

# SOLDAGEM



## **O que é:**

A Soldagem é o processo de união de materiais (particularmente os metais) mais importante do ponto de vista industrial sendo extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Outro conceito muito utilizado: é a operação que visa a união de duas ou mais peças, assegurando na junta, a continuidade das propriedades físicas e químicas do material. Existe um grande número de processos de soldagem diferentes, sendo necessária a seleção do processo (ou processos) adequado para uma dada aplicação. A soldagem não ocorre tão facilmente pois a aproximação das superfícies a distâncias suficientes para a criação de ligações químicas entre os seus átomos é dificultada pela rugosidade microscópica e camadas de óxido, umidade, gordura, poeira e outros contaminantes existentes em toda superfície metálica.

## **Usos:**

A sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos (pontes, navios, vasos de pressão, etc.). Atualmente a soldagem é utilizada também em plásticos e vidros. É muito usada em diversas áreas: construção naval, civil, ferroviária, indústria aeronáutica, automobilística e indústria metalúrgica.

## **Histórico:**

Segundo pesquisas, há aproximadamente dois mil anos, a soldagem por forjamento foi descoberta. No século XIX, surgiu a soldagem por arco elétrico e no século XX a soldagem TIG, MIG, MAG, entre outras. Atualmente existem cerca de 50 processos usados industrialmente. A indústria automobilística impulsionou o avanço da tecnologia de soldagem no século XX. Esse processo de fabricação permitiu a redução de peso do chassi e a redução nos custos de montagem do veículo.

## **Vantagens e desvantagens**

Vantagens	Desvantagens
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Juntas de integridade e eficiência elevadas</li> <li>2. Grande variedade de processos</li> <li>3. Aplicável a diversos materiais</li> <li>4. Operação manual ou automática</li> <li>5. Pode ser altamente portátil</li> <li>6. Juntas totalmente estanques (ao contrário da rebitagem)</li> <li>7. Custo, em geral, razoável</li> <li>8. Junta não apresenta problemas de perda de aperto</li> <li>9. Montagens de um único lado de acesso (ao contrário do aparafusamento)</li> <li>10. Suporta esforços no próprio plano (ao contrário da rebitagem)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prazo de validade limitado</li> <li>2. Apresentam formulações numerosas e variadas</li> <li>3. Exigem controle, montagem e testes complexos</li> <li>4. Somente testes destrutivos</li> <li>5. Exigem mão-de-obra altamente capacitada</li> <li>6. Às vezes são necessários processos de cura (forno)</li> <li>7. Exigem limpeza minuciosa</li> <li>8. Exigem preparação das superfícies a serem unidas</li> </ol>

### Conceitos importantes:

**Material de Base:** É o material que constitui as partes a unir.

**Material de Adição:** É o material que será usado como enchimento no processo de soldagem, capaz de preencher as folgas entre as superfícies a unir. O material adicional é de mesma natureza das partes e será usado para assegurar a continuidade de propriedades no caso da soldagem por fusão, de chapas ou peças relativamente espessas. Ele preencherá a folga entre as superfícies.

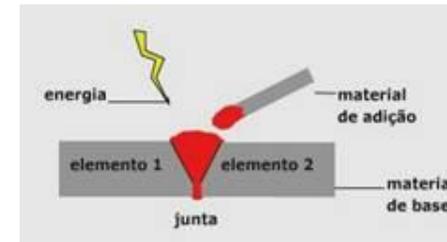
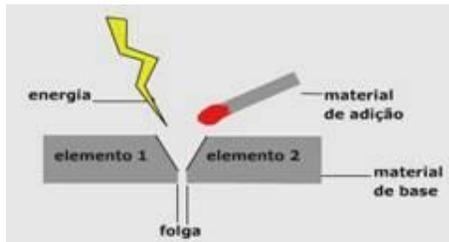
### Observação:

Soldagem: é o processo pelo qual se consegue a união.

Solda: é a zona de união onde houve solubilização.

Eletrodo: sua principal função é conduzir a corrente elétrica até o arco.

Poça de fusão: é a região em que o material a ser soldado está no estado líquido.



### Parâmetros físicos:

A quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é chamada de energia de soldagem ou aporte térmico (representada pelas letras E ou H cuja unidade usual é em kJ/mm, kJ/cm ou kJ/cm).

