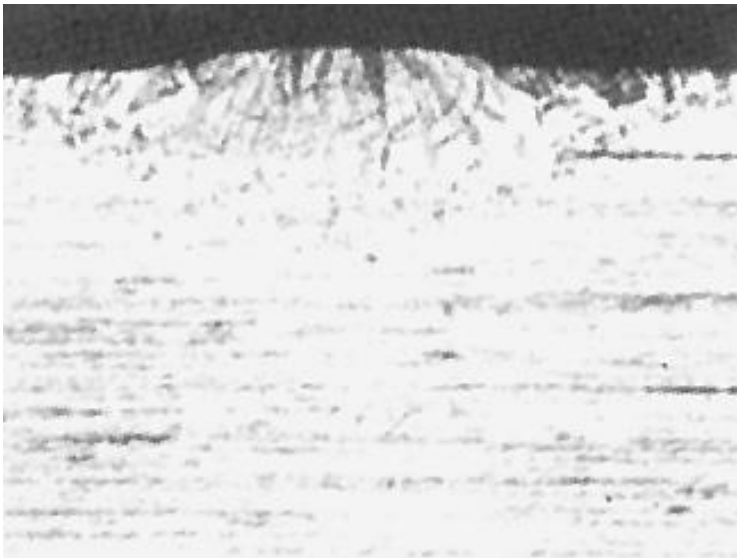




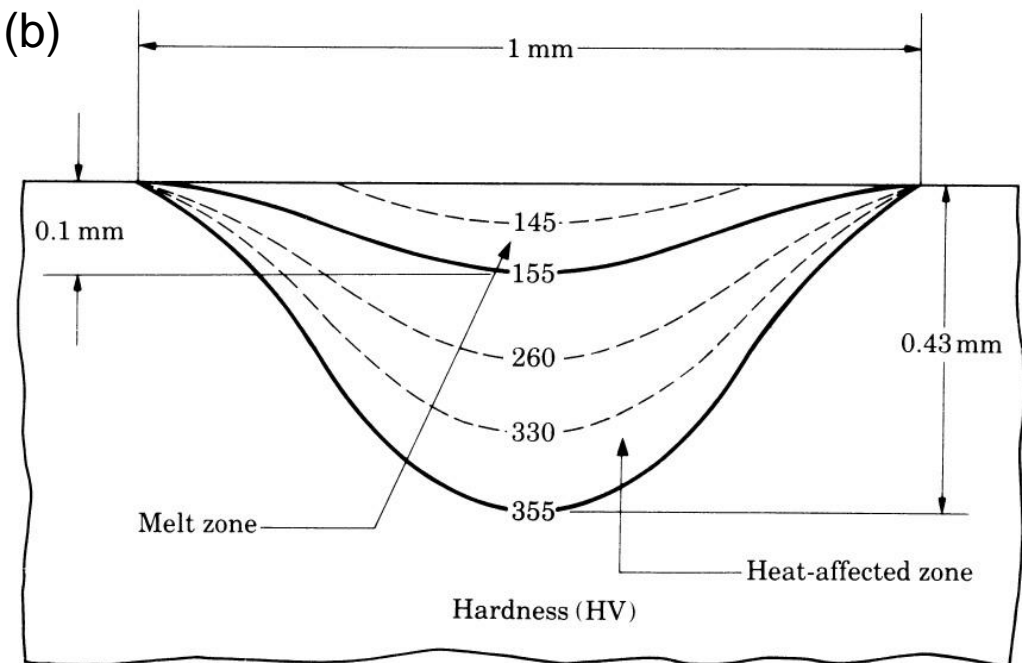
## Metalurgia da soldagem

- ▶ Variação da micro dureza: material níquel laminado a frio soldado com Laser

(a)



