



# Complementos de Fabricação Mecânica

## PMR 3301

Profa. Izabel Machado

[machadoi@usp.br](mailto:machadoi@usp.br)



# Soldagem

## Soldagem

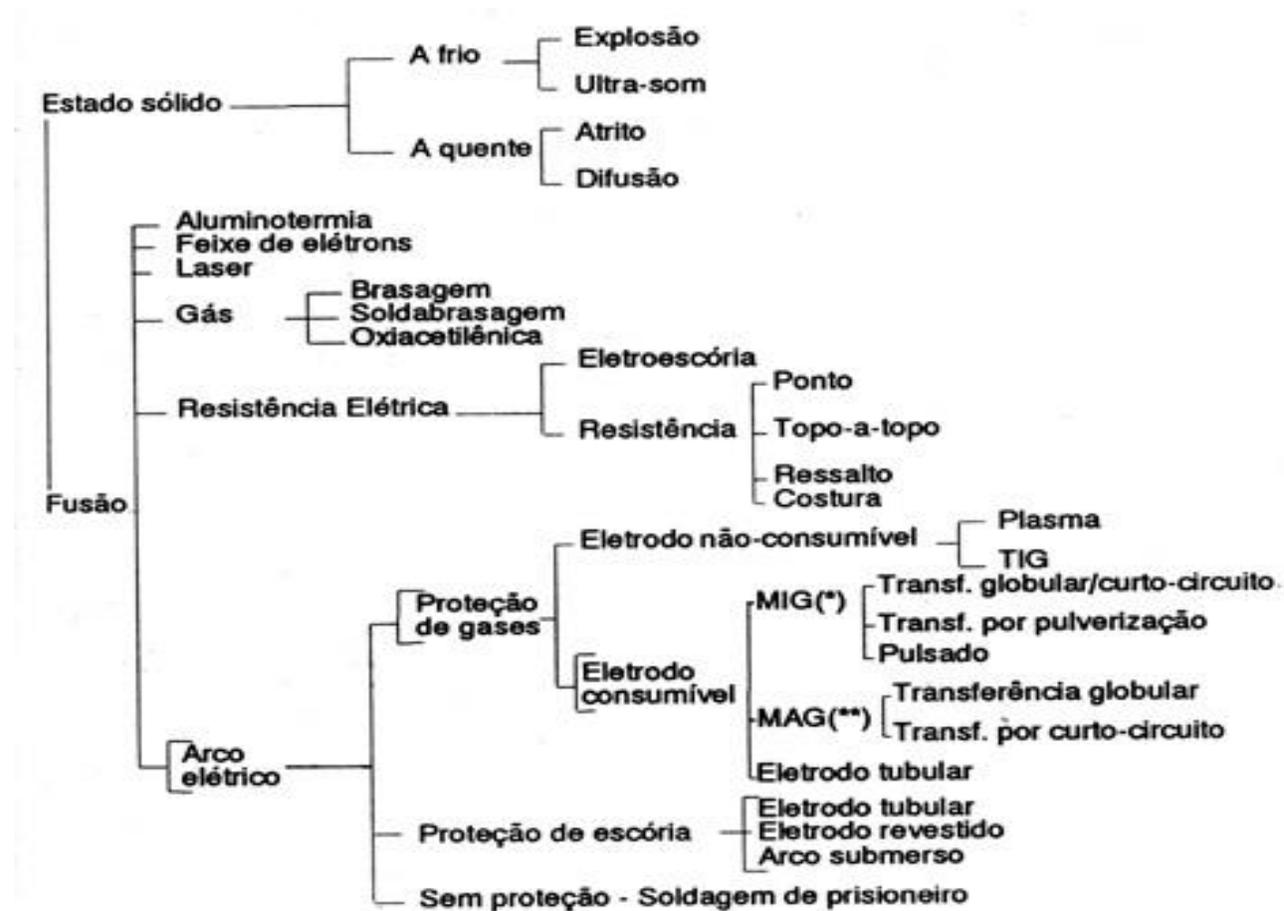
Soldagem é o processo de união de duas partes metálicas utilizando-se uma fonte de calor.

A **solda** é o resultado desse processo.

Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união



## Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união

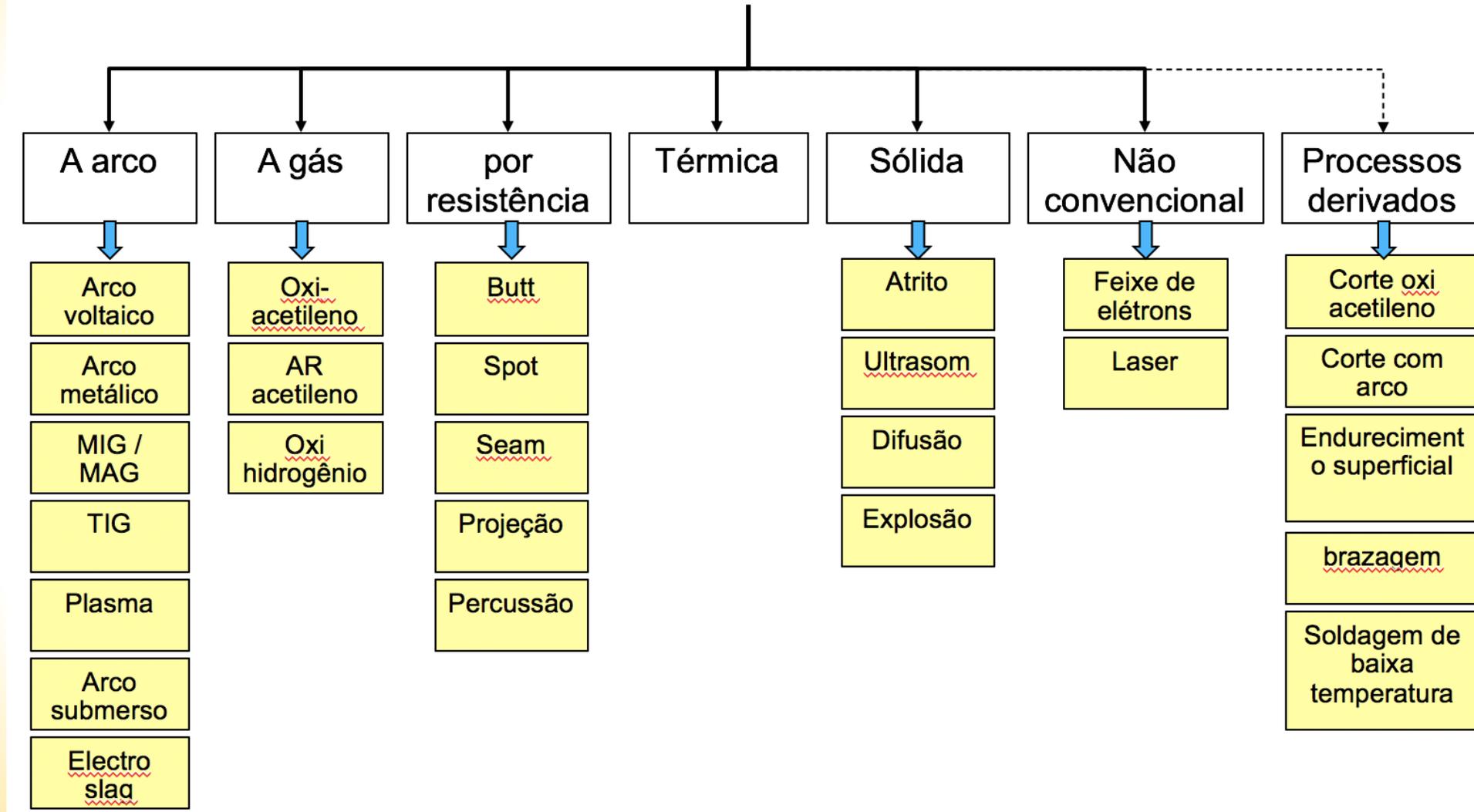


Observ.: (\*) com argônio ou hélio.

(\*\*) com argônio, oxigênio, CO2 ou misturas desses gases.

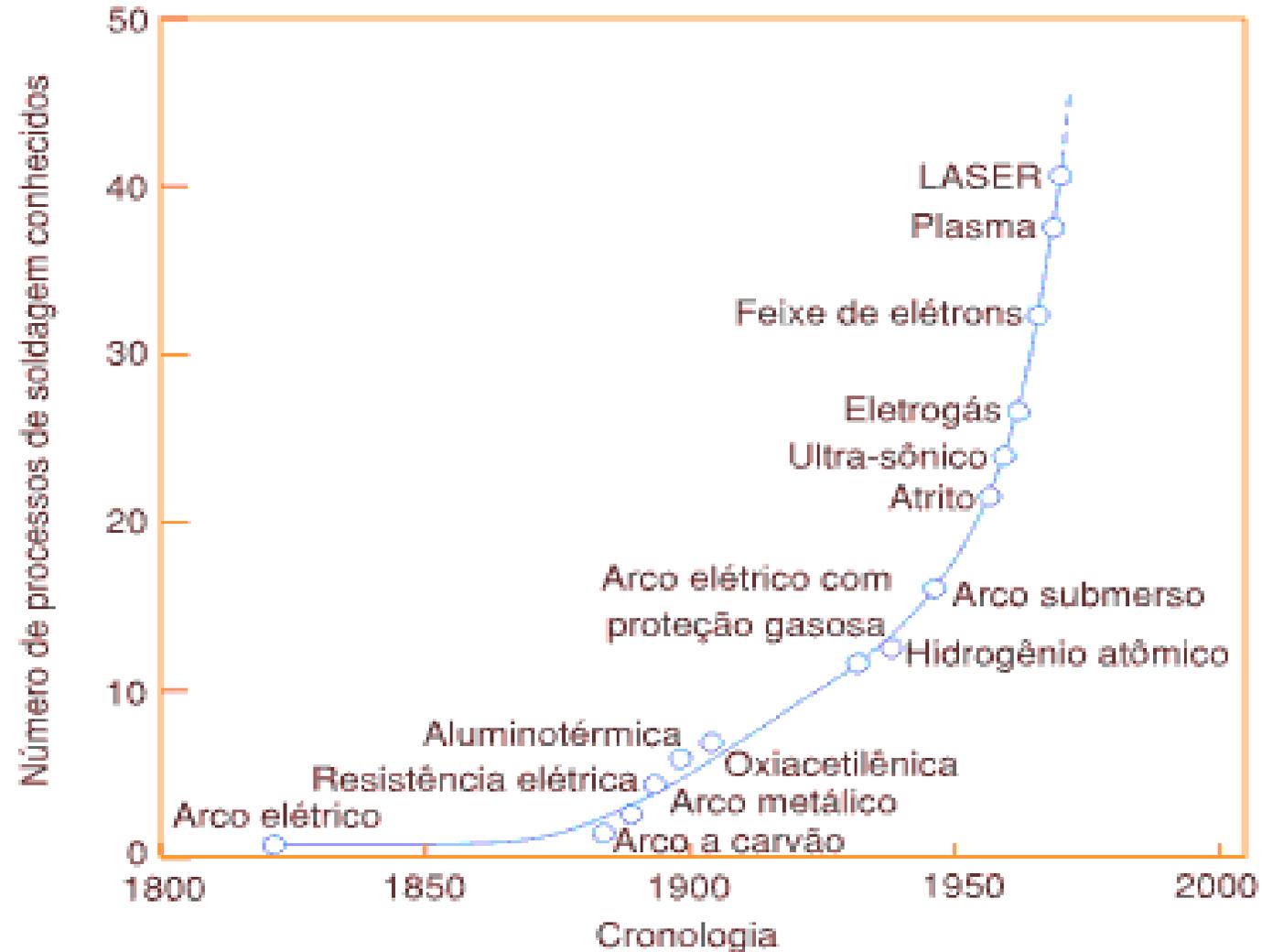


## Classificação dos processos de soldagem





## Evolução





# Soldagem

## Vantagens:

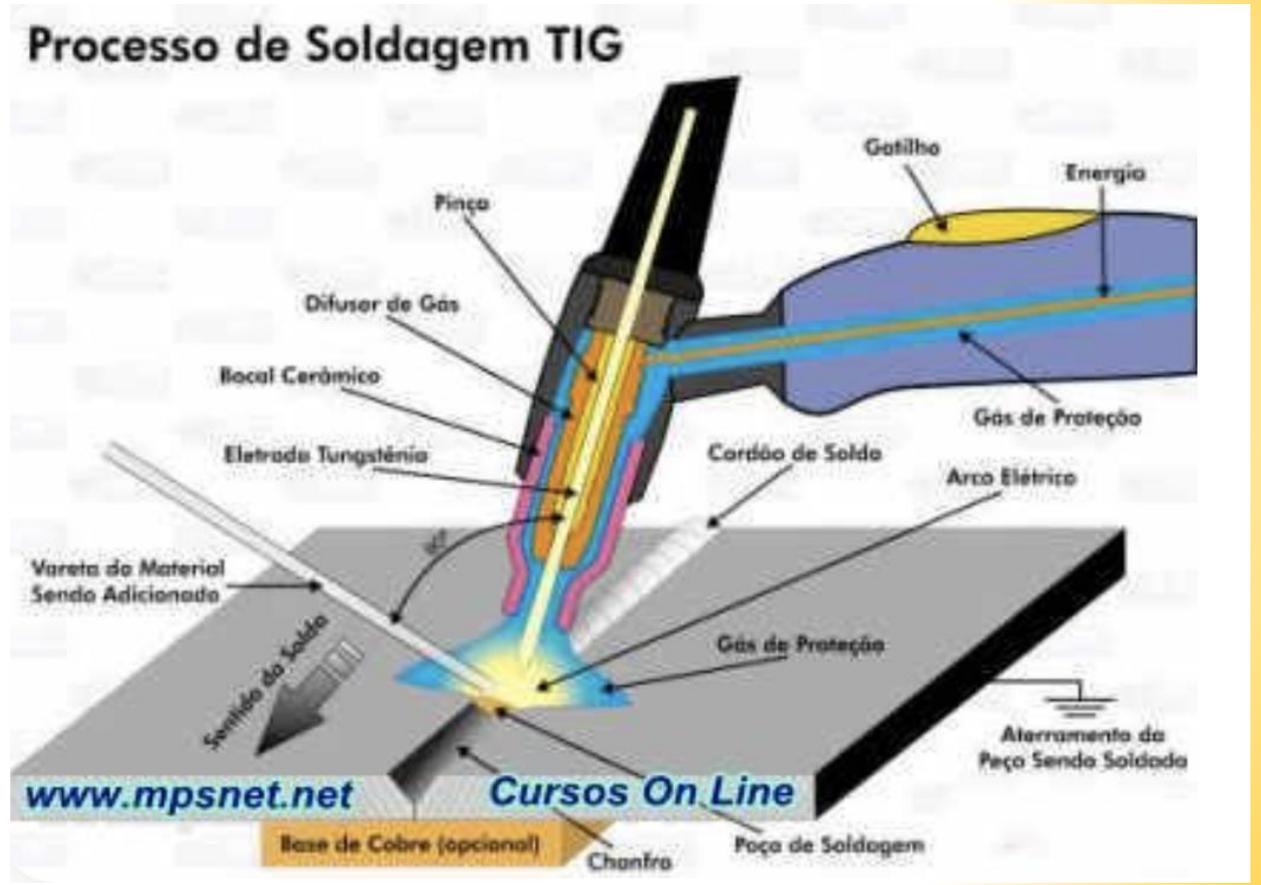
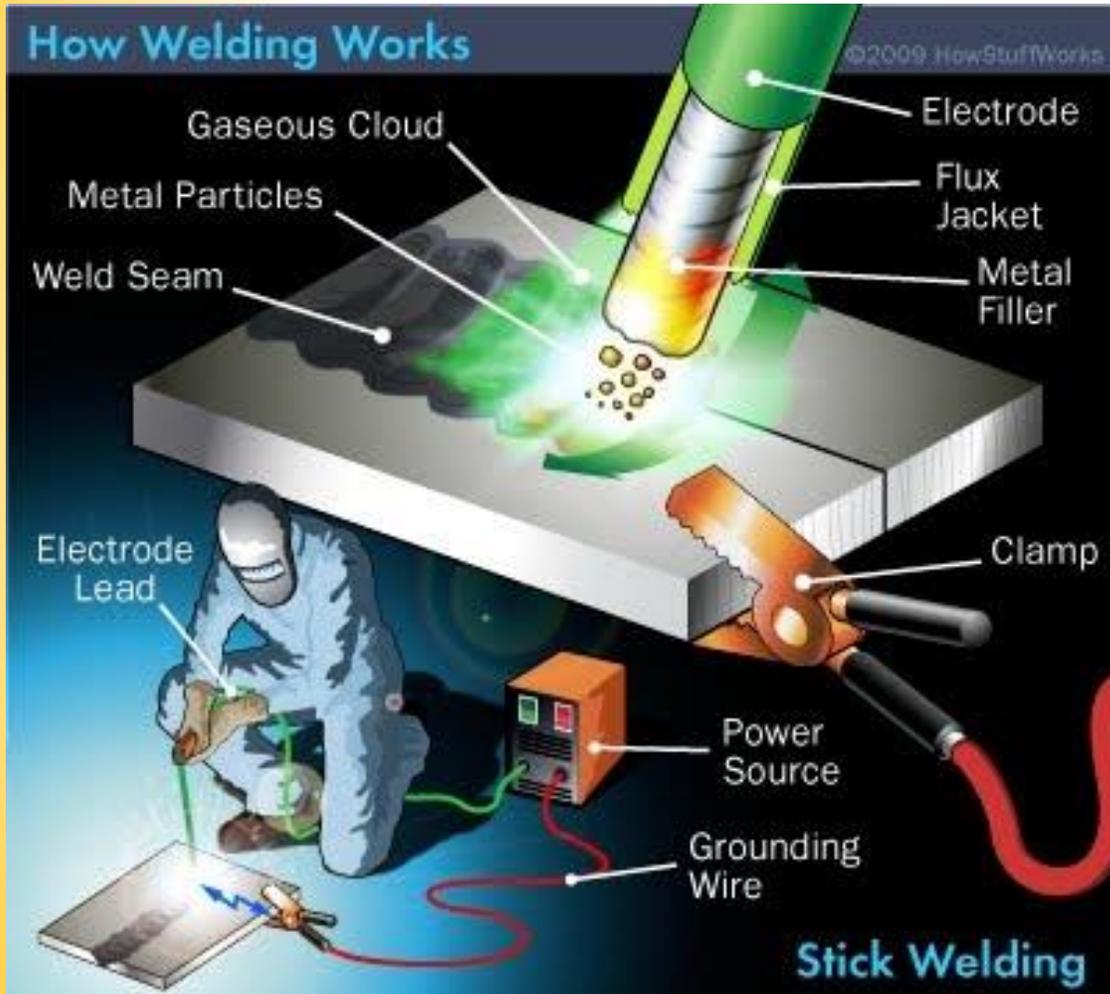
- ▶ Quando bem realizada a união é mais resistente do que o metal de base
- ▶ O custo dos equipamentos de soldagem em geral são baixos
- ▶ Os equipamentos podem ser portáteis e permitem operação em campo
- ▶ Liberdade de projeto
- ▶ Grande variedade de materiais de adição
- ▶ A soldagem pode ser realizada em inúmeras configurações
- ▶ Pode ser automatizada