Para a soldagem a arco elétrico, o valor de E em J/mm é obtido pela fórmula:

$$E = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v}$$

onde  $\eta$  é a eficiência de transferência;

V é a tensão em Volts (V);

I é a corrente elétrica em Ampéres (A);

v é a velocidade linear de soldagem em mm/s.

Processos de elevada energia são aqueles processos onde grande quantidade de calor é adicionada, devido geralmente a altas tensões e correntes, por exemplo, na soldagem a arco submerso.

### Classificação dos processos:

A soldagem pode ser dividida em dois grandes grupos de operações:

- Soldagem por fusão;
- Soldagem por pressão (deformação).

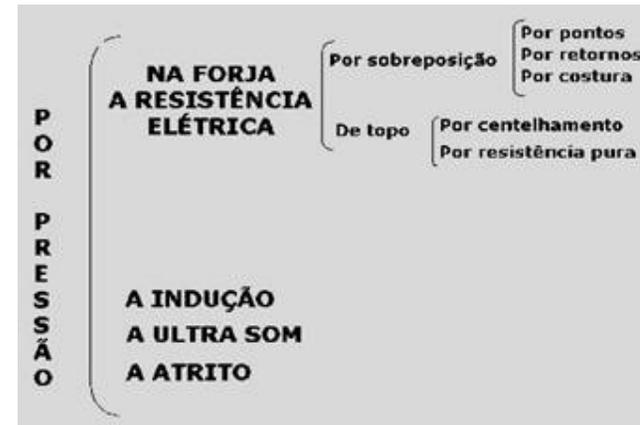
## Soldagem por fusão

A energia é aplicada para produzir calor capaz de fundir o material de base. Diz-se neste caso que a solubilização ocorre na fase líquida que caracteriza o processo de soldagem por fusão. Assim, na fusão, a soldagem é obtida pela solubilização na fase líquida das partes a unir, e subsequentemente, da solubilização da junção.

## Soldagem por pressão (ou deformação)

A energia é aplicada para provocar uma tensão no material de base, capaz de produzir a solubilização na fase sólida, caracterizando a soldagem por pressão.

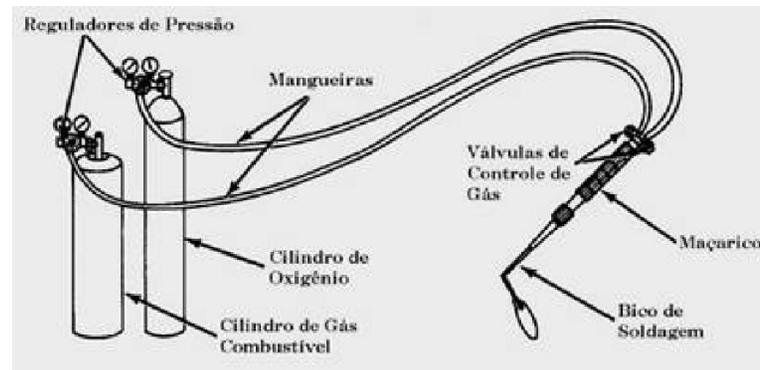
## Principais processos de Soldagem



## Principais processos de soldagem por Fusão

- **Soldagem à chama:** A fusão origina-se do calor gerado pela queima de um gás, com o material de adição introduzido separadamente. É atualmente o processo mais rudimentar de soldagem.

**Soldagem Oxi-Gás:** envolve a fusão do metal de base e normalmente de um metal de enchimento, usando uma chama produzida na ponta de um maçarico. O gás combustível e o oxigênio são combinados em proporções adequadas dentro de uma câmara de mistura. O metal fundido e o metal de enchimento, se usado, se misturam numa poça comum e se solidificam ao se resfriar. Neste processo, o soldador tem controle sobre o calor e a temperatura. É muito usado em operações de conserto, peças finas e tubos de pequeno diâmetro. O equipamento utilizado na soldagem oxi-gás é normalmente portátil, versátil e de custo baixo. O acetileno é o gás mais usado nesse processo, devido a sua alta taxa de propagação de chama e alta temperatura. Usos: os materiais fundidos por oxi-gás são ferro-fundido, chumbo, alumínio, ligas de zinco, aços, aço galvanizado, latão, e bronze, dependendo da chama utilizada. O equipamento utilizado para solda oxi-gás é mostrado na figura:





Soldagem oxi-acetilênica com metal de adição

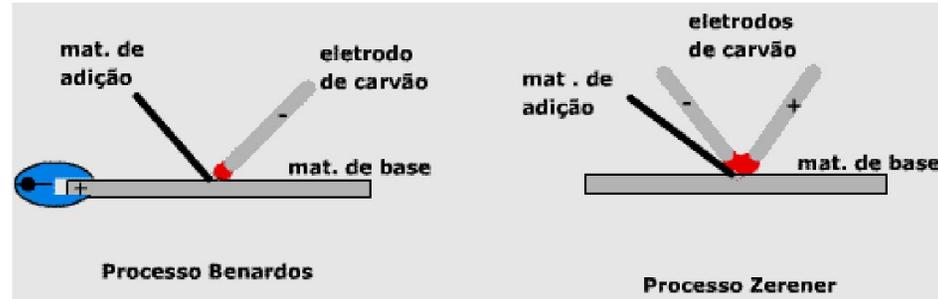


Regulagem da chama no maçarico

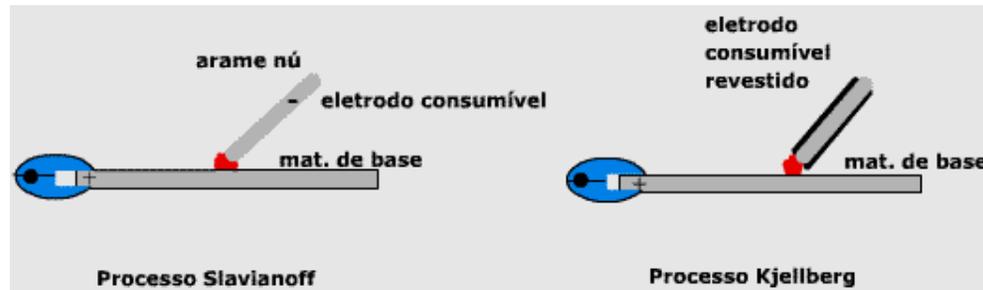
- **Soldagem elétrica a arco voltaico:** A fusão origina-se da ação direta e localizada de um arco voltaico.

Vantagens: o arco permite obter elevadas temperaturas num pequeno espaço, limitando a zona de influência calorífica. Permite o uso de qualquer atmosfera gasosa, que quando neutra, proporciona menor contaminação do banho metálico.

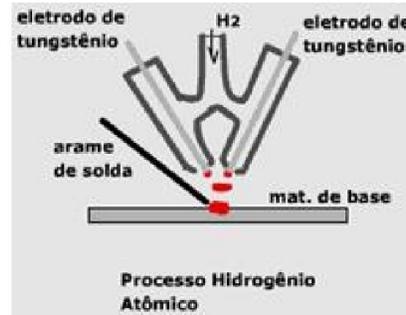
Origens e evolução: o arco voltaico aplicado à soldagem foi introduzido por N. R. Bernardos em 1887. O princípio era um arco voltaico entre um eletrodo de carvão e a peça. Fundia-se o material da zona a unir sem consumir o eletrodo. O material de adição era introduzido separadamente. Em 1889, Zereiner introduziu no processo um segundo eletrodo, fazendo o arco entre os dois eletrodos, sendo que a corrente não mais percorria a peça, permitindo, portanto a soldagem de materiais não condutores.



O processo de *Slavianoff*, de 1892 introduziu a conexão elétrica na própria vareta do material de adição, tornando o eletrodo consumível. Em 1905 *Kjellberg* criou o eletrodo revestido, que permitiu incorporar substâncias, para produzir efeitos especiais na solda. A evolução posterior levou ao uso do arco protegido, inicialmente com hidrogênio, e posteriormente com gases neutros.



Pouco tempo depois surgiu a solda com arco protegido a hidrogênio. Este processo, conhecido como soldagem com "hidrogênio atômico" ou soldagem "arcatômica", utilizava um arco voltaico em atmosfera de hidrogênio, entre dois eletrodos permanentes de tungstênio.