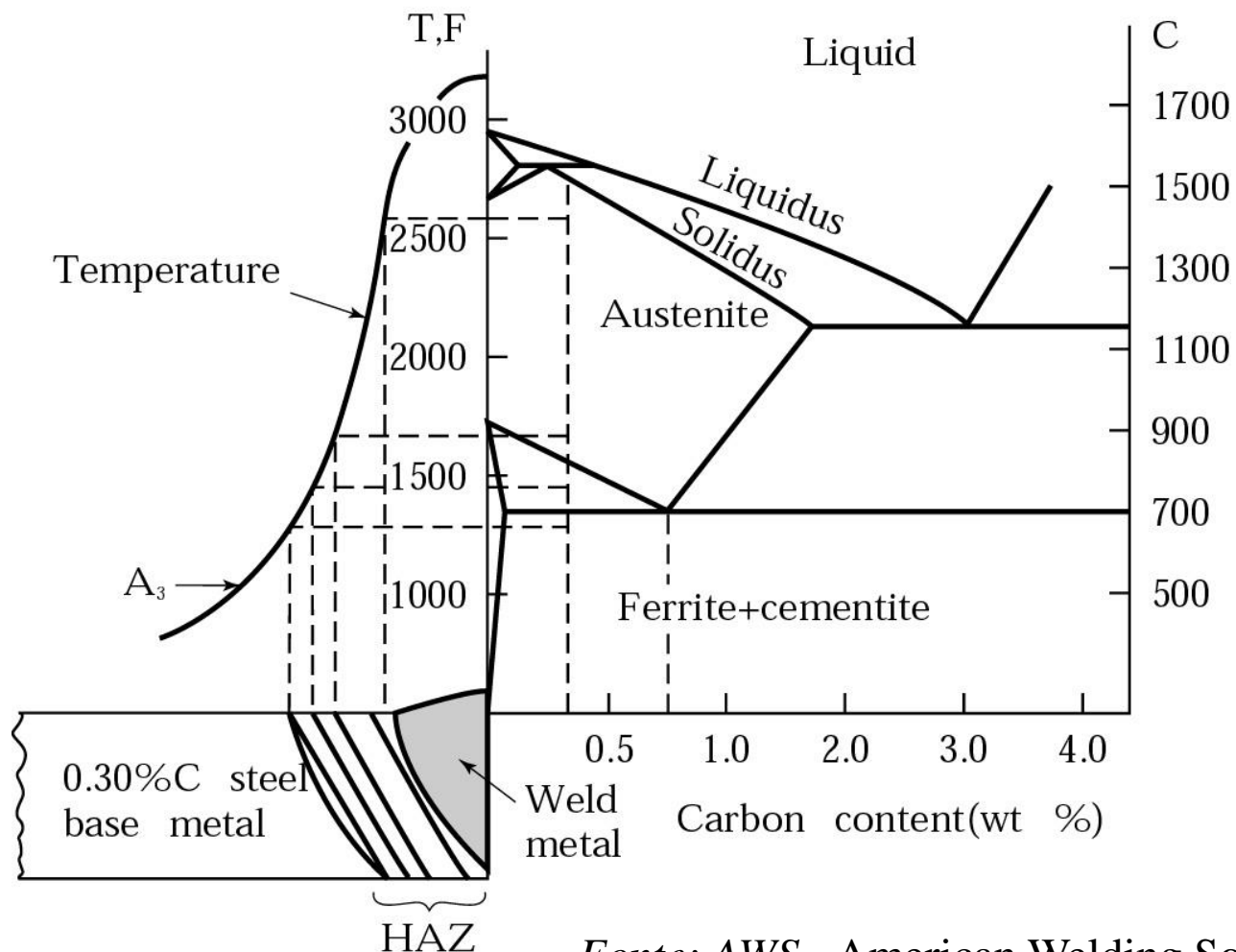
(b)