# Soldagem

## Desvantagens:

- ▶ Pode produzir radiações, fumos e salpicos prejudiciais a saúde
- ▶ Pode provocar tensões residuais e deformações na peça
- ▶ Custo de formação do operador, e necessidade de qualificações periódicas
- ▶ Alterações metalúrgicas devido ao calor gerado
- ▶ Estruturas soldadas geralmente necessitam de tratamento térmico para alívio de tensões





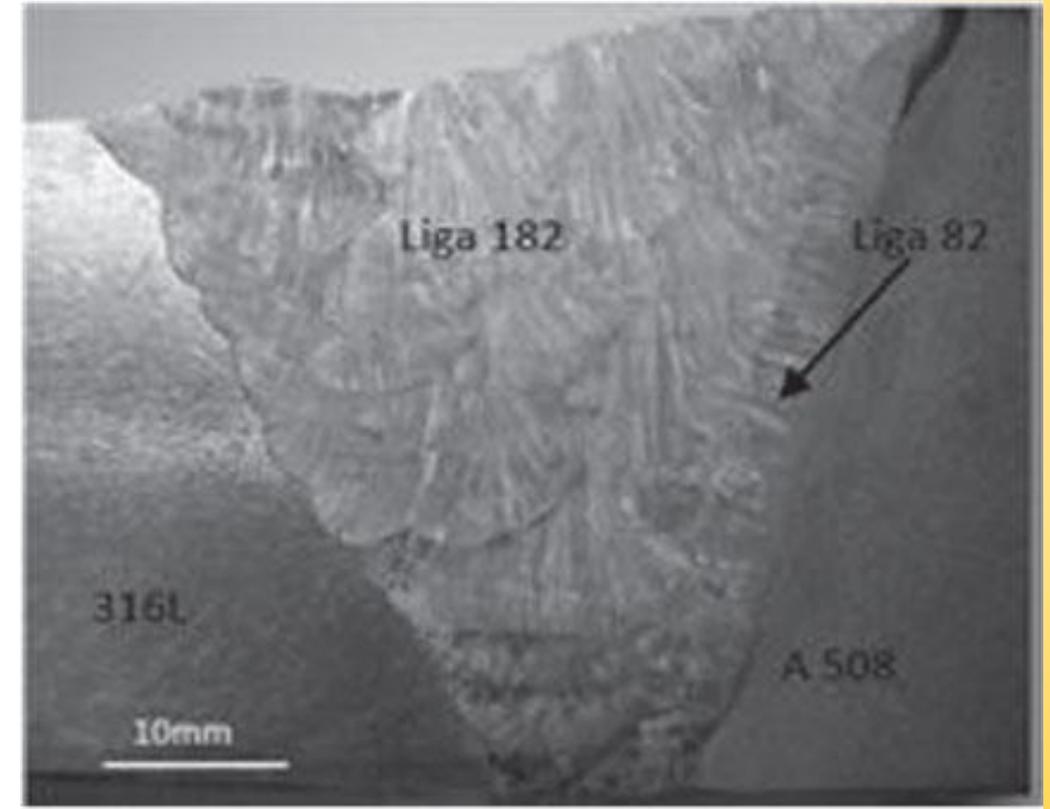
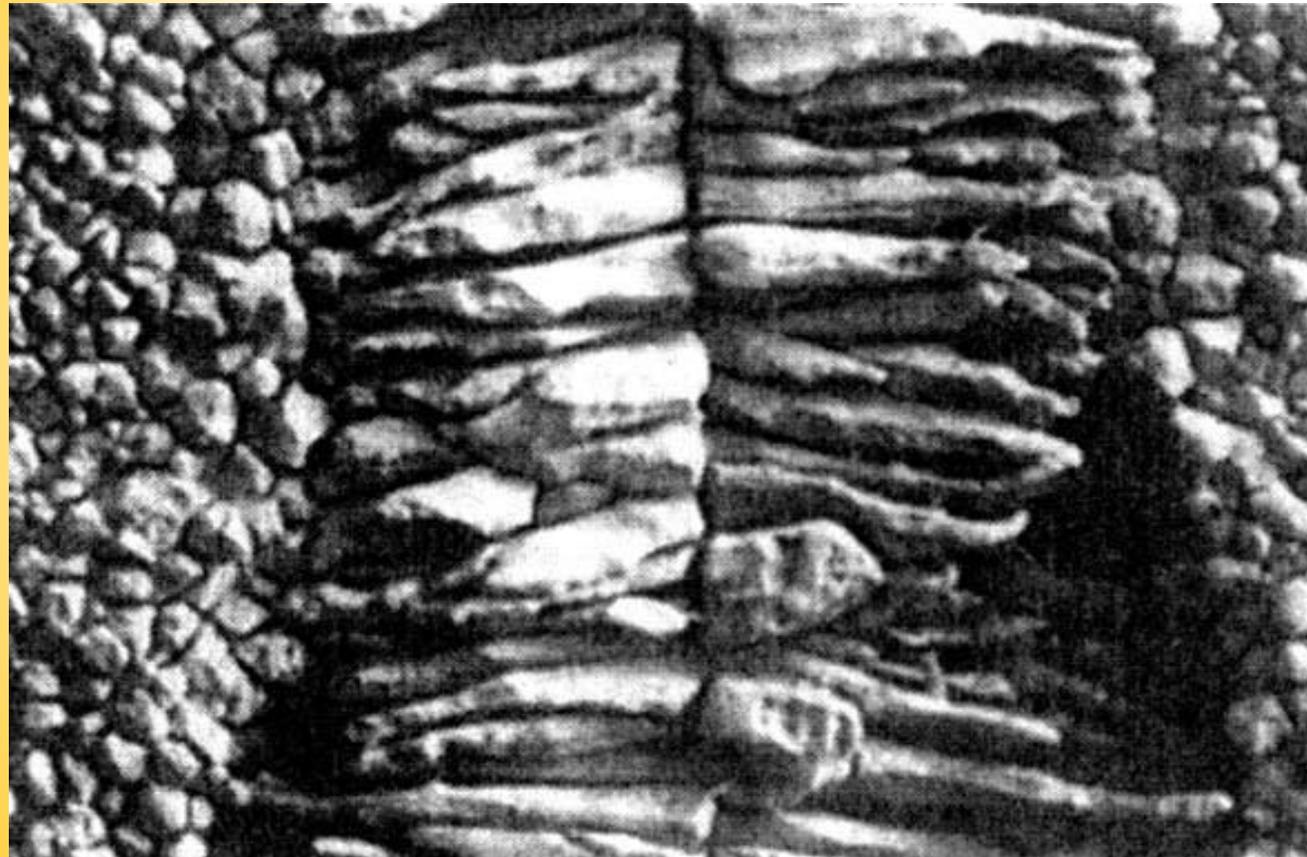
# Estrutura de um cordão solda



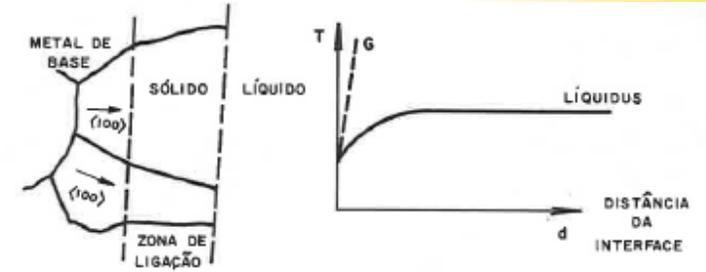
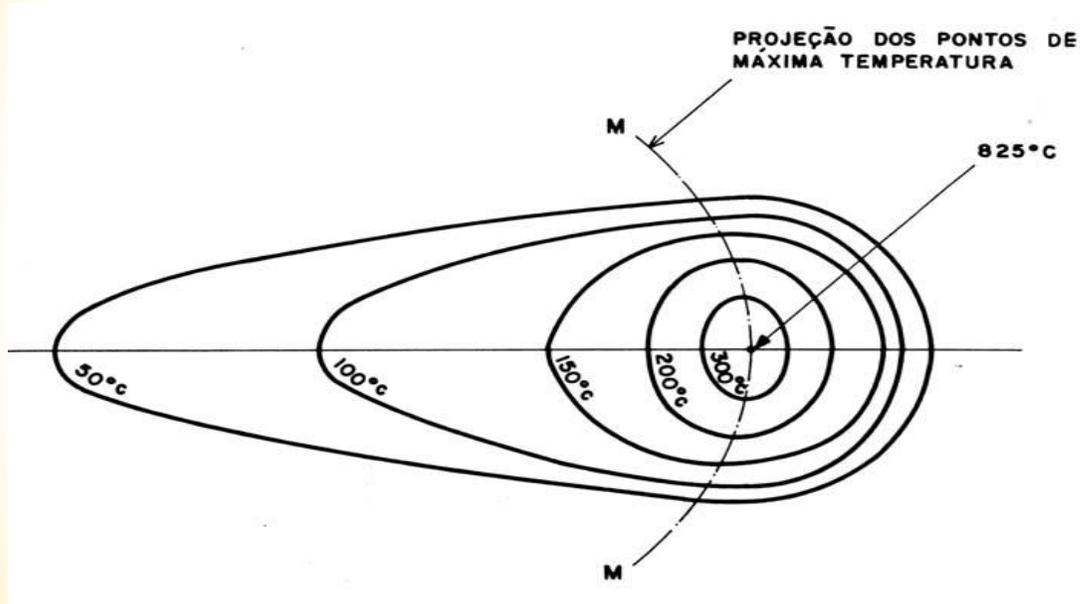
Izabel Machado – machadoi@usp.br



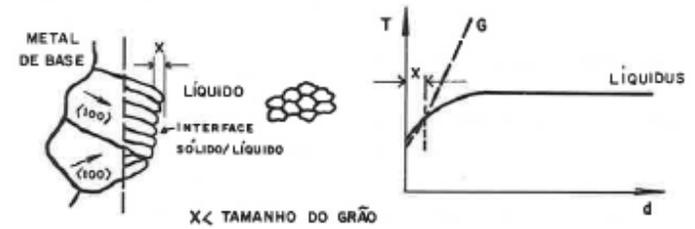
# Estrutura de grãos de um cordão solda



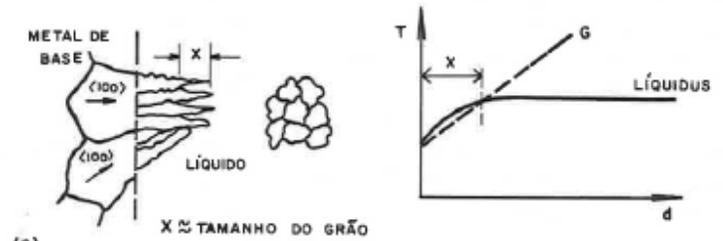
# Linhas isotérmicas obtidas durante a soldagem do alumínio