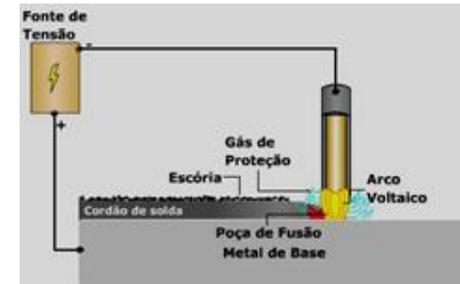
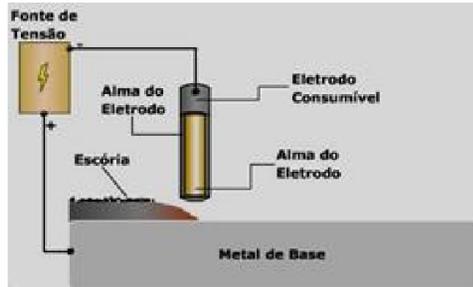
O hidrogênio se dissocia no arco elétrico, passando para o estado atômico com absorção de energia. Em contato com o metal de solda ou com as peças a unir, mais frios, o hidrogênio volta ao estado molecular, liberando calor e aumentando o rendimento térmico do processo. A chama produzida pela queima do hidrogênio também contribuía para o rendimento térmico. A fonte de energia era um transformador especial para produzir a alta tensão para acender o arco (acima de 70 volts), mas sem perigo para o soldador. O processo caiu em desuso quando gases neutros passaram a ser usados com atmosfera de soldagem.

## Processos atuais de soldagem a arco voltaico

### Soldagem com eletrodo revestido

É o processo mais usado, devido a sua versatilidade. É indicado para soldagem de aços.

**Eletrodo revestido:** Os ingredientes que formam o revestimento são triturados, dosados e misturados até a obtenção de uma massa homogênea. A massa é conformada sobre as varetas metálicas, com comprimentos padrão a partir de 300 mm. Em seguida o revestimento de uma das extremidades é removido para permitir o contato elétrico com o porta-eletrodo. O eletrodo pode ter polaridade negativa ou positiva dependendo da penetração desejada. A tomada de corrente, portanto é feita numa extremidade, e o arco arde na outra. A escolha dos ingredientes do revestimento determina o resultado desejado, como eletrodos básicos, ácidos, etc.



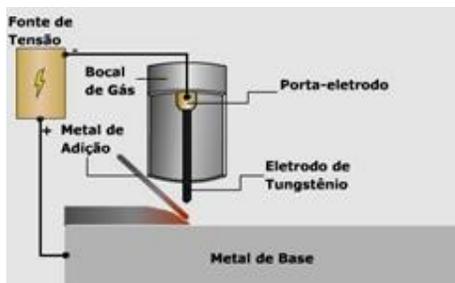
A escória é retirada pela picadeira (um tipo de martelo) e depois uma escova de fios de aço limpa o cordão de solda.

## Soldagem TIG

**Características Gerais:** TIG - sigla proveniente do inglês Tungsten Inert Gas (no alemão denomina-se WIG, sendo o W o símbolo químico do tungstênio= volfrâmio) - é a denominação dada ao processo de soldagem que utiliza eletrodos de tungstênio em atmosfera de gás inerte. O processo pode ser empregado com e sem metal de adição. A proteção da região da poça de fusão é feita por gases inertes como Hélio, Argônio ou mistura de ambos (dependendo do metal a ser soldado).

**Eletrodos:** embora chamados de permanentes, os eletrodos de tungstênio são consumíveis. Em condições normais, os eletrodos mais comuns (150 mm e 170mm) duram cerca de 30 horas de arco aberto.

**Grau de automação:** Na maioria dos casos o processo é manual. Uma das mãos conduz a tocha e a outra conduz a vareta do material de adição, como no processo de soldagem oxi-acetilênica. O processo também pode ser semi-automático ou totalmente automático, embora estas opções não sejam comuns.