## Metalurgia da soldagem

- ▶ Zona de refusão na junta soldada e ZTA

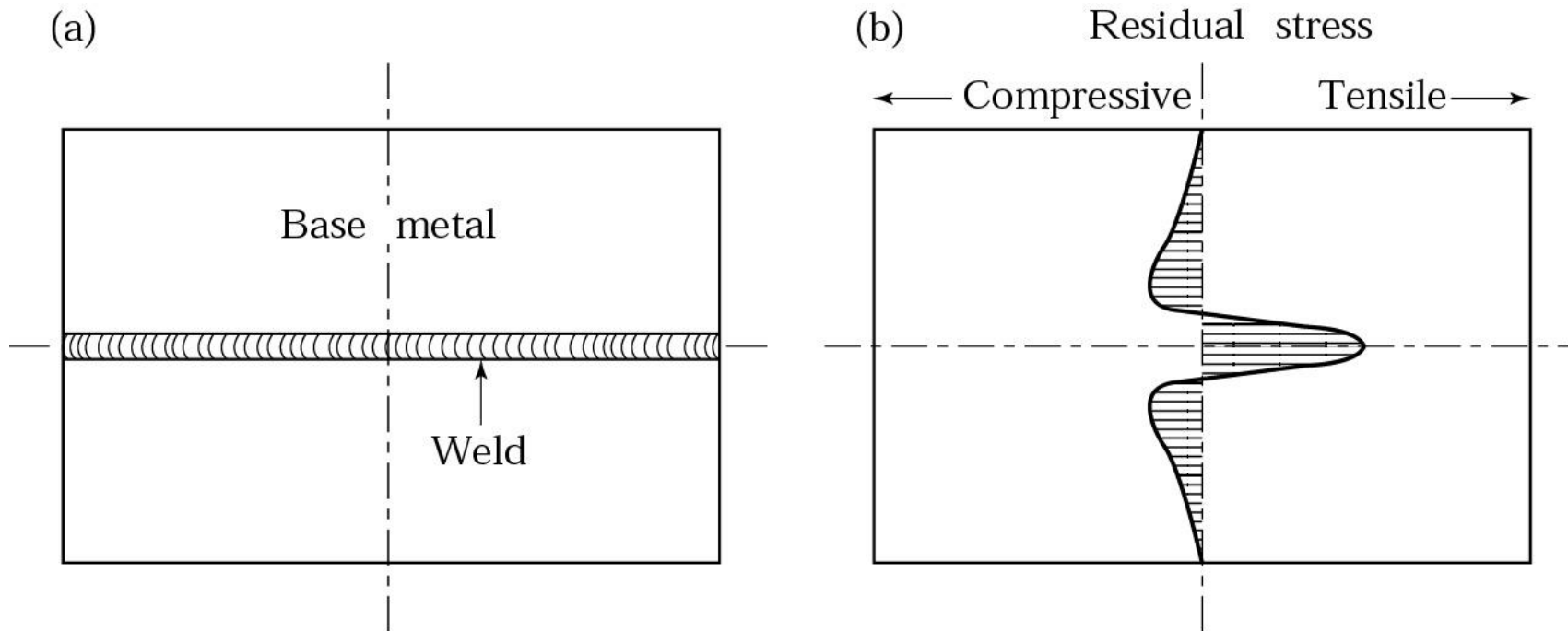


Fonte: AWS - American Welding Society.