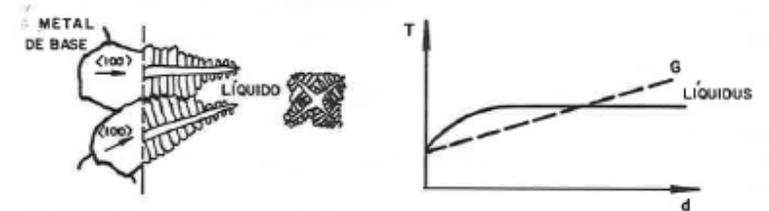
(a) CRESCIMENTO PLANAR



(b) CRESCIMENTO CELULAR



(c) CRESCIMENTO CELULAR - DENDRÍTICO

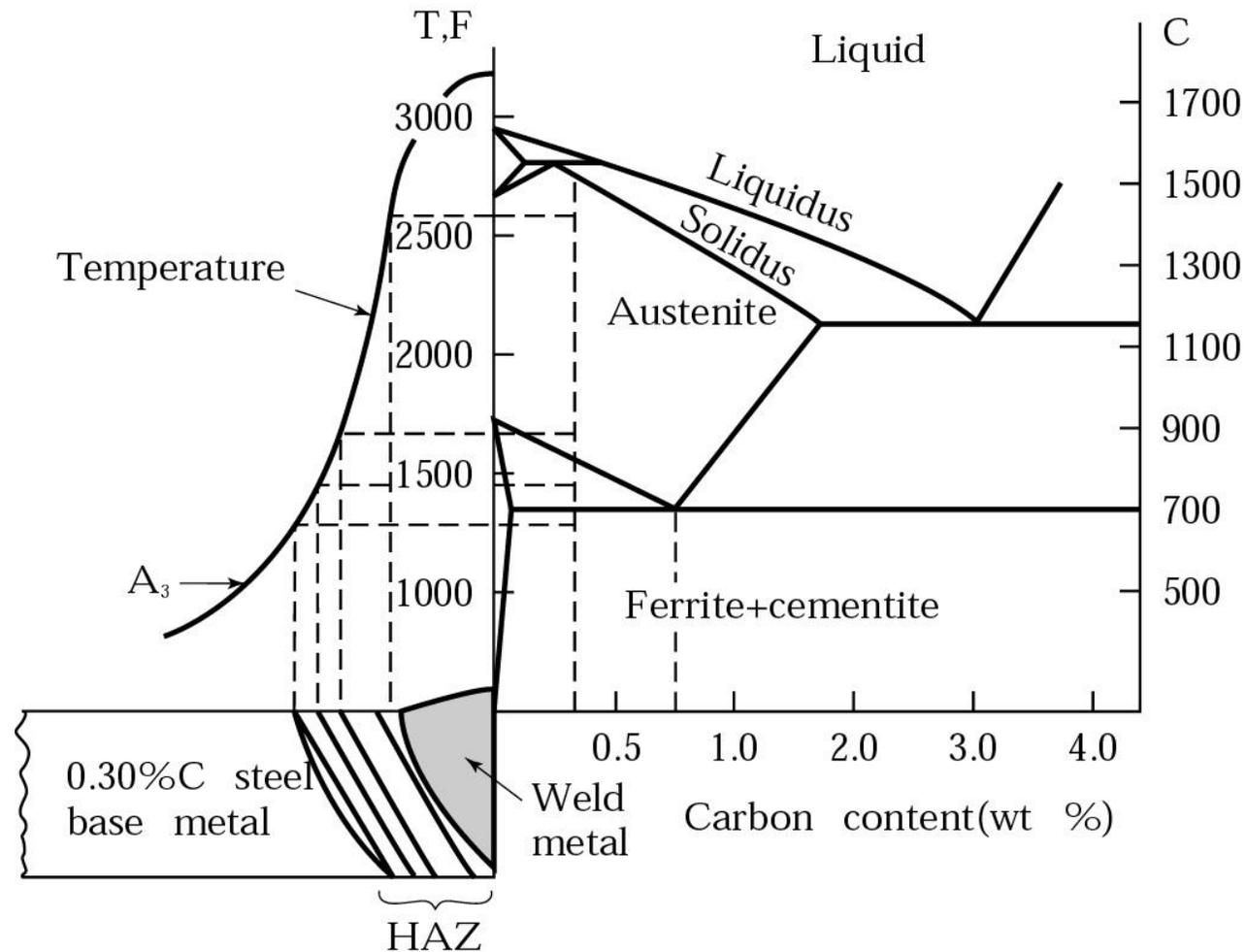


(d) CRESCIMENTO COLUNAR DENDRÍTICO

Figura 8.20 — Diagrama esquemático da interface sólido/líquido <sup>(6)</sup>



## Zona de refusão na junta soldada e ZTA

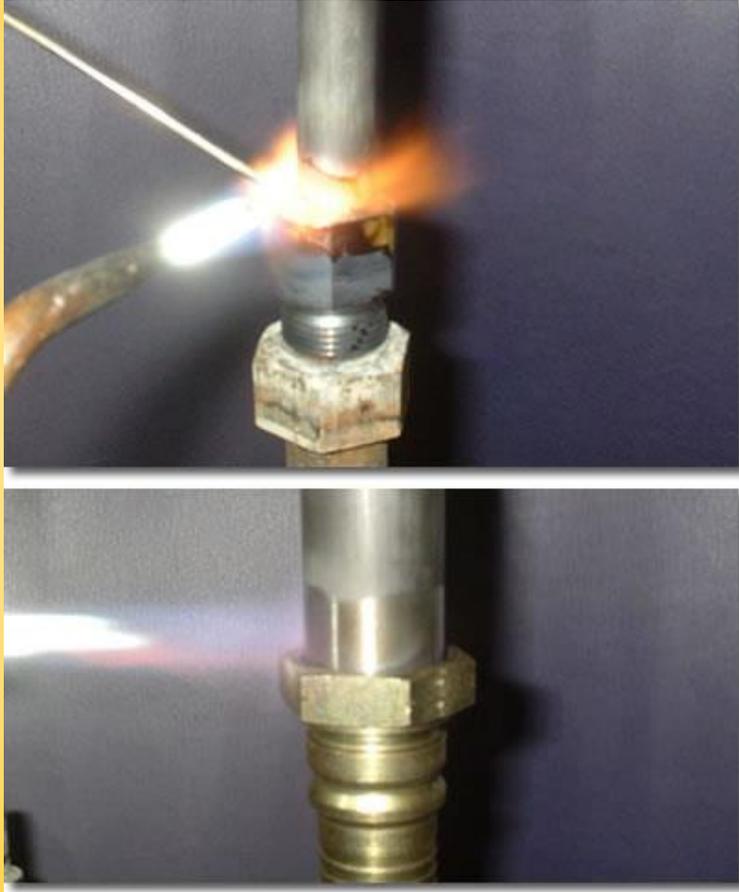


# Cordão de solda



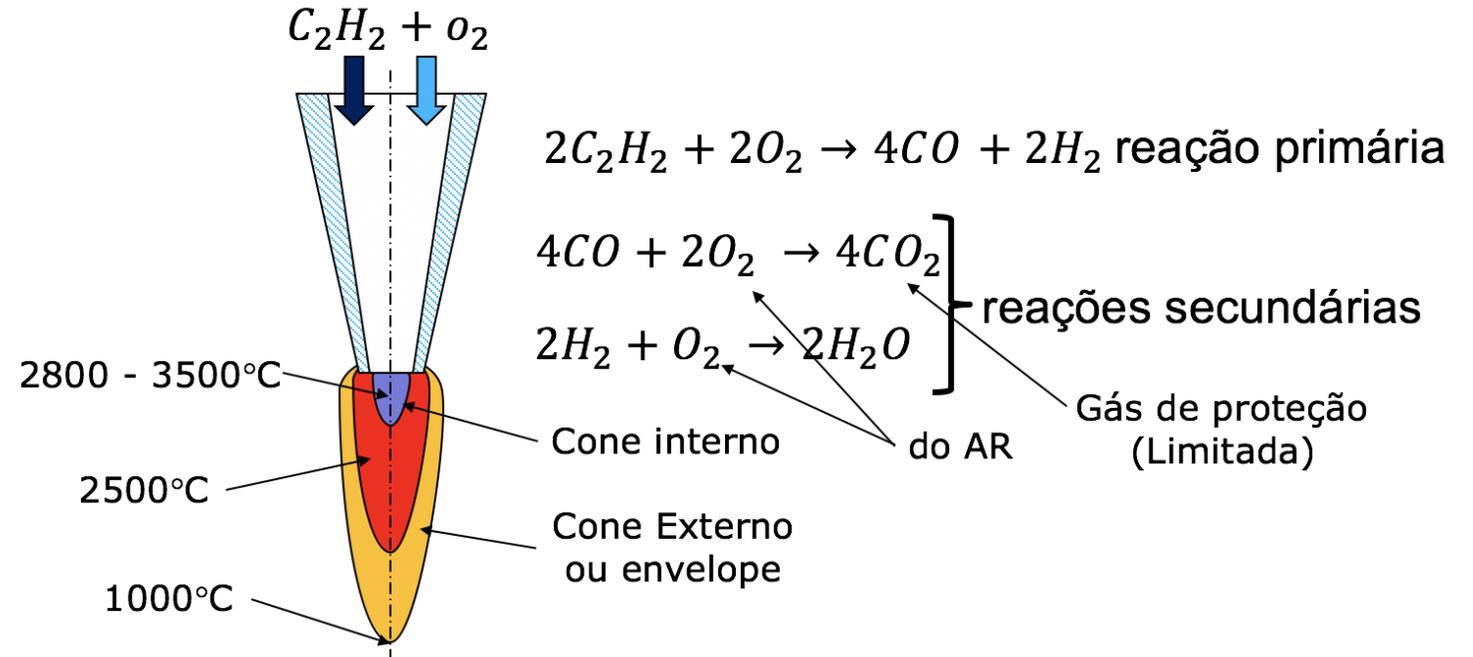


# Esquema da zona afetada pelo calor - ZAC



## Soldagem a gás oxiacetileno

► Reação da soldagem por oxiacetileno





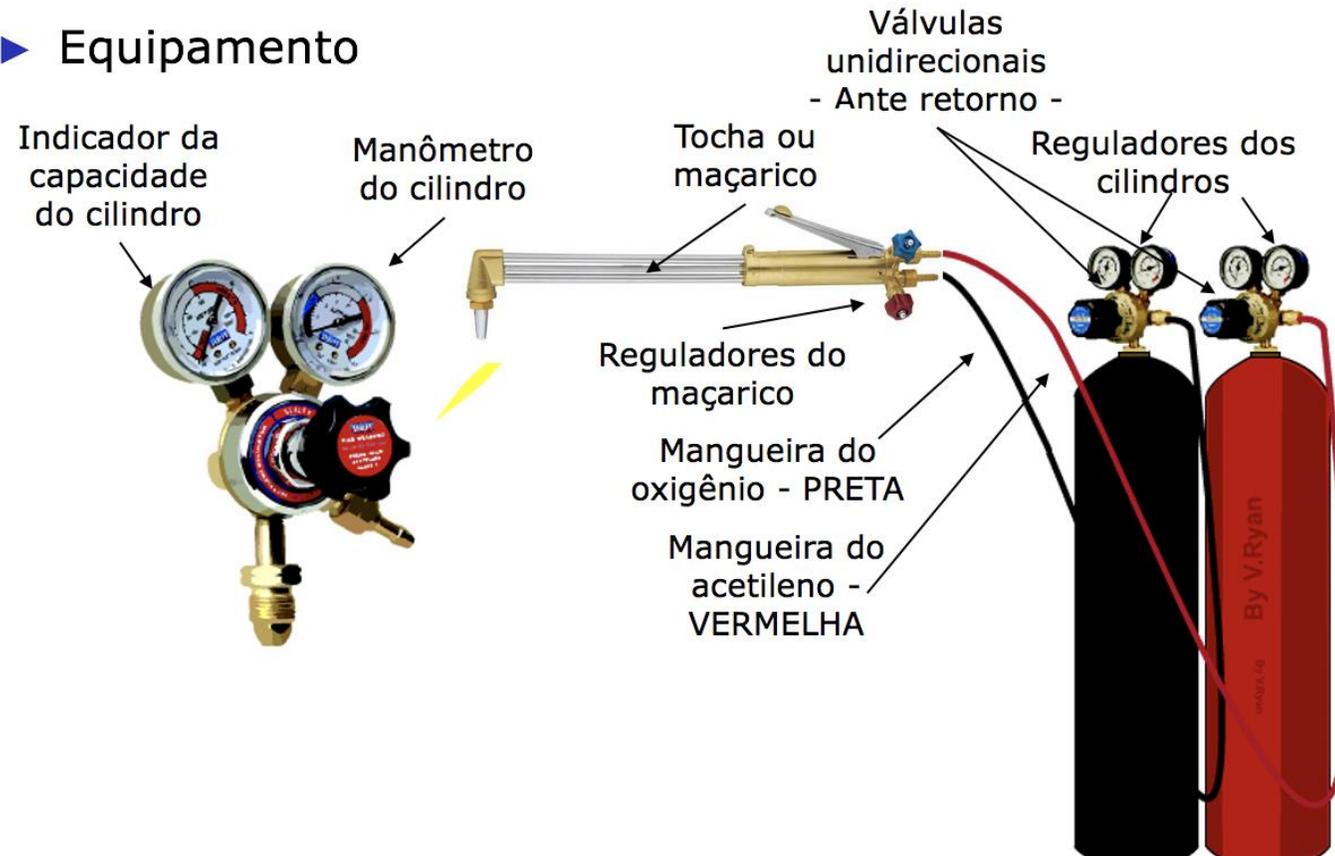
## Soldagem a gás

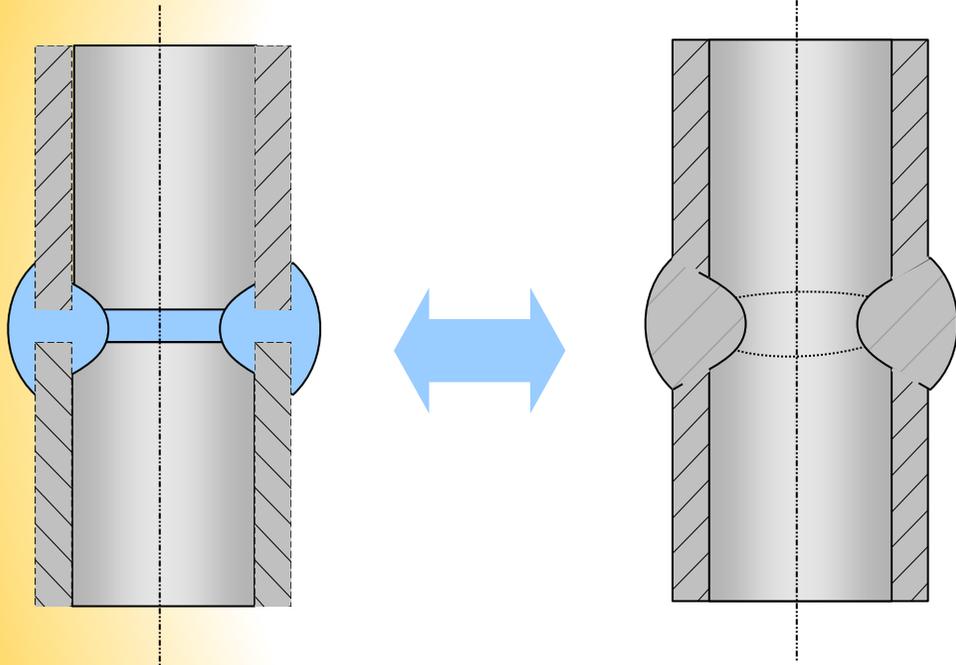
- ▶ Soldagem a gás é um processo onde a fusão e união das peças é obtida pelo aquecimento proveniente de uma chama resultante da reação do gás com o oxigênio
- ▶ A variante mais comum é o processo de oxiacetileno devido a temperatura da chama
- ▶ A temperatura é na ordem de  $3.300^{\circ}\text{C}$  dependendo da regulagem da tocha/maçarico
- ▶ Material de proteção da poça de fusão (fluxo) pode ser adicionado
- ▶ O fluxo se funde e por diferença de densidade se solidifica na superfície do cordão de soldagem
- ▶ Geralmente utilizado para trabalhos de reparo
- ▶ Ideal para uso em metais de baixo ponto de fusão



# Soldagem a gás oxiacetileno

## ► Equipamento





- ▶ Brasagem é um processo união permanente a baixa temperatura, geralmente realizado a temperaturas inferiores a 450°C.
- ▶ A temperatura de execução do processo é bem inferior a temperatura de fusão dos metais de base
- ▶ Geralmente produz resistência inferior



## Brasagem

### Vantagens:

- ▶ Materiais diferentes podem ser unidos
- ▶ Peças de pequena espessura podem ser unidas
- ▶ Peças com diferentes espessuras podem ser unidas
- ▶ As tensões térmicas resultantes nas peças unidas são pequenas

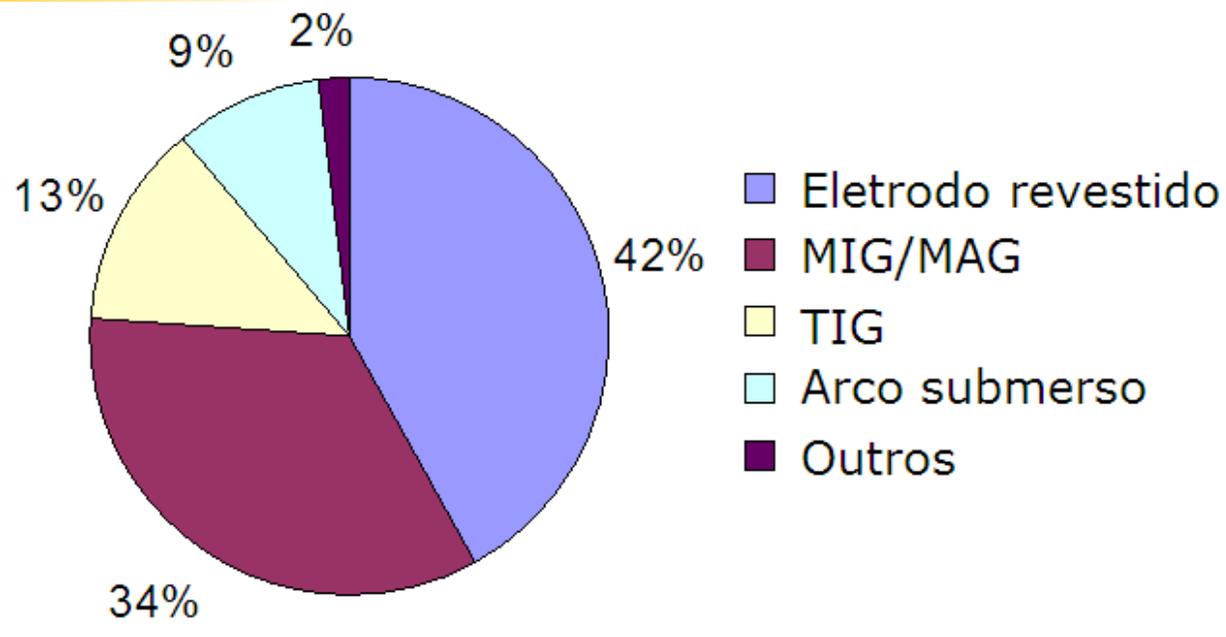
### Desvantagens:

- ▶ Resistência da junta soldada é inferior
- ▶ Preparação da junta deve ser mais cuidadosa



### ▶ Principais processos de soldagem

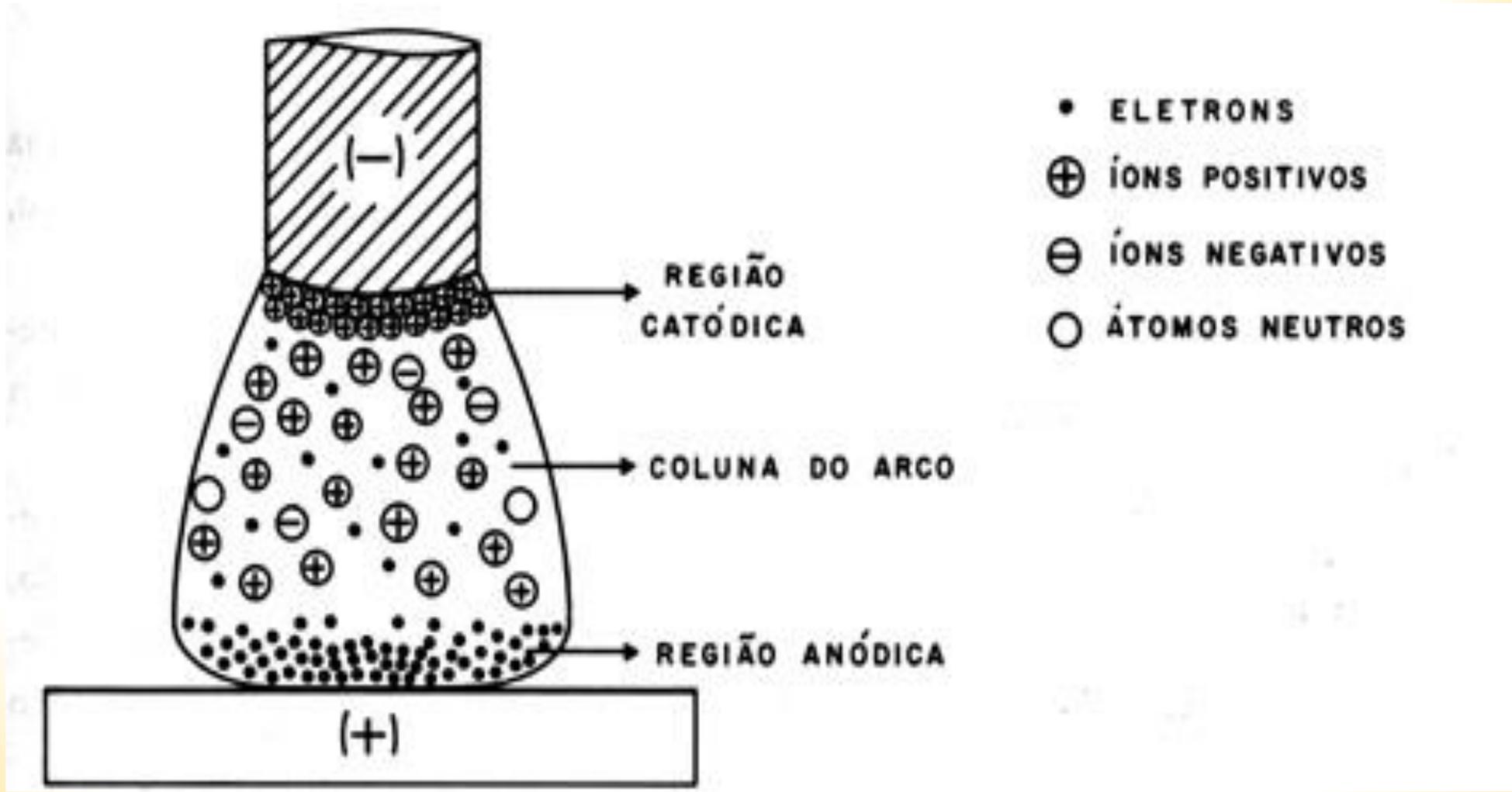
### Arco elétrico



- ▶ O arco é uma descarga elétrica entre dois eletrodos
- ▶ Para propósitos práticos o arco elétrico deve ser tratado como um condutor gasoso, com uma impedância própria, o qual converte energia elétrica em calor
  - ▶ O intensidade de calor do arco pode ser controlada através dos parâmetros elétricos (V e I)
- ▶ No processo de soldagem a arco, atua também no sentido de remover (ou quebrar) a camada de óxido superficial
- ▶ O arco atua também no sentido de controlar a transferência de material