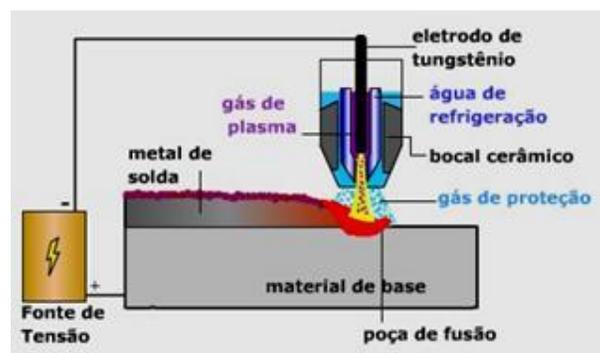
**Observação:** a soldagem TIG automática existe em duas versões: sem metal de adição e com metal de adição. Ambas as versões aplicam-se para fabricação em série, no caso de chapas finas de ligas leves, inoxidáveis, alguns aços comuns ou ligas. A solda tem um belo aspecto, com excelente regularidade de penetração e alta produtividade. É indicada para grandes séries onde sejam exigidos: trabalho limpo, esmero e precisão de montagem. **Usos:** O processo TIG é especialmente indicado para alumínio, magnésio e suas respectivas ligas, aço inoxidável e para metais especiais como titânio e molibdênio. É também utilizado para aços comuns e ligados sobretudo para espessuras pequenas e médias. Com a utilização de metal de adição pode-se soldar chapas espessas, principalmente em ligas leves e aços inoxidáveis.

**Custos:** os materiais de consumo (gás inerte e eletrodo de tungstênio) são relativamente caros. A mão de obra empregada deve ter boa formação.

**Indicações:** o processo TIG é usado para aços comuns e especiais, principalmente para pequenas espessuras (menores do que 2 ou 3 mm) onde é possível obter melhor aspecto da solda e menores deformações nas peças. É o principal processo quando se trata de ligas leves e metais especiais (por exemplo, quadros de bicicletas e indústria aeroespacial). O TIG é considerado insubstituível quando se trata de obter bom aspecto da junta combinado com baixas tensões internas e pequenas deformações no aço inoxidável.

## Soldagem Plasma

**Características:** Embora o arco voltaico seja um plasma, somente um dos processos recebe o nome de soldagem plasma. A particularidade que levou a esta designação é o fato que o calor chega até a peça sem a existência de um arco conectado a ela. O arco existente é estabelecido dentro de uma tocha, entre um eletrodo de tungstênio e um bocal de cobre que o circunda.

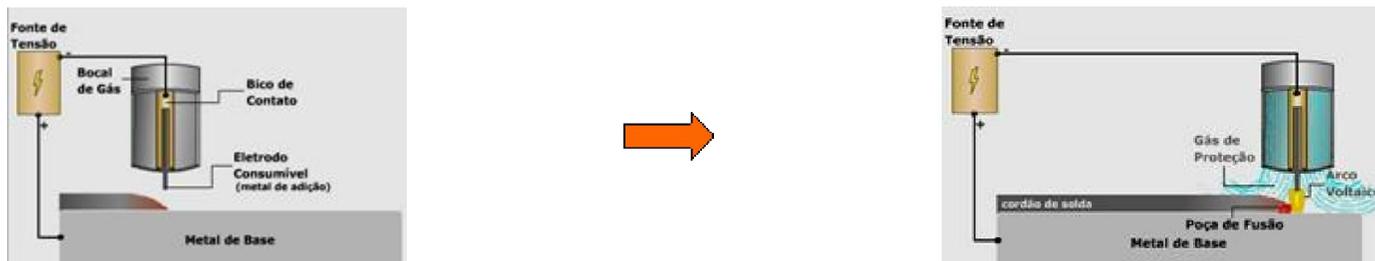


## Soldagem MIG / MAG

**Características:** MIG (Metal Inert Gas) é a denominação que se dá ao processo que utiliza um arco em atmosfera de gás inerte que arde visível entre a peça e um eletrodo nu consumível. No caso de ser usado gás ativo, denomina-se o processo de MAG (do inglês, Metal Active Gas). Nos Estados Unidos, o processo é conhecido como GMAW (Gas Metal Arc Welding). Esses dois processos se diferenciam pelo tipo de gás usado. A soldagem MIG é comumente usada em materiais não-ferrosos (ex.: alumínio). A soldagem MAG é usada em materiais ferrosos como o aço.