## Metalurgia da soldagem

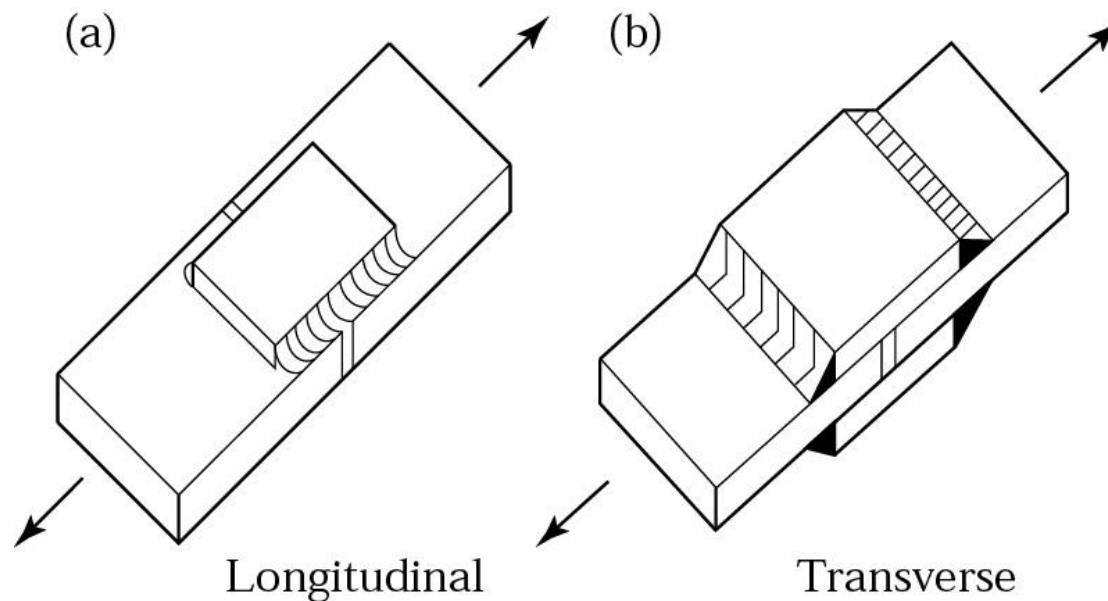
- ▶ Tensão residual desenvolvida durante a soldagem





## Ensaio em juntas soldadas

- ▶ Ensaio destrutivos
  - ▶ Ensaio trativo

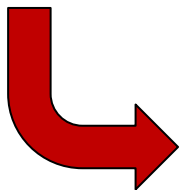
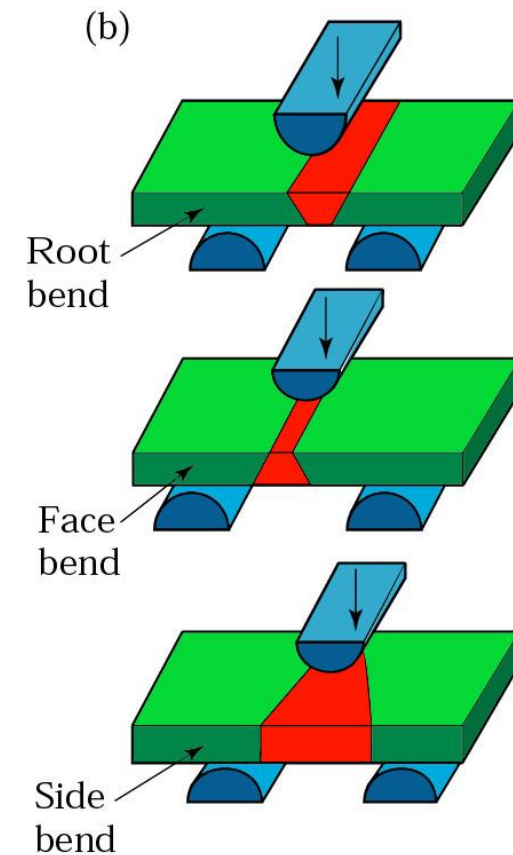
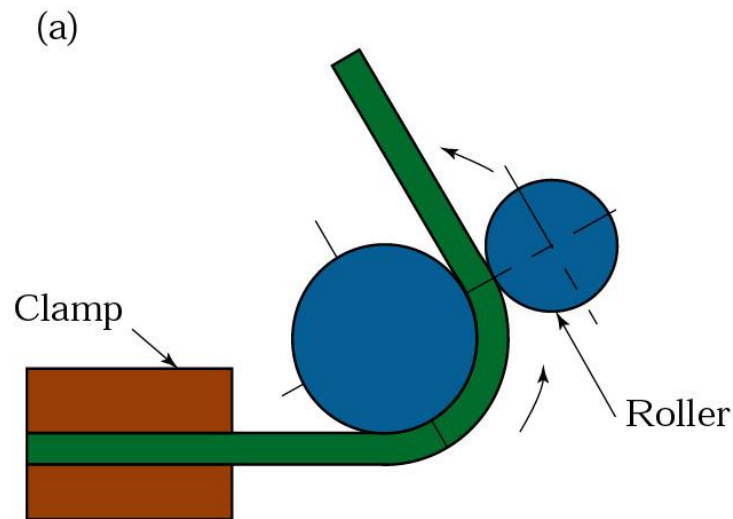