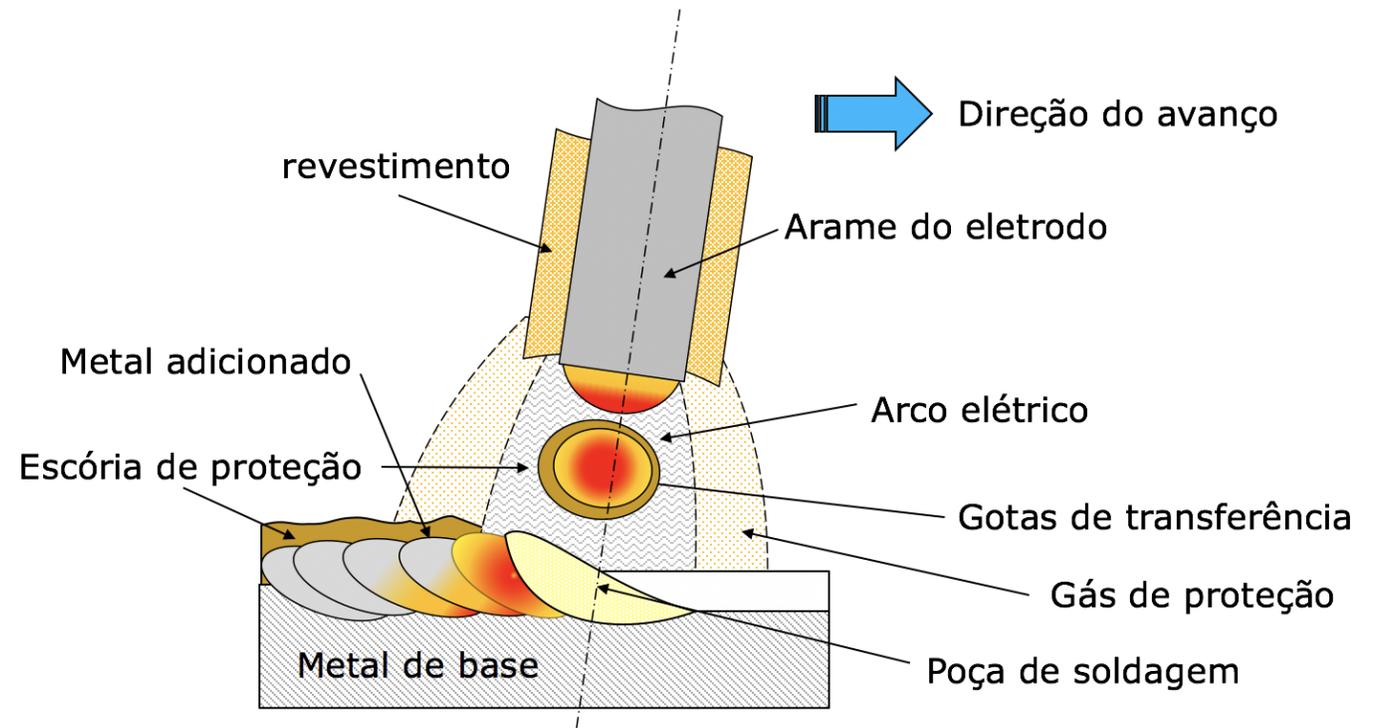
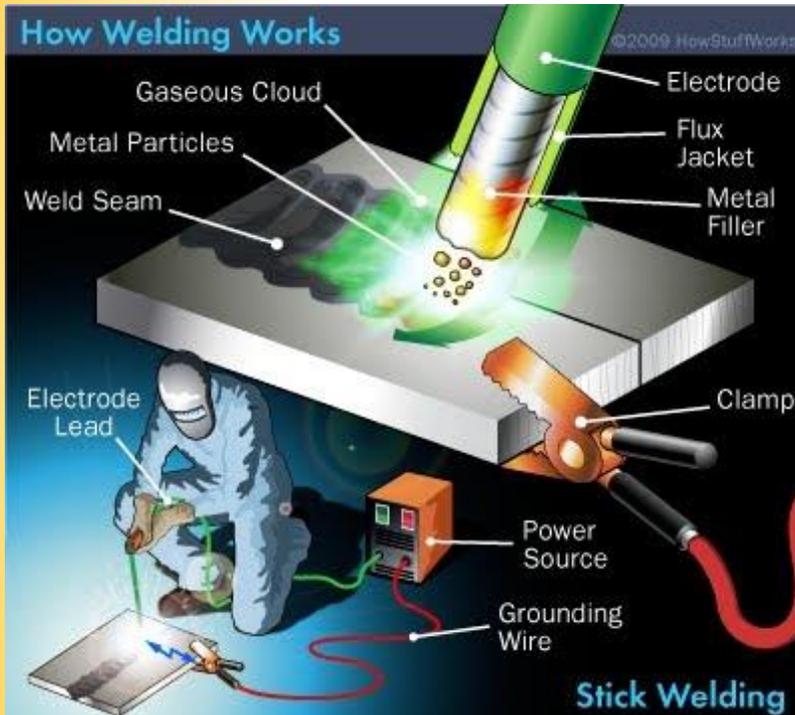


Esquema em escala atômica dos fenômenos que ocorrem em um arco elétrico com eletrodo permanente



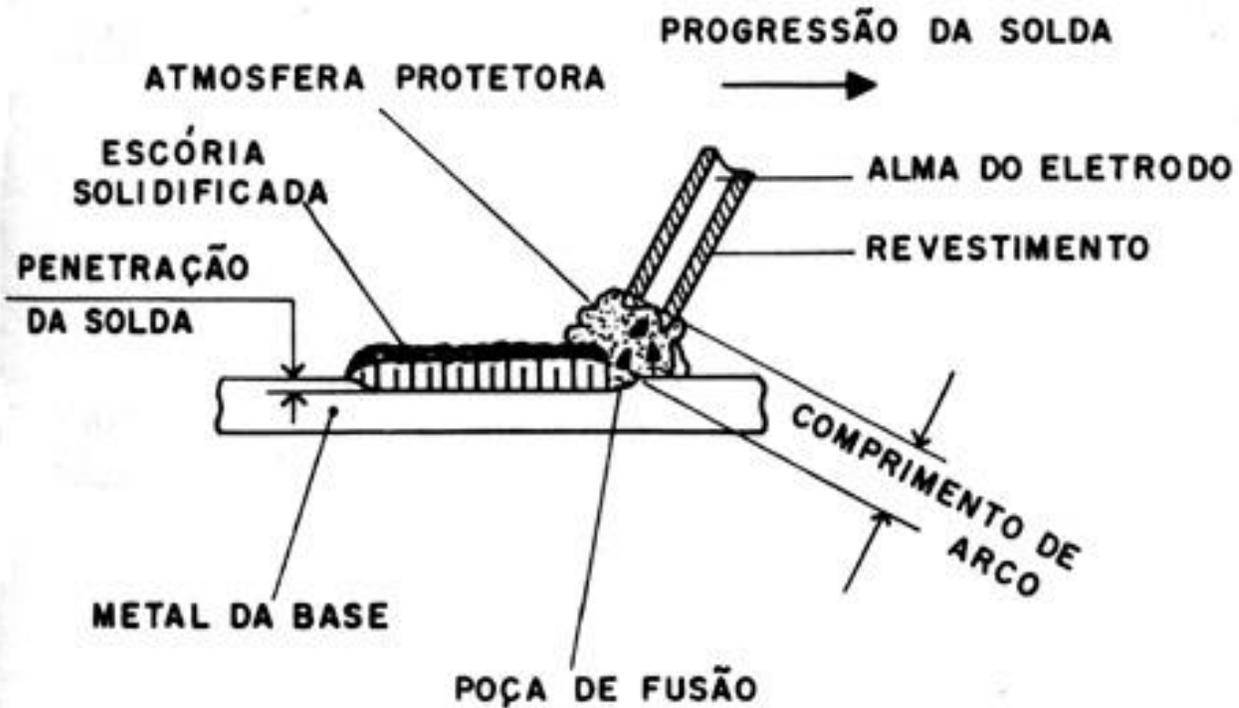


## Soldagem por eletrodo revestido





# Esquema básico do funcionamento do processo de soldagem com eletrodo revestido





# Soldagem por eletrodo revestido

## ► Vantagens

- Equipamento simples, portátil e barato
- Baixo custo
- Pode se realizada indoor ou ao ar livre
- Pode ser feita em qualquer posição
- Grande variedade de eletrodos, capaz de cobrir quase todo o espectro de metais metálicos
- Pouco sensível a variações geométricas das peças, sujeira, variações na folga, entre outras
- Pouco sensível ao meio ambiente (ex.: ventos)
- Adaptável a espaços pequenos



# Soldagem por eletrodo revestido

## ► Desvantagens

- Não recomendado para soldagem de materiais de baixo ponto de fusão, ex.: Alumínio (temperatura do arco muito elevada)
- Não recomendado para materiais reativos, ex.: Ti
- Baixa taxa de deposição
- Deposição deficiente
- Baixa produtividade -> trocas constantes de eletrodo
- Tamanho do eletrodo
- Forte dependência da habilidade do operador
- Automatização limitada



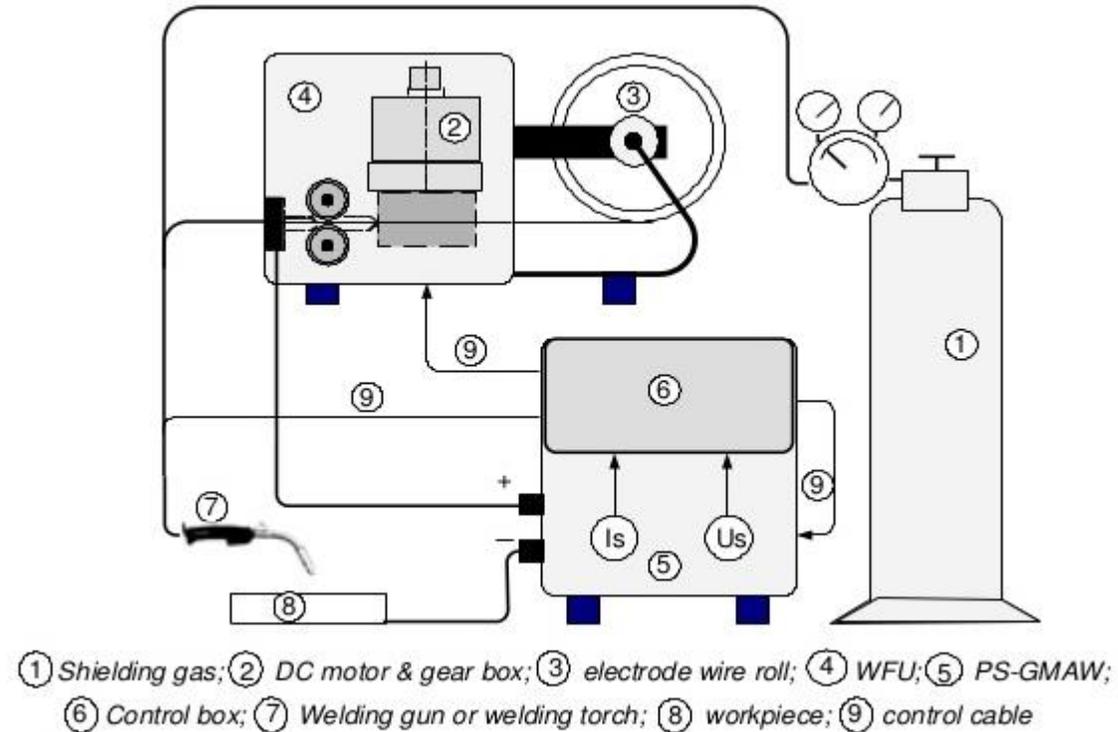
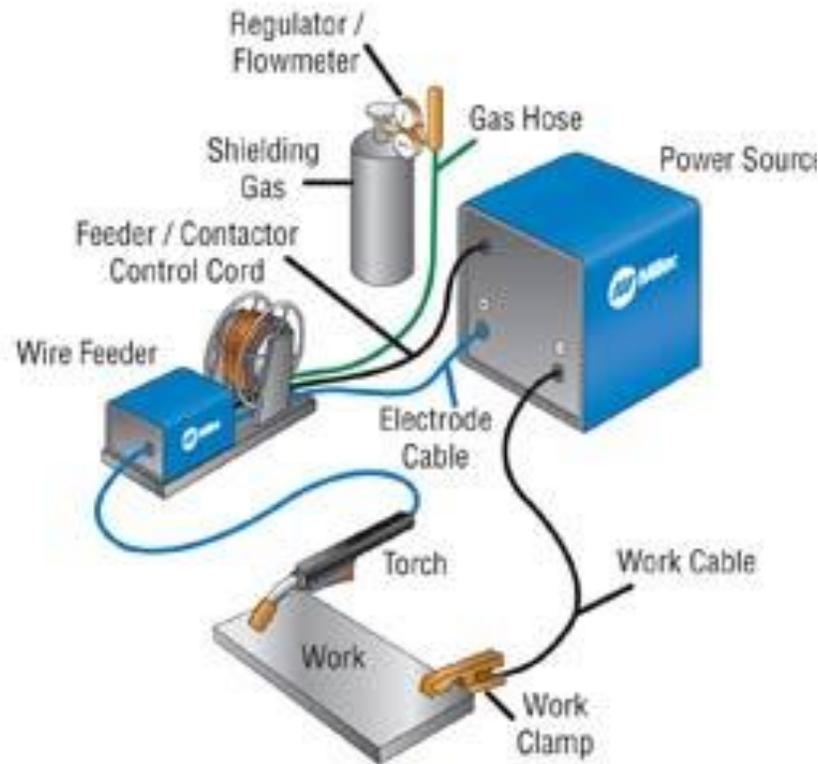
## Soldagem por eletrodo revestido

### ► Desvantagens

- Necessidade de remoção da escória protetora
- Descontinuidades associadas a operação manual
- Inclusão de escória no cordão de solda
- Porosidade no cordão de solda
- Hidrogênio -> falha catastrófica
- Perda de material

# Soldagem MIG/MAG

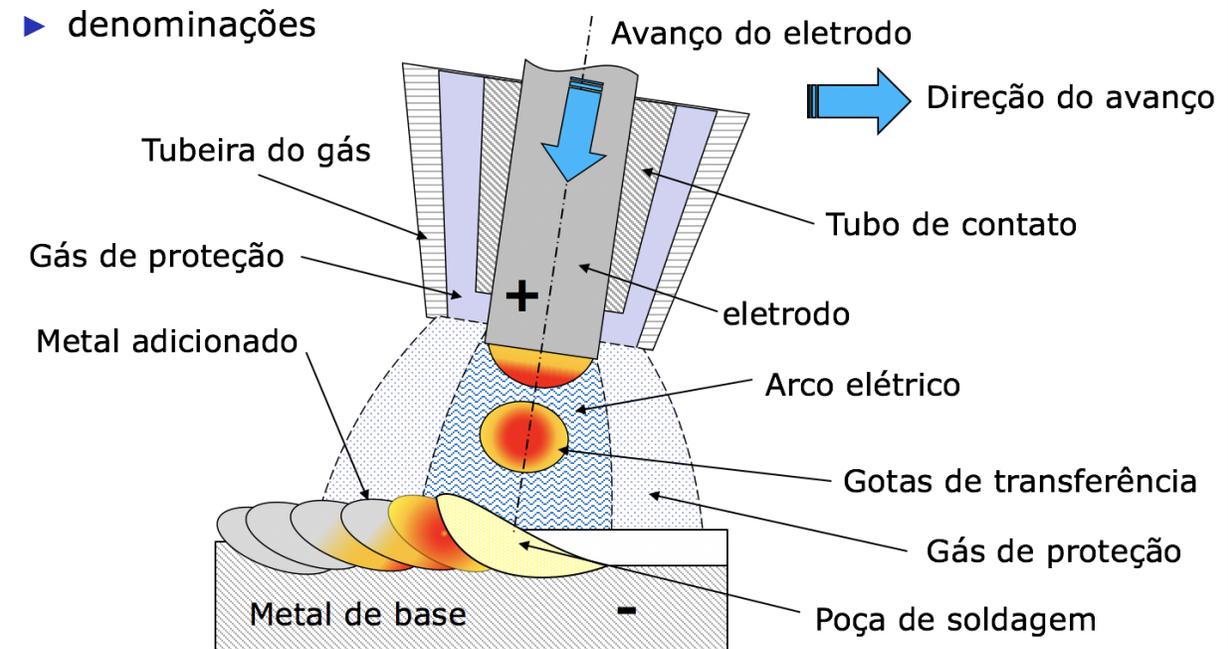
## ► equipamentos





## Soldagem MIG/MAG

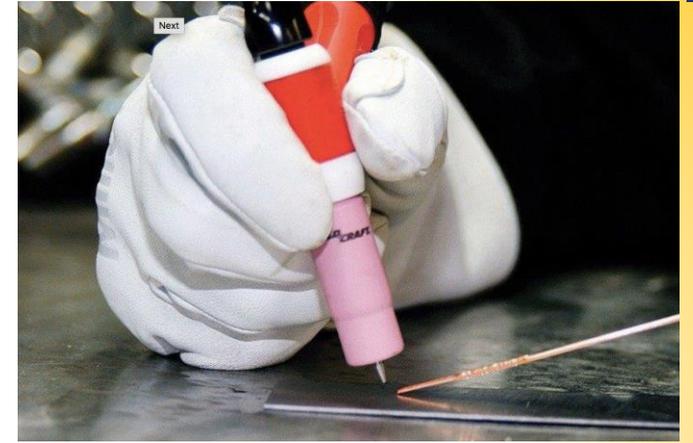
- ▶ Soldagem MIG/MAG - *Gas-metal arc welding (GMAW)*
- ▶ MIG - *Metal Inert Gas*
- ▶ MAG - *Metal Active Gas*
- ▶ Neste processo a proteção da poça de fusão não mais ocorre pela ação dos gases resultantes da queima do revestimento, como no processo de eletrodo revestido, mas ocorre diretamente para injeção de gás.
- ▶ Gás Inerte - Argônio, Hélio
- ▶ Gás Ativo - CO<sub>2</sub> ou mistura a base CO<sub>2</sub> de com gases inertes



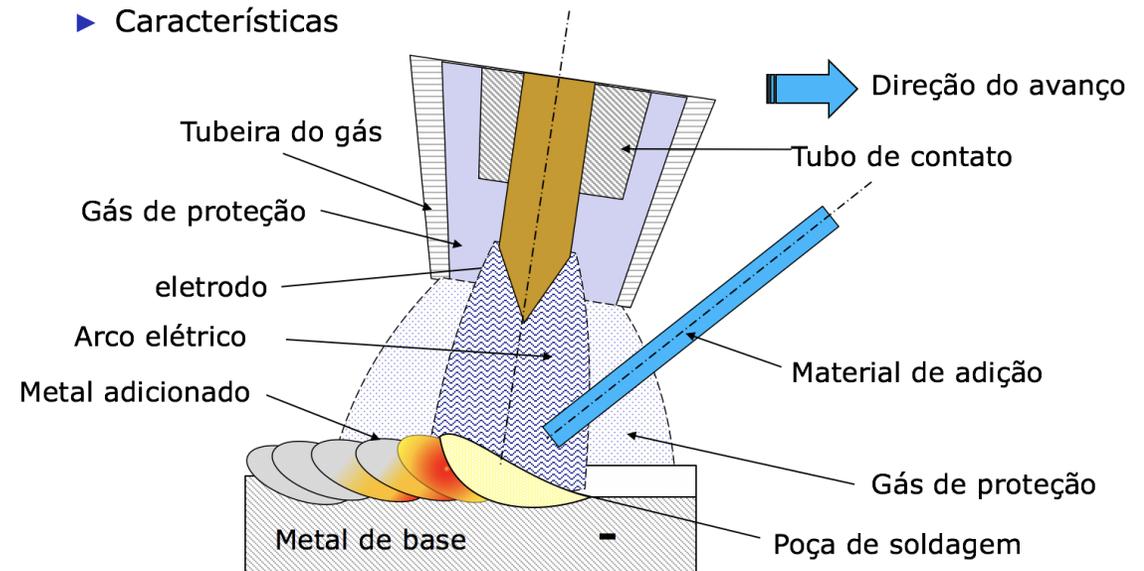


## Soldagem TIG

- ▶ TIG - *Tungsten Inert Gas, Gas-tungsten arc welding (GTAW)*
- ▶ Ao contrário dos processo ER, MIG e MAG onde o arco se estabelece no eletrodo e este é consumido no processo, Na soldagem TIG o arco se estabelece entre a peça e um eletrodo de Tungstênio
- ▶ O processo TIG pode operar com ou sem material de adição
- ▶ O material de adição deve ser adicionado