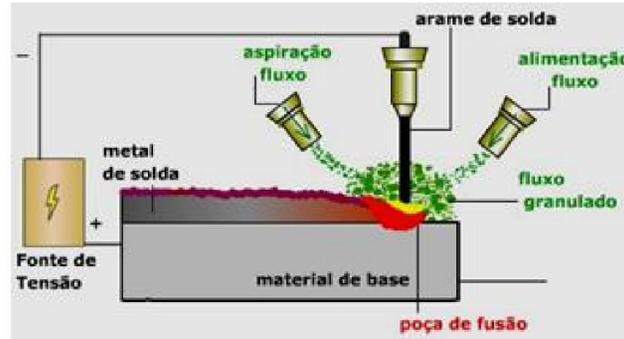
**Eletrodo:** é constituído de um arame fino (0,8 a 1,6 mm), bobinado em carretéis apropriados e conduzido até o arco através de pequenos rolos impulsadores acionados por um motor. O contato elétrico é feito por um deslizamento entre o fio e um; pequeno tubo de cobre colocado no interior do bocal de gás, imediatamente antes do arco elétrico.

**Observação:** Densidade de Corrente: Como o eletrodo é continuamente renovado e seu comprimento é relativamente pequeno, pode-se usar densidades de corrente extraordinariamente altas ( $300 \text{ A/mm}^2$ ), resultando em elevadas velocidades de fusão, até cinco vezes a que se consegue com eletrodos revestidos.



## Soldagem a Arco Submerso

**Características:** É conhecido na Alemanha por “processo Ellira” e nos Estados Unidos por “Uniomet”. No processo, um arame nu é alimentado continuamente e funde-se no arco voltaico sob a proteção de um fluxo de pó. Dependendo das condições (material, espessura da chapa, natureza da superfície exterior) trabalha-se com diferentes pós. Os pós são diferenciados por: tipo de fabricação, composição e granulação. O arco arde numa caverna dentro de um banho de escória, que ao solidificar-se recobre o cordão.



**Correntes e velocidade:** as densidades de corrente atingem  $150 \text{ A/mm}^2$  em arames-eletrodo de 2,4 mm (duas vezes o diâmetro usado no processo MIG/MAG). Como o arco é enclausurado (na escória líquida), o rendimento térmico é elevado. Estes dois fatores propiciam uma grande velocidade de fusão.

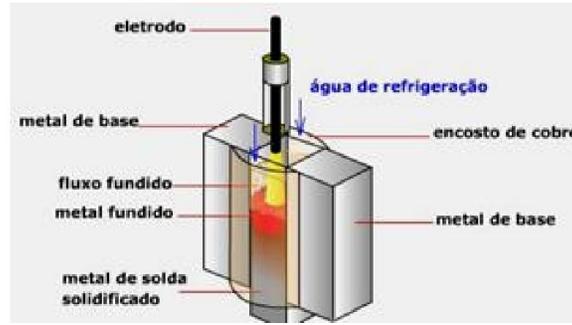
**Indicações:** Pode-se soldar chapas de até 15 mm de espessura sem chanfrar os bordos. Custo: Para chapas espessas, soldadas com várias passadas, é um dos processos mais econômicos. Entretanto se caracteriza por alto investimento inicial. Limitações: Limita-se a soldagem na posição plana e horizontal do filete.

**Observações adicionais:** Quando este processo é bem usado, revela-se como o mais econômico entre todos os processos. Pode ser empregado desde pequenas espessuras de chapa (2 ou 2,5 mm) até espessuras de até 60 mm em passes múltiplos. Entretanto a má preparação dos bordos (chanfro de oxí-corte ou mecânico), a errônea seleção de parâmetros de soldagem e o mau posicionamento das partes são responsáveis pela subutilização deste processo. O uso adequado acelera em curto prazo a amortização da instalação.

## Soldagem sob Escória Eletrocondutora

**Características Gerais:** Desenvolvido na Rússia, o processo denominado “soldagem sob escória eletrocondutora” é uma variante do arco submerso. Presta-se somente para a soldagem vertical ascendente e é insubstituível para soldagem de peças compactas com paredes de mais de 60 mm de espessura. Apesar de sua inclusão no grupo de processos a arco, não existe propriamente um arco voltaico. A corrente produz o calor necessário para a soldagem, ao atravessar um banho de escória. A escória é gerada da fusão do pó de soldar.