## Ensaio em juntas soldadas

- ▶ Ensaio destrutivos
  - ▶ Ensaio de dobramento

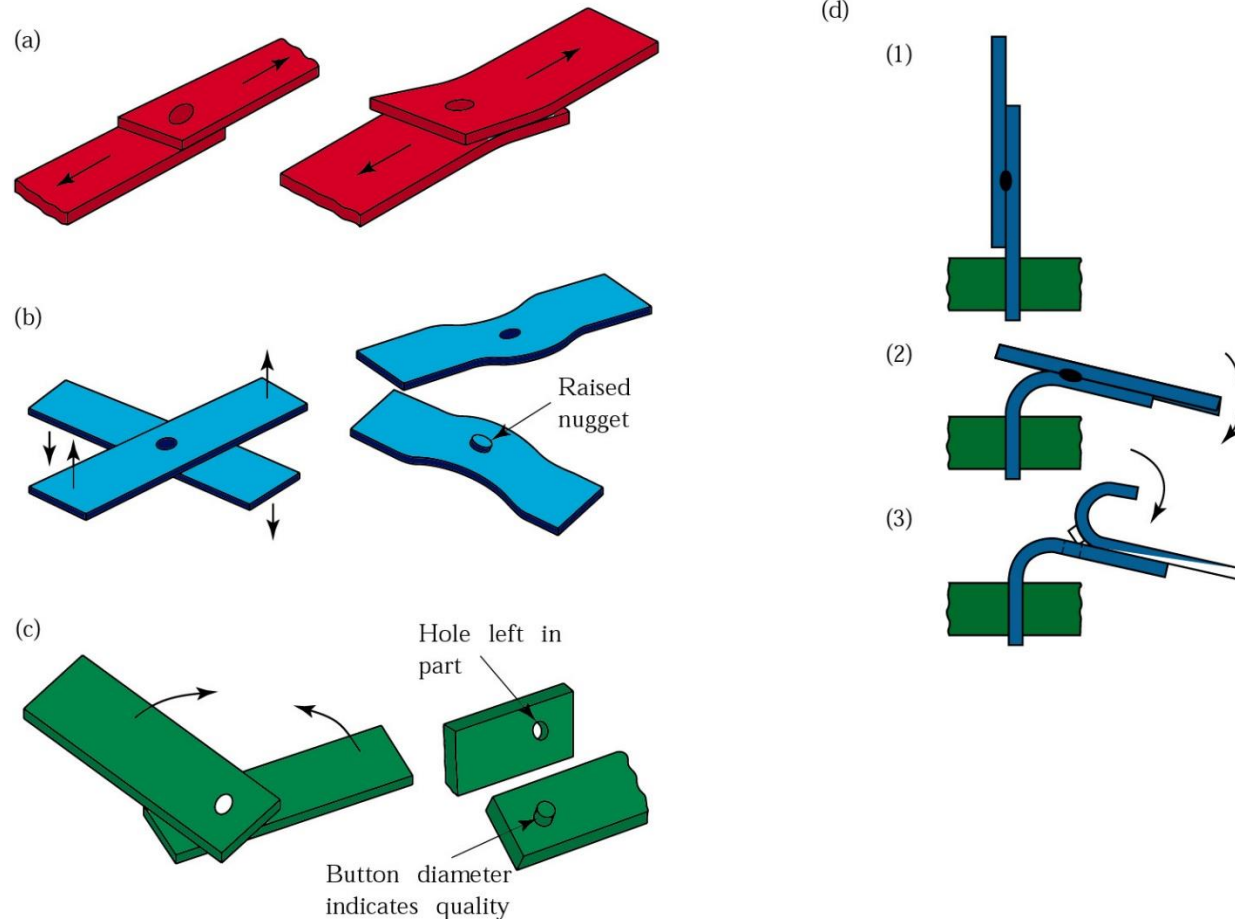


<https://www.youtube.com/watch?v=7tr4kVtNsrM>



## Ensaio em juntas soldadas

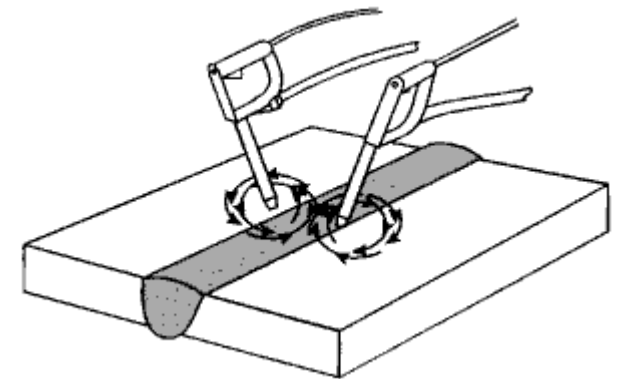
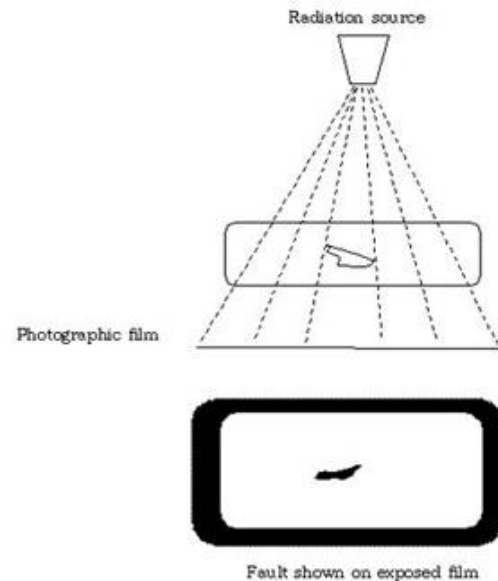