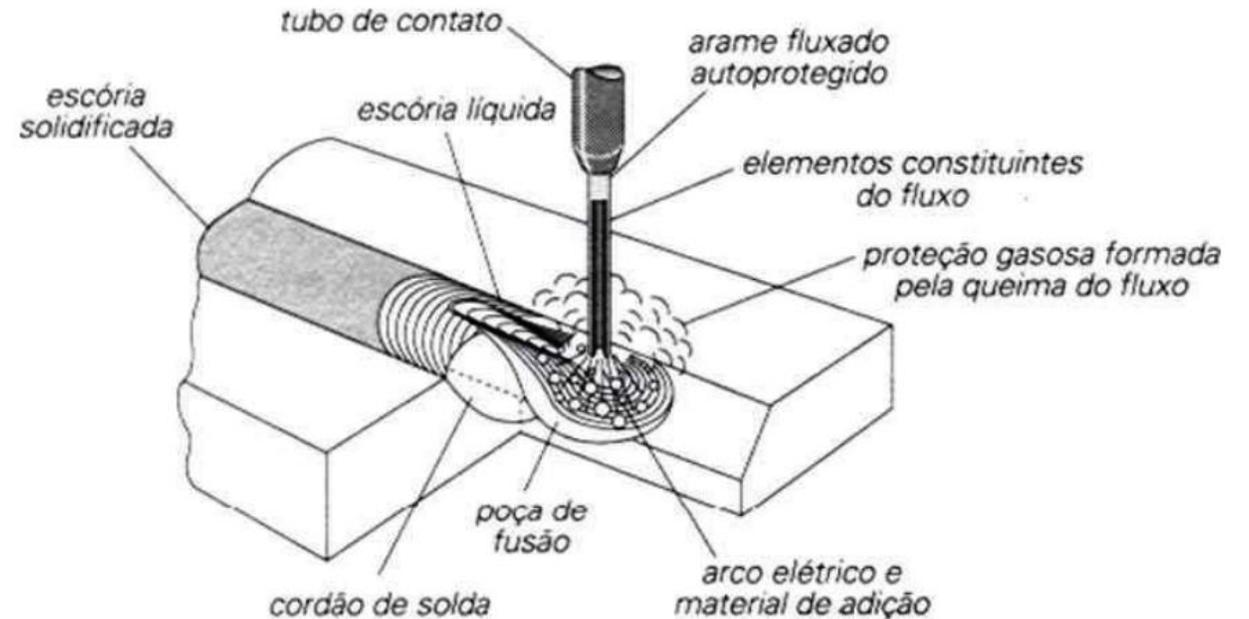
<http://www.supresolda.com.br/servicos-solda-tig>



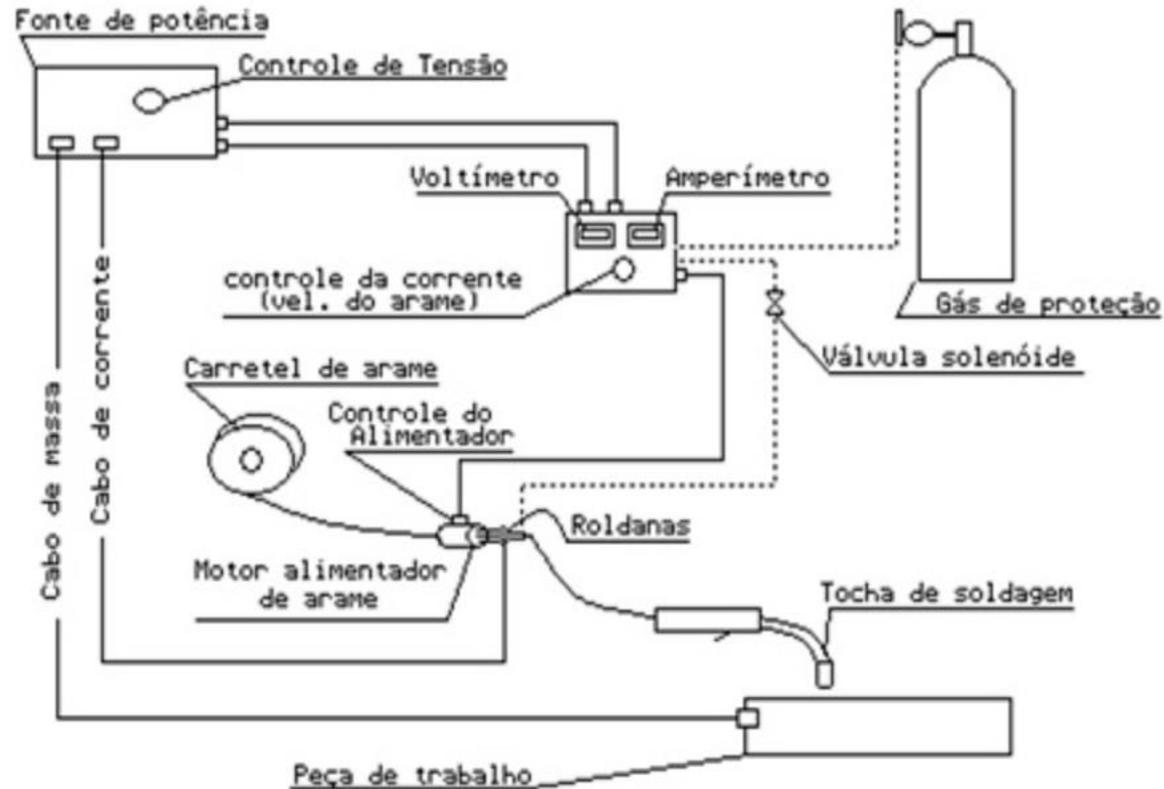


## Soldagem Eletrodo tubular

- ▶ Soldagem por eletrodo tubular - **Flux Core Arc Welding (FCAW)**
- ▶ Este processo pode ser caracterizado por ter um eletrodo onde o elemento para geração dos gases de proteção e fluxo estão dentro de um arame tubular. Em termos gerais o eletrodo é o inverso do eletrodo revestido.
- ▶ O eletrodo é contínuo (rolo)



<https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/161-processo-com-arames-tubular-consumiveis>



Soldagem com Arame Tubular Va  
Soldagem com Arame Tubular

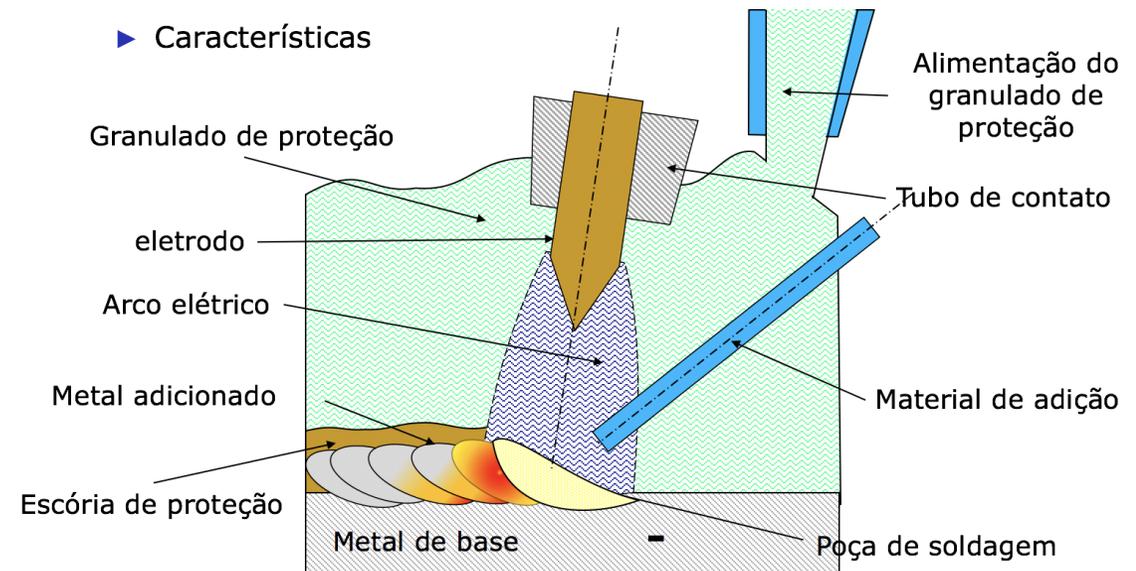
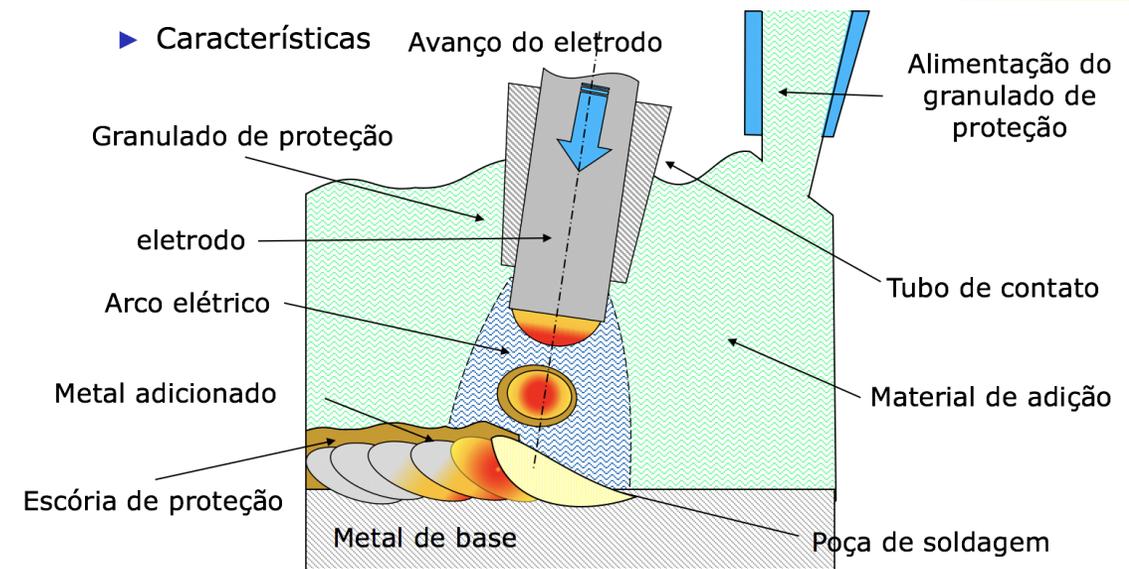
<https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/162-processo-com-arame-tubular-equipamento>

<https://www.camposcal.com.br/caldeiraria/soldagem/soldagem-com-arame-tubular/soldagem-com-arame-tubular-valor-vitoria>



## Soldagem Arco submerso

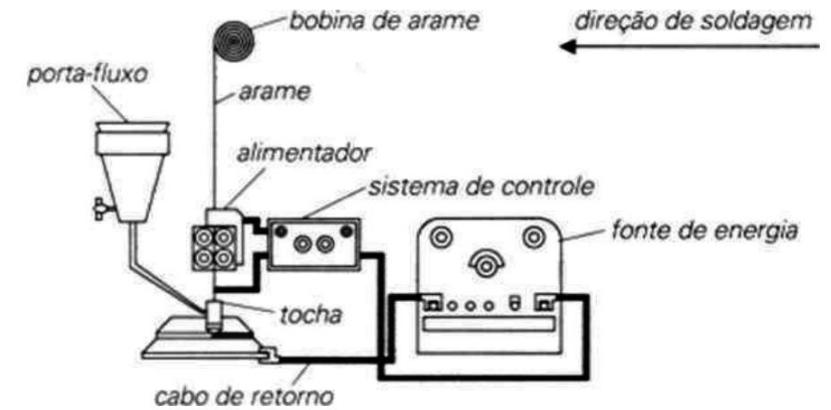
- ▶ Processo a arco submerso ou ***Submerged Arc Welding - SAW***
- ▶ Neste processo a proteção do arco, do material depositado e da poça de material fundido é realizado por material granulado, semelhante ao utilizado nos ER, o qual é depositado na forma de pó sob a junta soldada, com o arco se estabelecendo dentro desta cobertura





Os equipamentos utilizados no processo de arco submerso variam. Cada aplicação requer um conjunto de equipamentos.

<https://alusolda.com.br/maquinas-usadas-no-processo-de-arco-submerso/>



<https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/158-processo-arco-submerso-equipamentos>

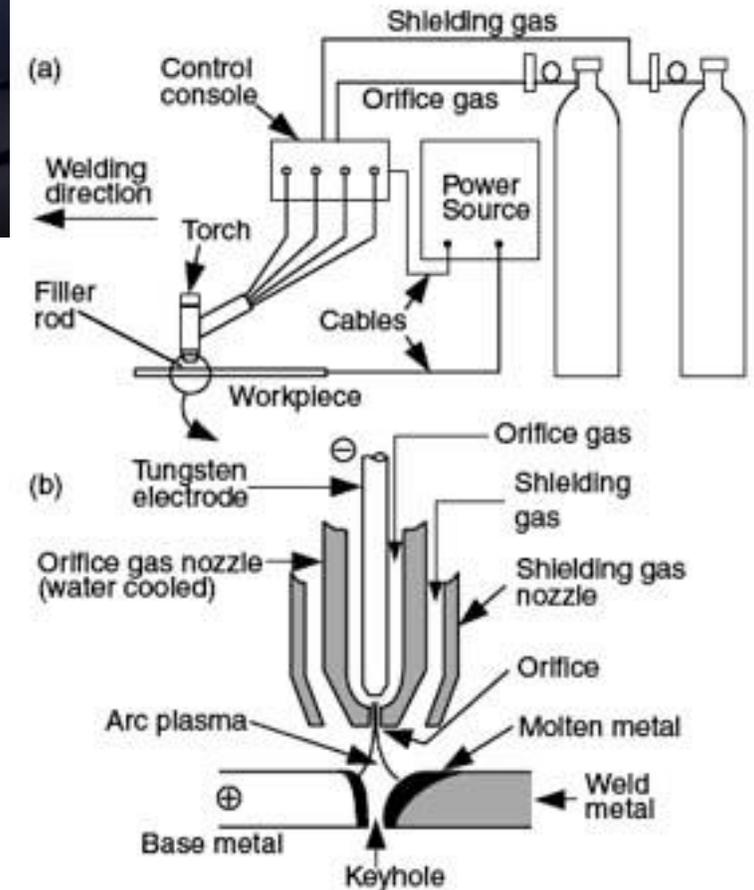
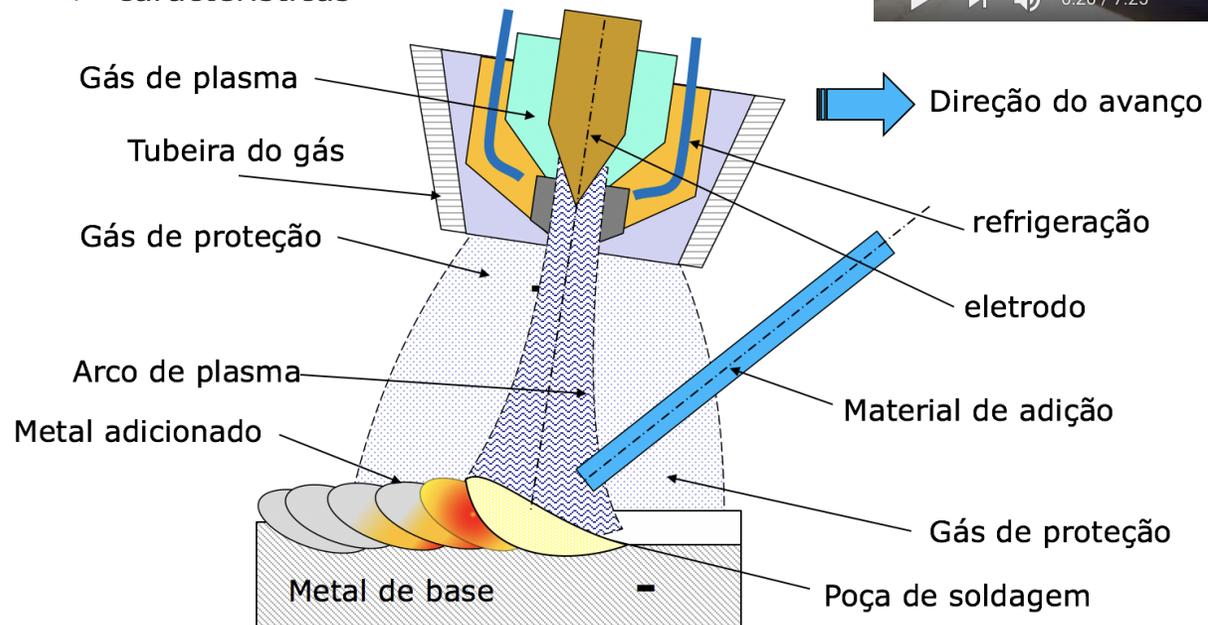