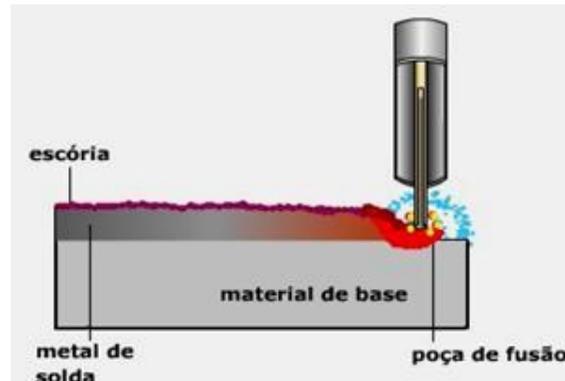
A poça de fusão se forma entre as peças (junta em I) entre dois encostos de cobre, refrigerados a água, como paredes laterais, e o material de adição solidificado como fundo. Este tipo de soldagem é usado em juntas de topo e em ângulo, soldagem de topo de tubos e operações de recobrimento.



## Soldagem com eletrodo tubular

**Características Gerais:** o processo é também denominado MAG com eletrodo tubular. Apresenta as vantagens de automação do MIG/MAG em conjunto com as vantagens da soldagem sob escória protetora dos eletrodos convencionais, não estando sujeito à manipulação de fluxos como no caso de arco submerso. É semelhante ao MG/MAG, mas com escória.

**Eletrodo:** O arame-eletrodo é tubular, contendo no seu núcleo ingredientes fluxantes do metal fundido, além de componentes geradores de gases e vapores protetores do arco e formadores de escória de cobertura.



**Correntes:** Em relação ao processo com eletrodo revestido convencional, permite o alcance de maiores densidades de corrente.

**Tipos/ versões:** São duas as versões do processo. Na primeira a proteção do arco é feita somente pela ação física e química do pó investido no arame-eletrodo (figura). Na segunda o arco fica envolvido por um fluxo adicional de gás protetor que flui do mesmo bocal de onde emerge o eletrodo tubular.

## Principais processos de soldagem por Pressão

### Soldagem por resistência

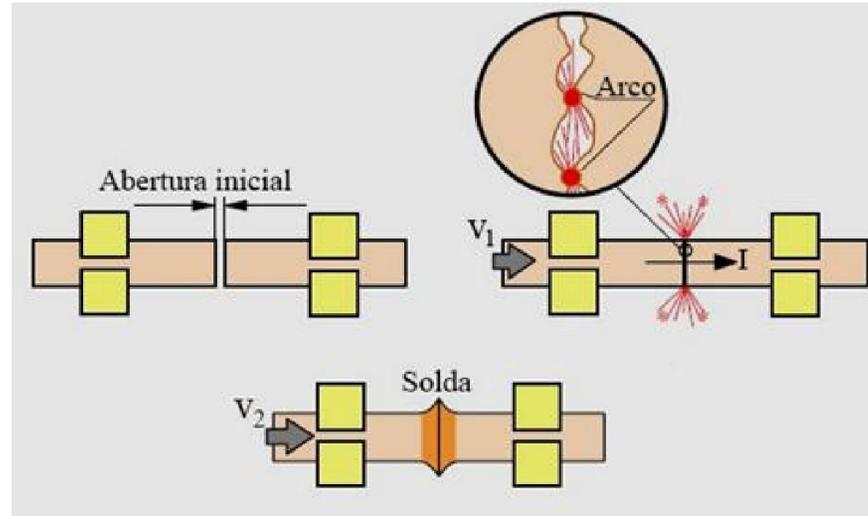
A soldagem por resistência (Resistance Welding, RW) engloba um grupo de processos de soldagem no qual o calor necessário à formação da junta soldada é obtido pela resistência a passagem da corrente elétrica através das peças que estão sendo soldadas. O aquecimento da região da junta pela passagem da corrente elétrica, abaixa a resistência mecânica do material, permitindo, através da aplicação de pressão, a deformação localizada e, assim, a soldagem por deformação da junta. Em alguns casos, ocorre uma fusão localizada na região da junta. Assim nesse processo de soldagem pode ocorrer a formação de solda tanto por fusão como por deformação. Entretanto, por razões didáticas, este tipo de soldagem será considerado um processo de soldagem por deformação.