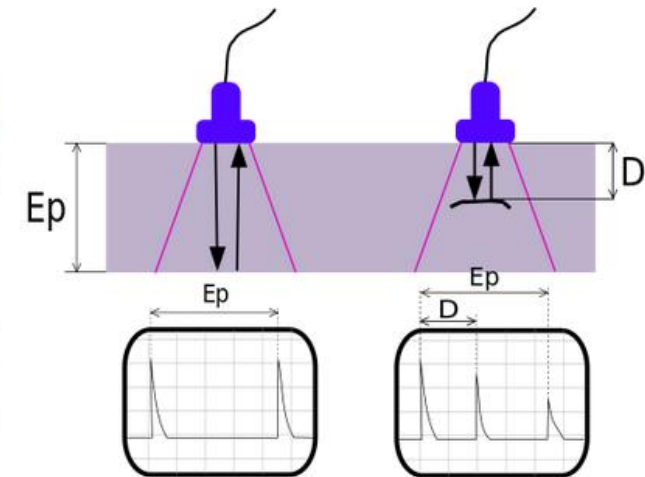
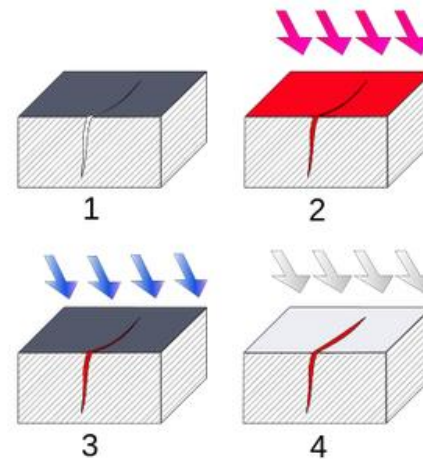
### ► Ensaio de solda ponto





## Ensaaios em juntas soldadas

- ▶ Ensaaios Não destrutivos
  - ▶ Líquido penetrante
  - ▶ Fluxo magnético
  - ▶ Raios X
  - ▶ Raios Gama
  - ▶ Ultrassom





**- Fim da Aula -**