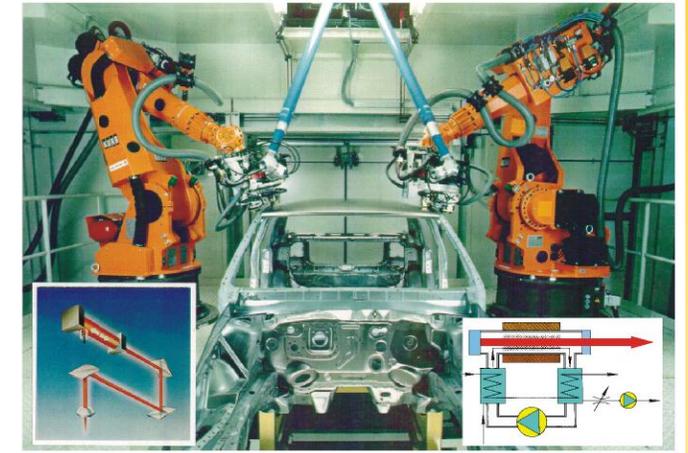
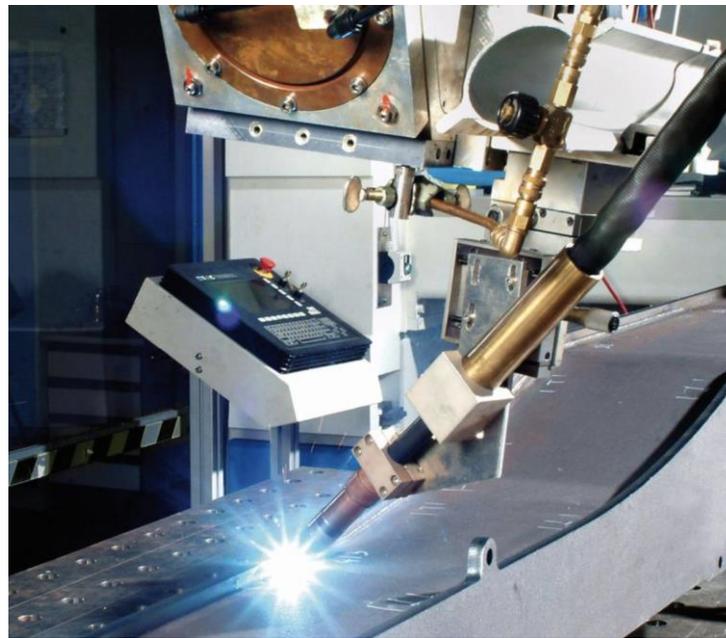
<https://www.youtube.com/watch?v=jo376zPns8I>



## Soldagem por Plasma

### ▶ características



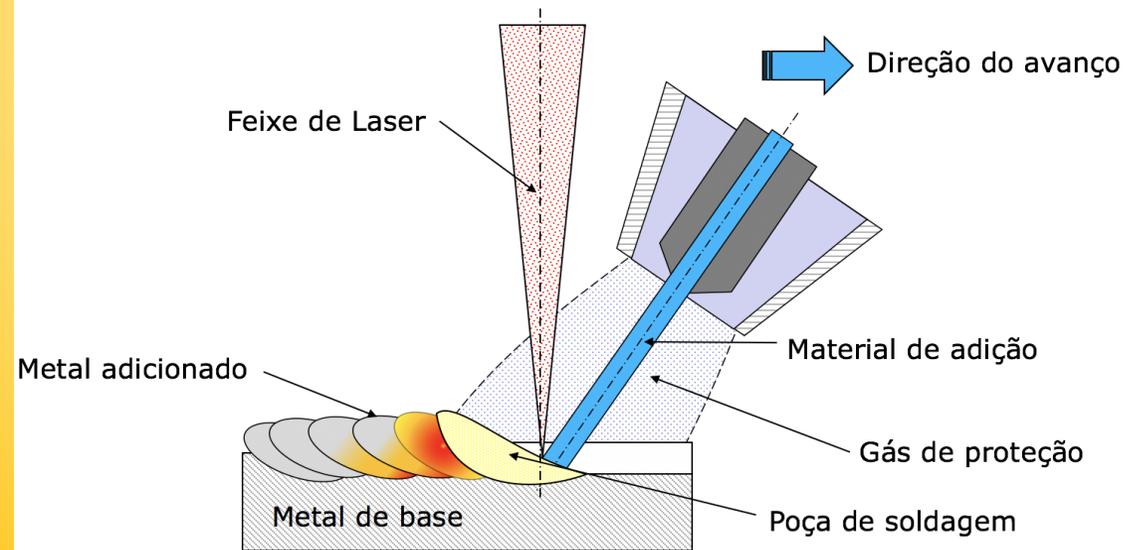


<https://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/brochure-Laser-Beam-Welding.html>

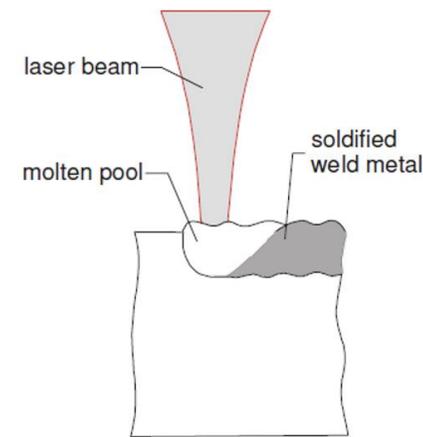
<http://engenheirodemateriais.com.br/2016/03/18/3-processos-a-laser-soldagem/>

## Soldagem por Laser

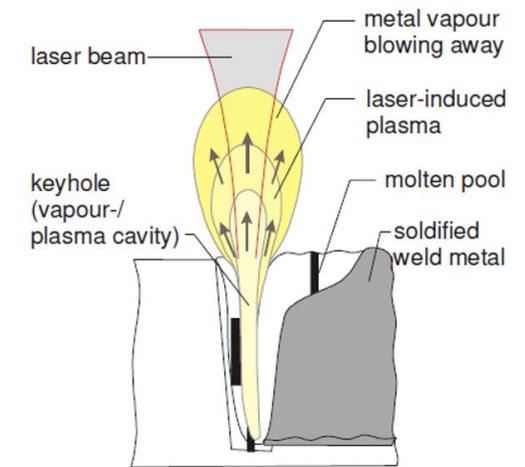
### ▶ características



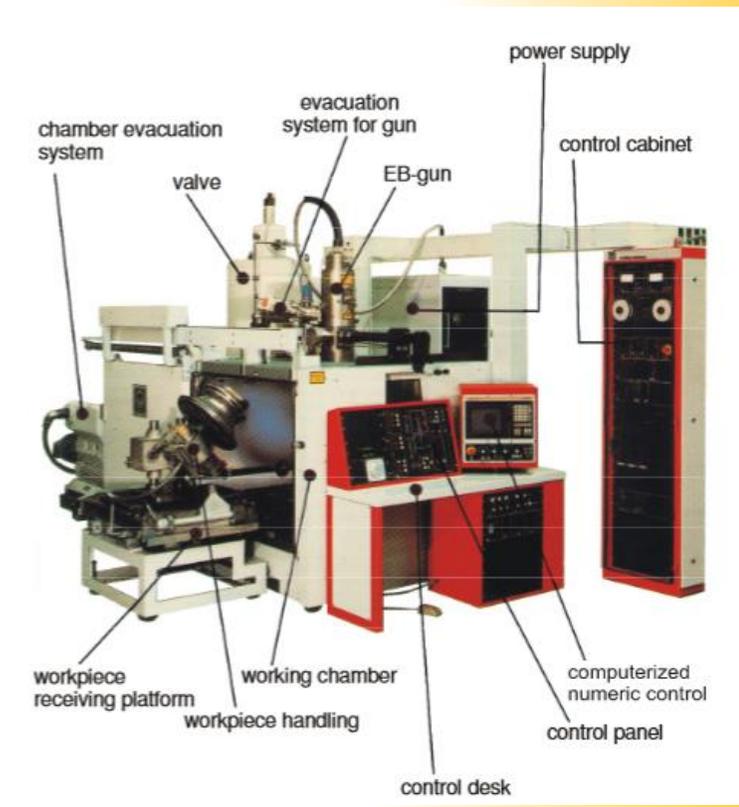
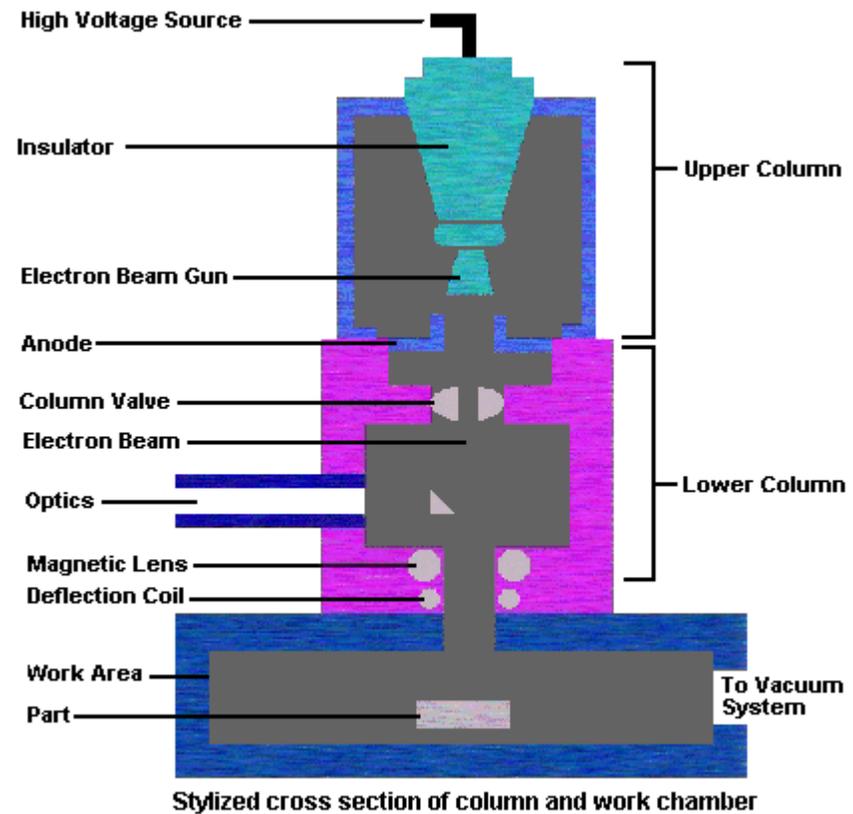
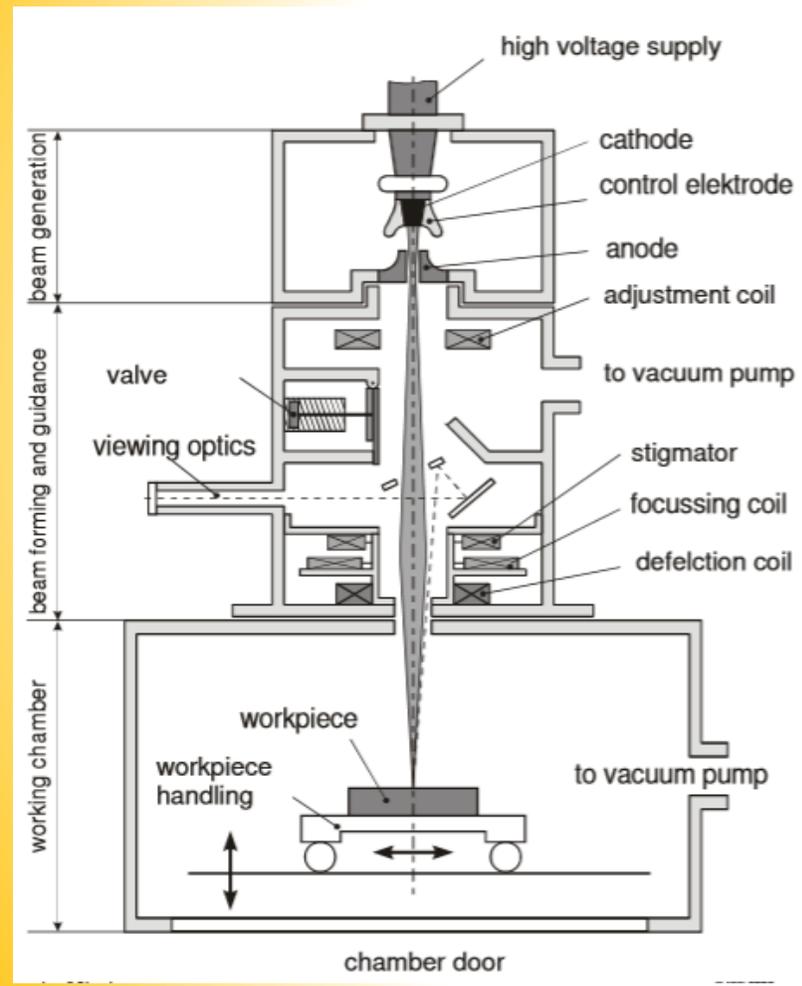
heat conducting welding



deep penetration welding

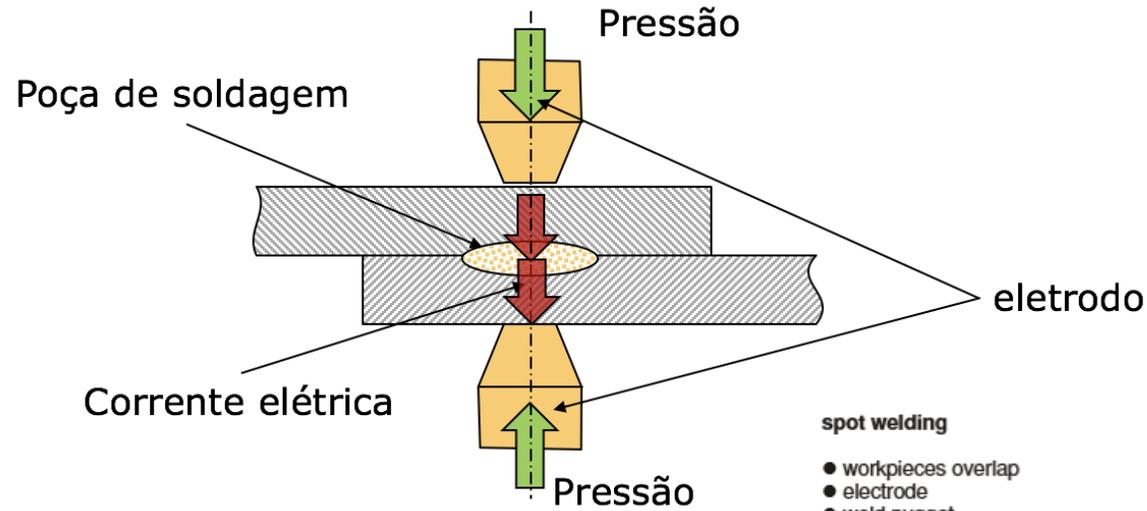


Source: RWTH Aachen -ISF - Welding and Joining Institute

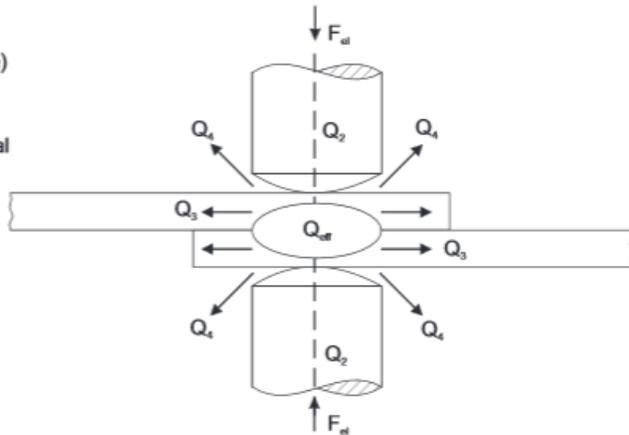




► Visão geral do processo

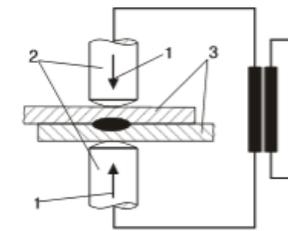


- $F_{el}$ : electrode force
  - $Q_{eff}$ : effective heat
  - $Q_{total}$ : total heat input
  - $I$ : current (time dependence)
  - $Q_1$ : heat losses
  - $Q_2$ : losses into the electrodes
  - $Q_3$ : losses into the sheet metal
  - $Q_4$ : losses by heat radiation
  - $R(t)$ : total resistance
  - $R_{material}(t)$ : material resistance
  - $R_c(t)$ : contact resistance
- $$Q_{eff} = Q_{total} - Q_{11}$$
- $$Q_{total} = C \int_{t=0}^{t=t_1} I^2(t) R(t) dt$$
- $$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$
- $$R(t) = R_{material}(t) + R_c(t)$$



### spot welding

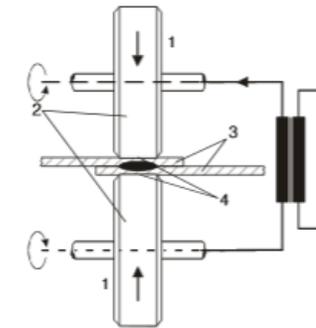
- workpieces overlap
- electrode
- weld nugget



- 1 electrode force
- 2 electrodes
- 3 production part

### roller seam welding

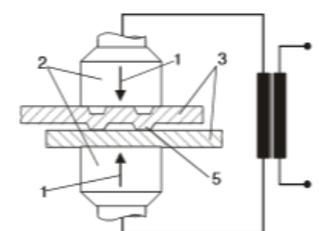
- workpiece usually in general overlap
- driven roller electrode
- spot rows (stitch weld, roller spots)



- 4 loaded area

### projection welding

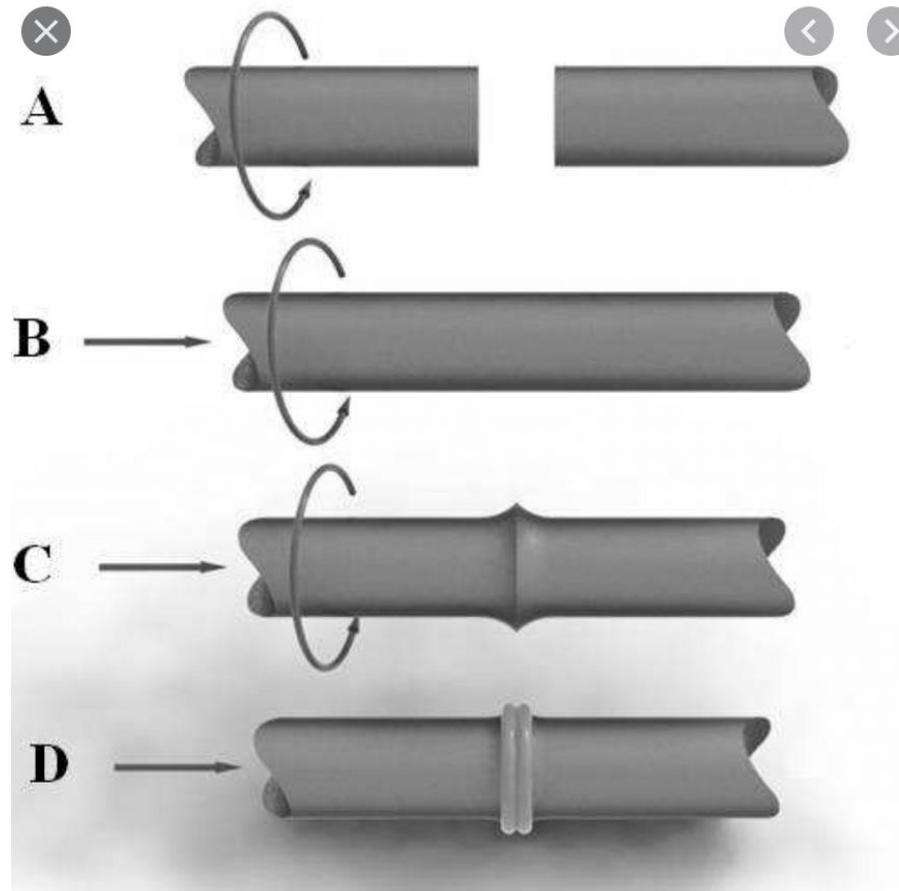
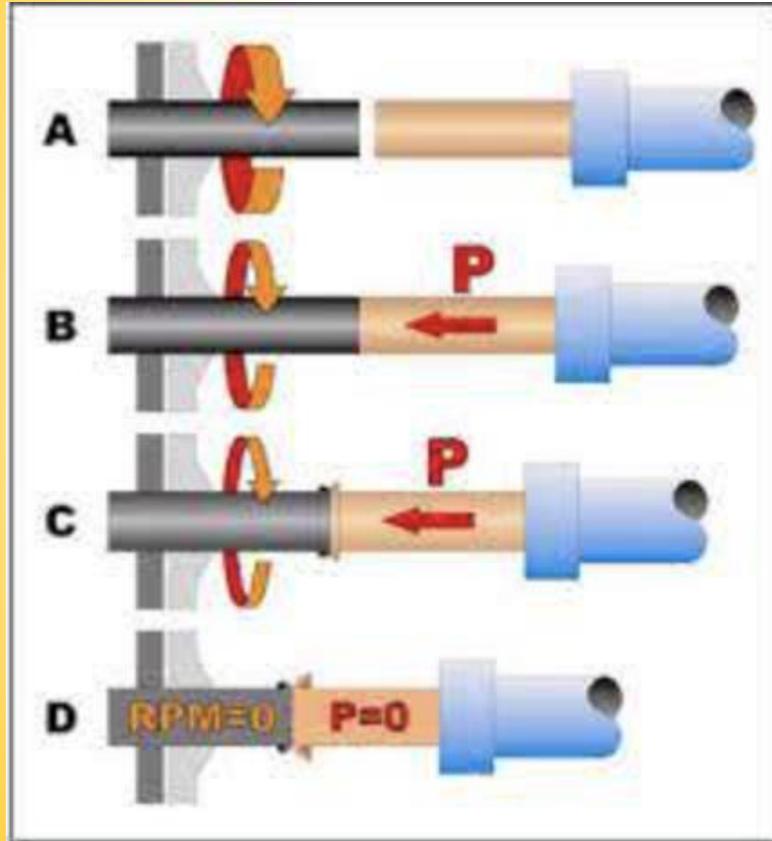
- workpieces with elevations (concentration of electricity)
- workpieces overlap
- pad electrode
- several joints in a single weld
- weld nugget joint



- 5 projection



# Soldagem por atrito



[https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Sequencia-basica-da-solda-por-atrito-A-Rotacao-de-uma-das-pecas-B-Inicio\\_fig1\\_273062197](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Sequencia-basica-da-solda-por-atrito-A-Rotacao-de-uma-das-pecas-B-Inicio_fig1_273062197)

<https://blogdotwebcarrepassedotcomdotbr.wordpress.com/2017/04/25/voce-conhece-solda-por-atrito-olha-que-impressionante/>

<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/50798/R%20-%20E%20-%20ANTONIO%20CARLOS%20NIEDWIESKI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

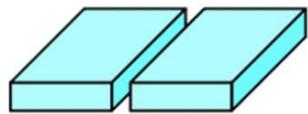
Izabel Machado – machadoi@usp.br



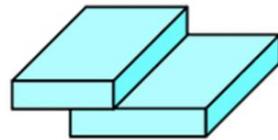
- ▶ Projeto de juntas soldadas se refere a forma como as peças a serem soldadas são posicionadas e alinhadas entre si de forma a garantir a máxima resistência, penetração, menor consumo de material e custo.

- ▶ Juntas compostas

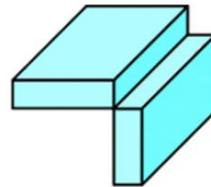
- ▶ Existem cinco tipos principais de juntas soldadas



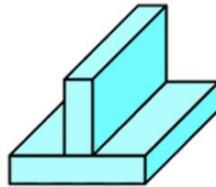
Face ou topo



Sobrepostas



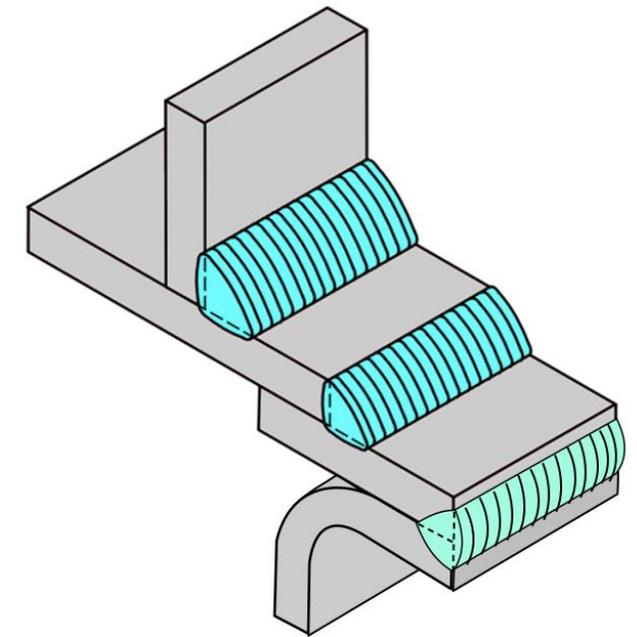
em ângulo



em T

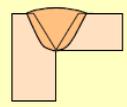
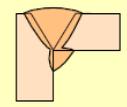
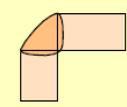
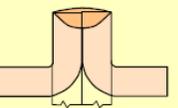
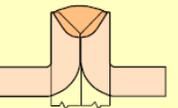
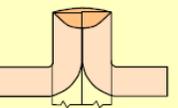
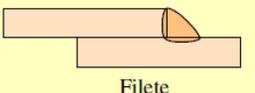
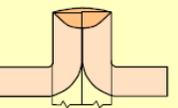
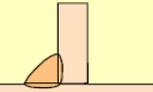
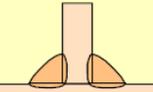
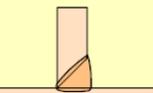
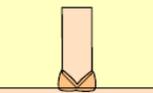
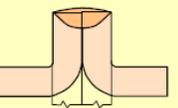
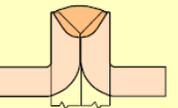


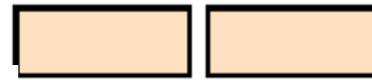
de face em ângulo



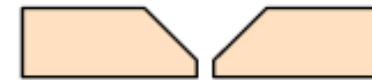


Tipos de juntas e exemplos de chanfros:

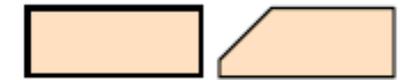
Juntas de Topo			
			
			
			
Juntas de Canto			
			
			
Juntas de Aresta			
Juntas Sobrepostas			
			
Juntas de Ângulo			
			
			
			



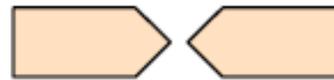
I



V



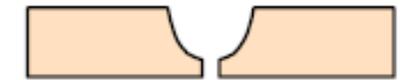
meio V



X



K



U

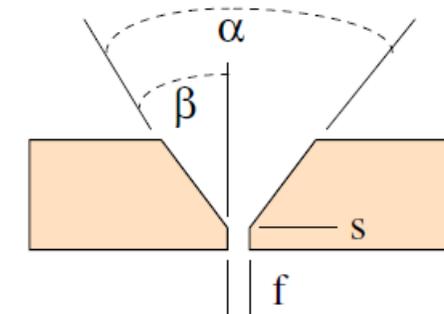
- Elementos de um Chanfro:**

Encosto ou nariz (s) (nose, groove face): Parte não chanfrada de um componente da junta.

Abertura, folga ou fresta (f) (root opening): Menor distância entre as peças a soldar.

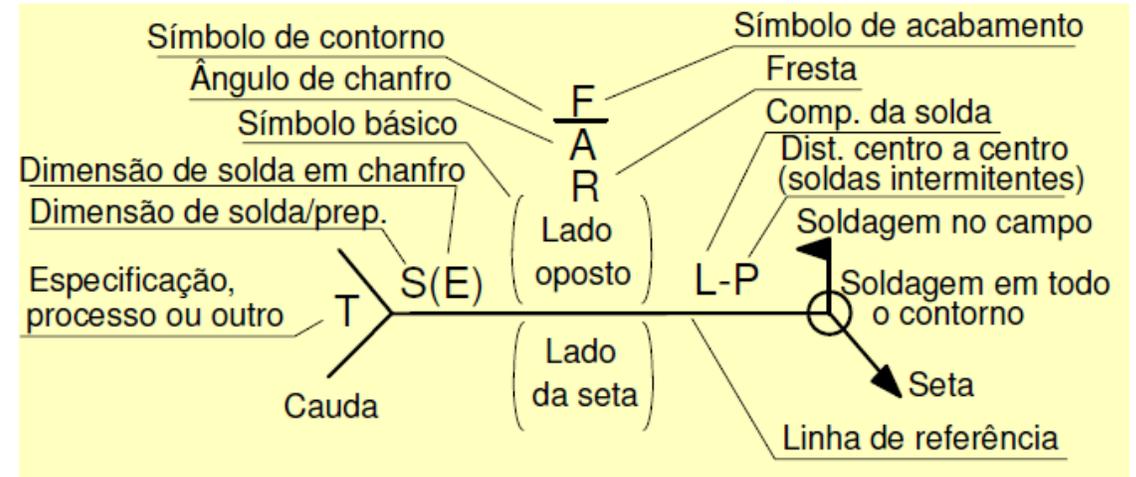
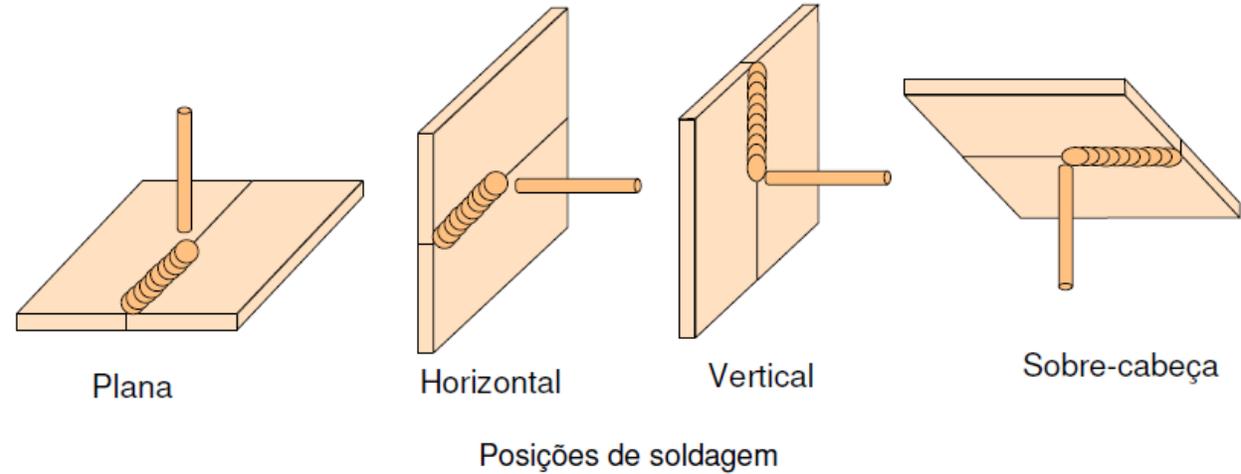
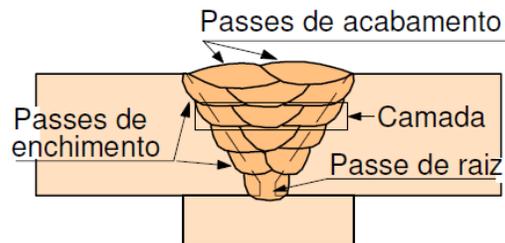
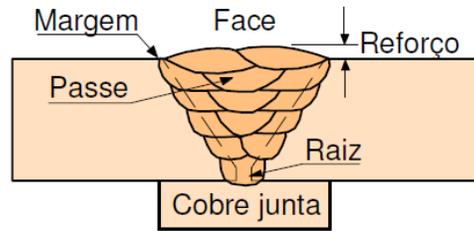
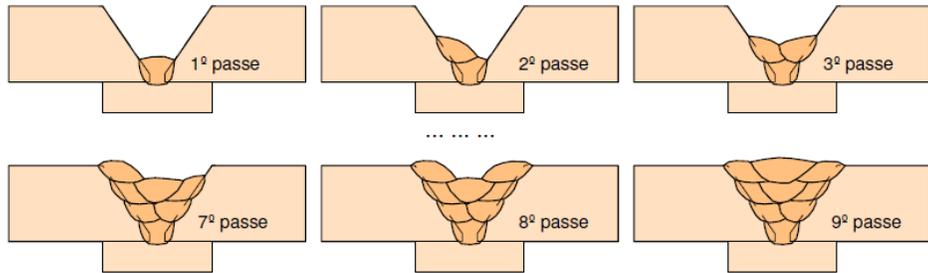
Ângulo de abertura da junta ( $\alpha$ ) (groove angle) e ângulo de chanfro ( $\beta$ ) (bevel angle).

Os elementos de um chanfro são escolhidos de forma a permitir um fácil acesso até o fundo da junta, mas, idealmente, com a menor necessidade possível de metal de adição.



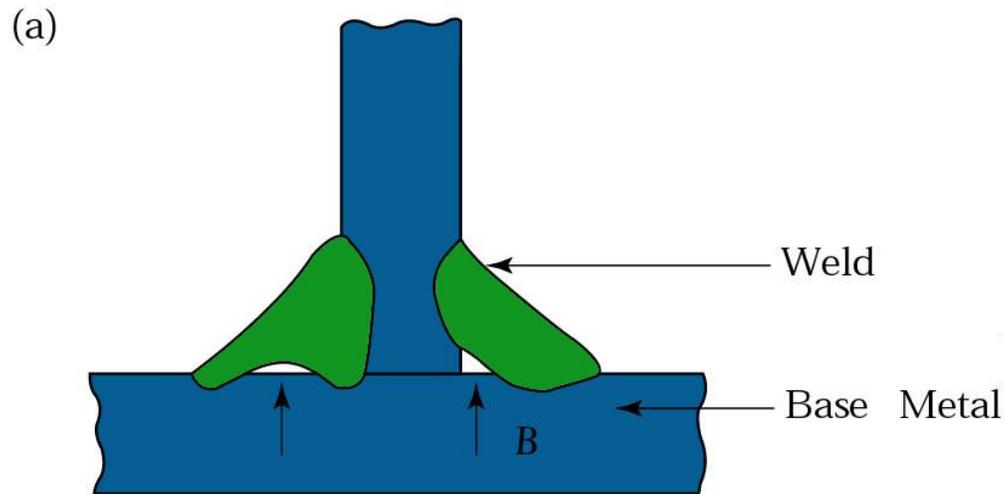


Execução de uma solda de vários passes:

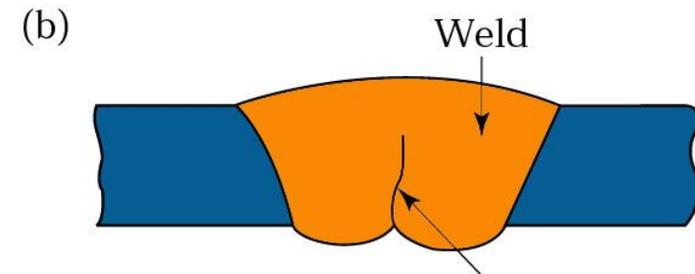


Símbolo de soldagem e alguns de seus componentes e símbolos suplementares.

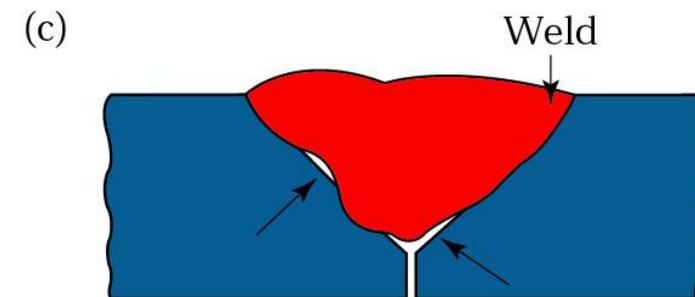
- ▶ Fusão incompleta
- ▶ Causas: parâmetros incorretos de soldagem



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

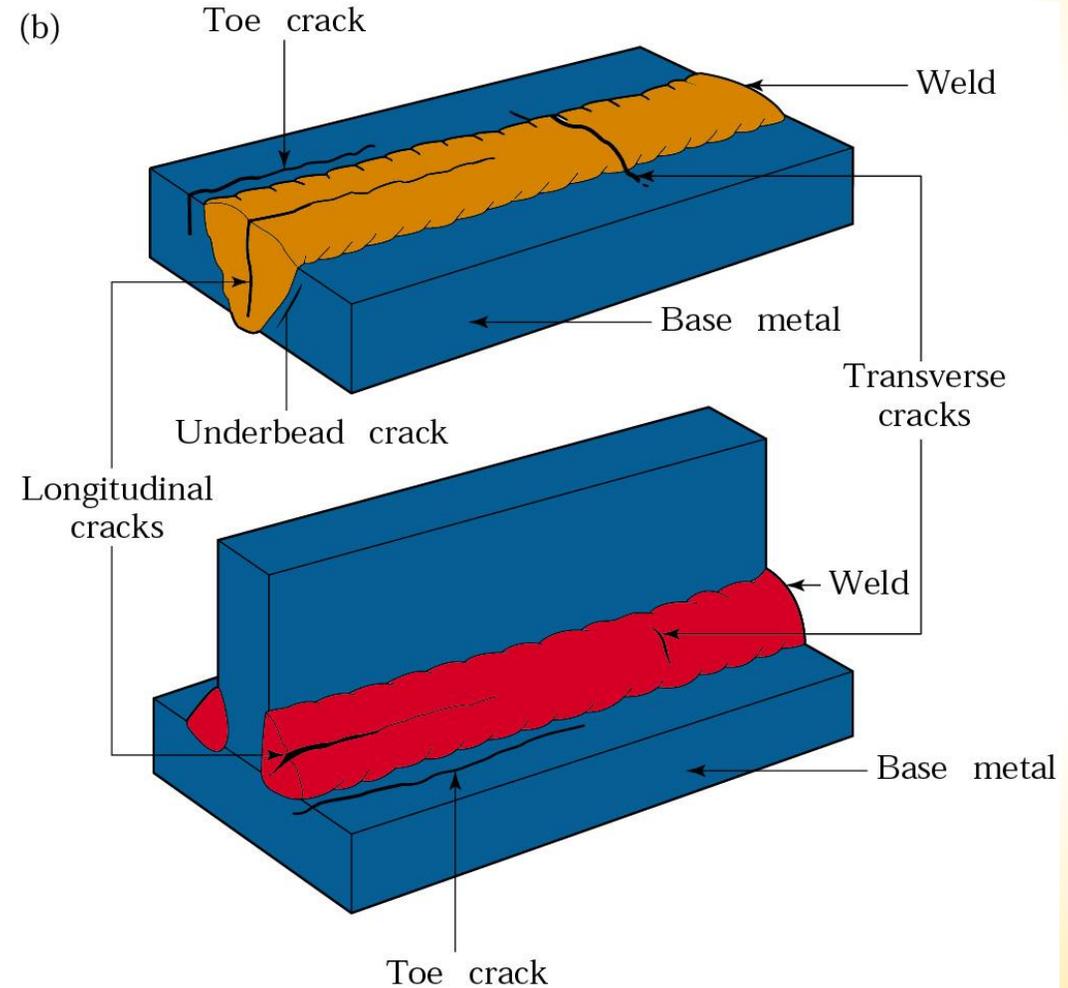
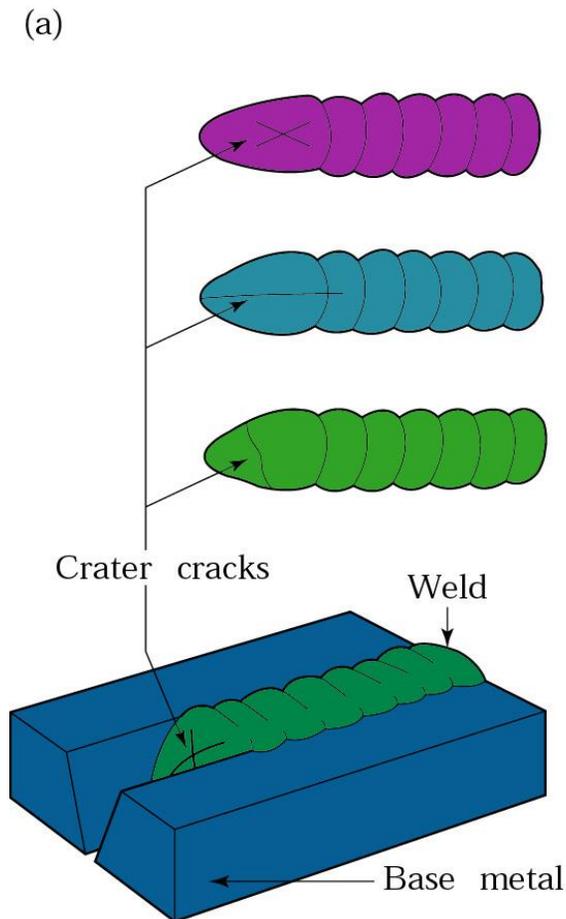


Incomplete fusion in a groove weld



# Defeitos de juntas soldadas

## ▶ Trincas

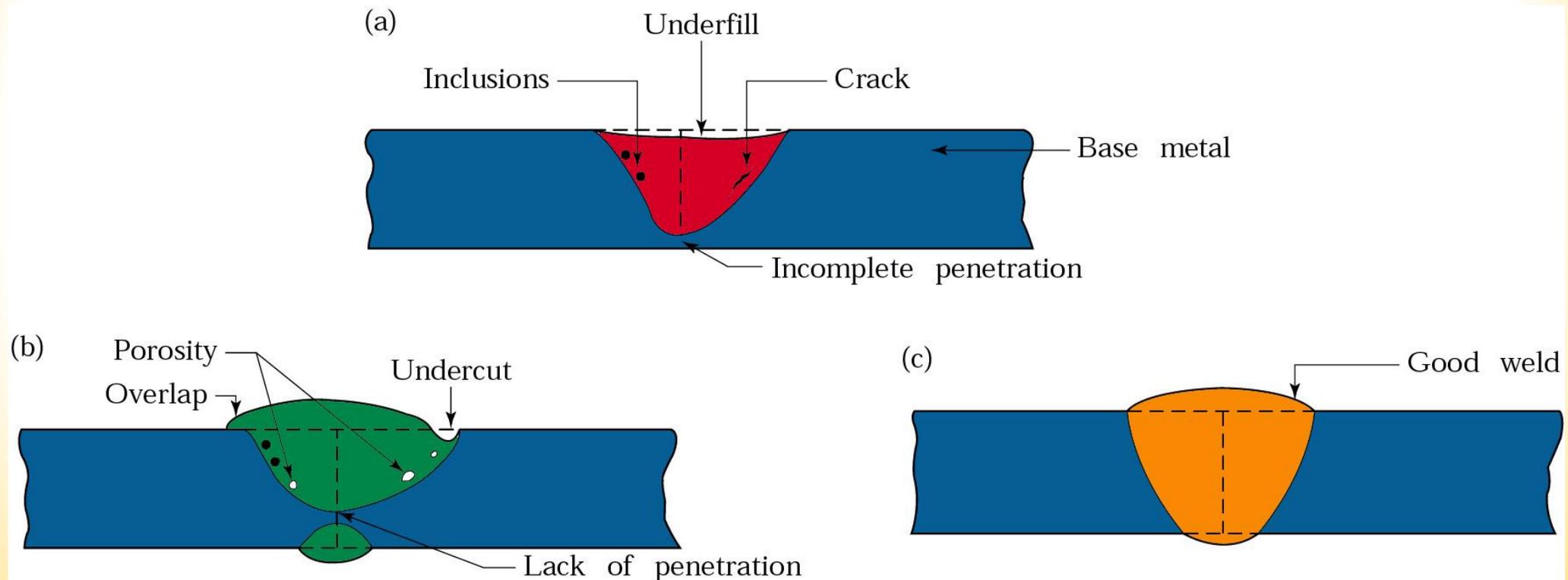


Izabel Machado – machadoi@usp.br



# Defeitos de juntas soldadas

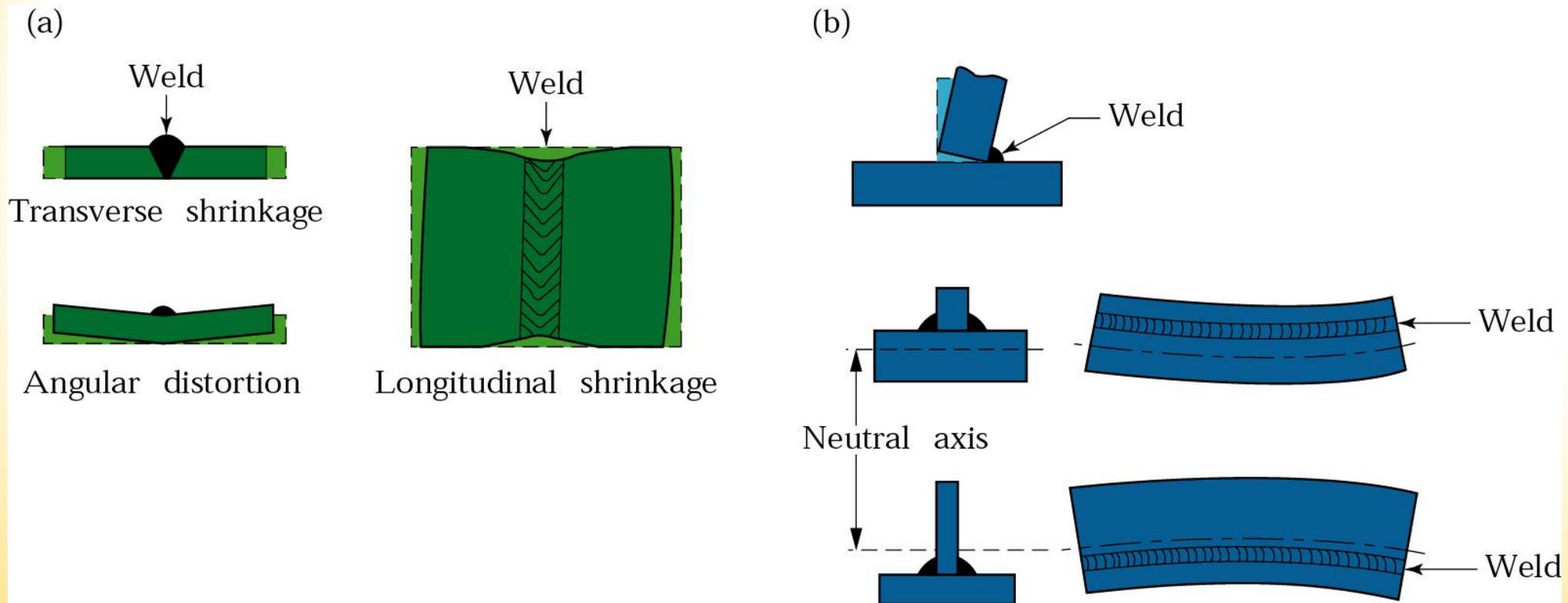
- ▶ Descontinuidades na fusão
- ▶ Causas: parâmetros incorretos



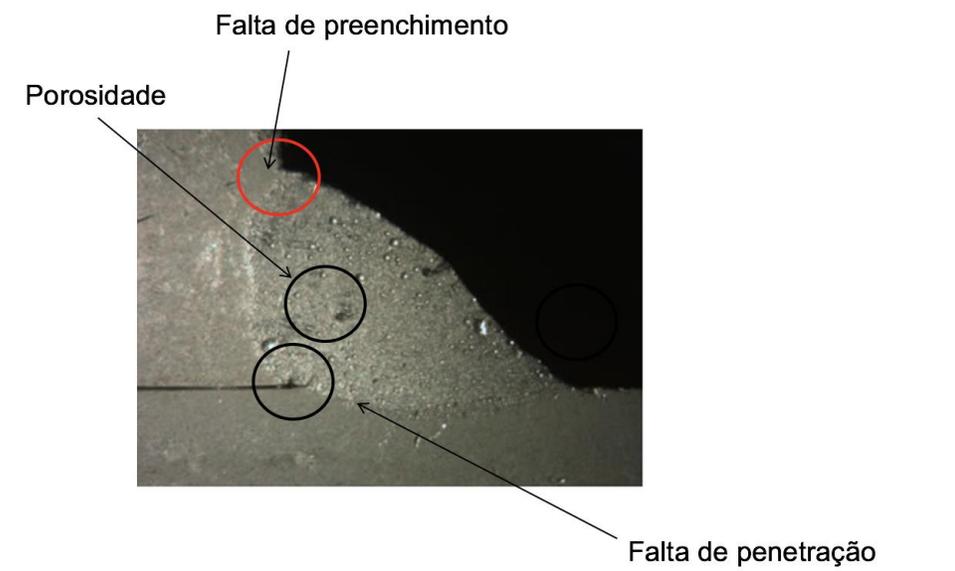
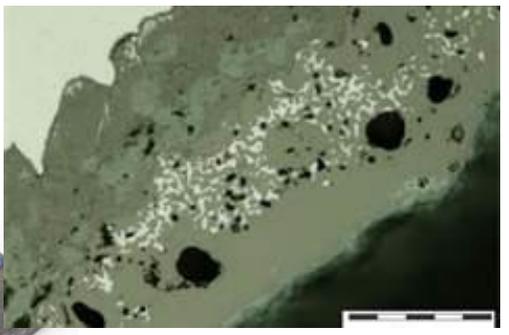
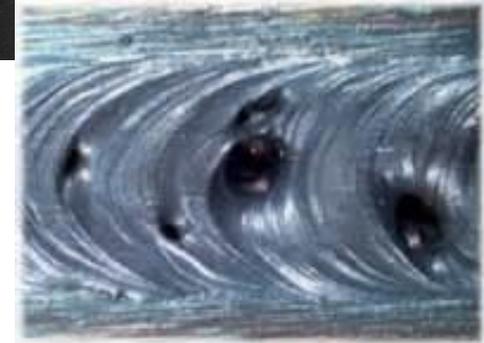
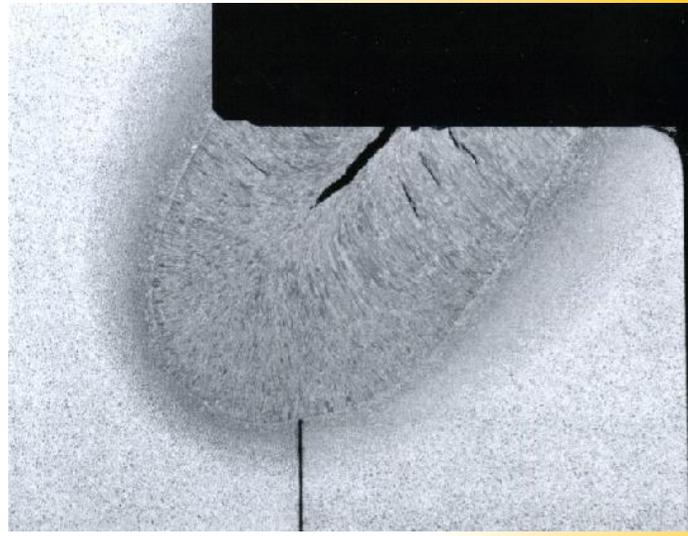
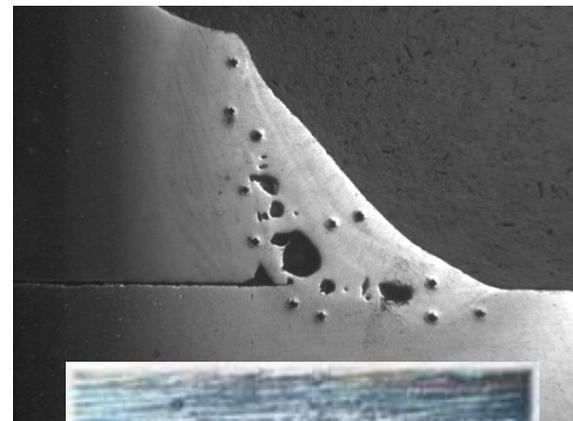


# Defeitos de juntas soldadas

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



Izabel Machado – machadoi@usp.br



Izabel Machado – machadoi@usp.br

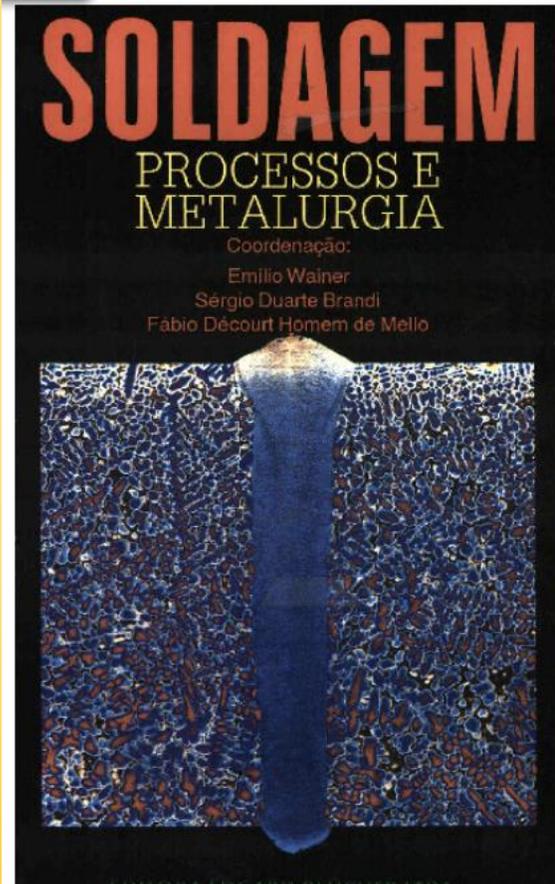


## Sumário

- Soldagem e Solda
- Princípios do processos de soldagem
- Metalurgia dos processos de soldagem
- Exemplos de processos de soldagem
- Juntas
- Defeitos



## Referências



PDF

Copyrighted Materials



### Welding Handbook

Ninth Edition  
Volume 1

#### WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY

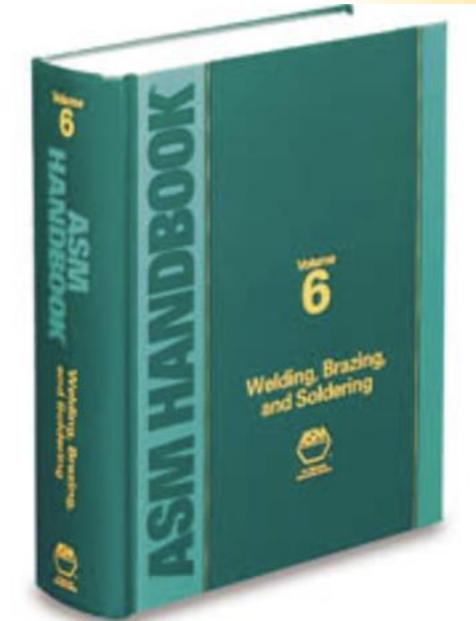
Prepared under the direction of the  
Welding Handbook Committee

Cynthia L. Jenney  
Annette O'Brien  
Editors



ISO9001  
Registered Organization

American Welding Society  
550 N.W. LeJeune Road  
Miami, FL 33126



## ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering

Editor: D.L. Olson, T.A. Siewert, S. Liu, G.R. Edwards | Hardcover | Product code: 06480G | ISBN: 978-0-87170-382-8

Classified as:  Brazing  Material Selection ... [more](#)



<https://cad.cursosguru.com.br/cnc-funcoes-preparatorias-para-centros-usinagem-fanuc/>

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4188303/mod\\_resource/content/1/Teórica%201%20-%20CNC.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4188303/mod_resource/content/1/Teórica%201%20-%20CNC.pdf)

<https://web.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC/Downloads/Apontamentos/Exemplos%20de%20Programas%20em%20CNC.pdf>

<http://cnctecnologia.no.comunidades.net/lista-das-funcoes-preparatoria>