Existem quatro tipos de processos de soldagem por resistência:

1. Soldagem por ponto (Resistance Spot Welding – RSW);
2. Soldagem de Projeção (Resistance Projection Welding – RPW);
3. Soldagem por costura (Resistance Seam Welding – RSEW);
4. Soldagem de topo por resistência (Upset Welding – UW).

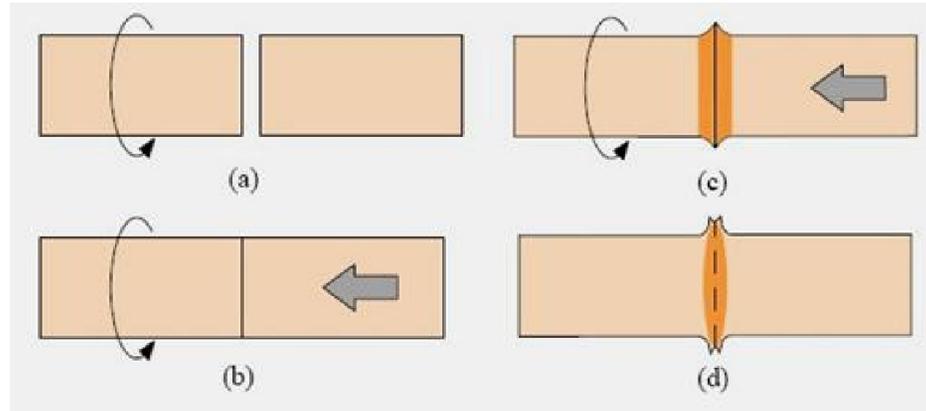
### Soldagem por centelhamento

A soldagem por centelhamento (Flash Welding – FW) é comumente classificada como um processo por resistência, pois apresenta diversas características e aplicações similares à soldagem de topo por resistência (UW). As peças a serem soldadas são aproximadas sem, contudo, as suas superfícies entrarem em contato. A energia elétrica é ligada e, então, as peças são aproximadas uma da outra com velocidade constante. Essa aproximação causa o aparecimento de um arco elétrico (centelhamento). Esse centelhamento causa a vaporização dos pontos em contato, permitindo, dessa forma, que novos pontos entrem em contato. Após certo tempo de centelhamento, quando todas as superfícies a serem unidas estiverem suficientemente aquecidas, a corrente de soldagem é desligada e as peças são fortemente pressionadas uma à outra, levando à formação da solda. Na figura seguinte,  $V_1$  é a velocidade de aproximação das peças e  $V_2$  a velocidade com que as peças são pressionadas, após o aquecimento adequado. Sendo que  $V_2$  é maior do que  $V_1$ .



### Soldagem por fricção (atrito)

A soldagem por fricção (Friction Welding - FW) é um processo que utiliza energia mecânica, em geral associada com a rotação de uma peça, para a geração de calor na região da junta a ser soldada. Após o aquecimento adequado da junta, as peças são pressionadas para a formação da junta. Esse processo é geralmente usado para a soldagem de peças de simetria cilíndrica (tubos e barras). Na figura seguinte, em (a), uma peça é colocada em rotação; em (b) é iniciada a força de compressão; em (c) inicia-se a formação da solda e em (d) a solda é completada.



### Soldagem por Ultra-som

A soldagem por ultra-som (Ultrasonic Welding – USW) produz a união das peças pela aplicação localizada de energia vibracional de alta frequência (ultra-som), enquanto as peças são mantidas sob pressão. A união ocorre por aquecimento e deformação plástica localizada das superfícies em contato. O processo é comumente utilizado na soldagem de juntas sobrepostas de metais dúcteis, similares ou não, de pequena espessura e para a união de plásticos (por exemplo, na indústria eletrônica e na fabricação de embalagens).

### Soldagem a frio

A soldagem a frio (Cold Welding – CW) consiste na aplicação de uma forte deformação localizada, à temperatura ambiente, nas peças a serem unidas. É utilizada em metais de alta ductilidade, como o alumínio e o cobre, tendo como aplicação típica a união de condutores de eletricidade.

### Anexo:

### TABELA DE SOLDABILIDADE

Material	Soldabilidade	ÓTIMA	BOA	REGULAR	DIFÍCIL
Aço baixo carbono		X			
Aço médio carbono			X	X	
Aço alto carbono					X
Aço inox		X	X		
Aços-liga				X	
Ferro fundido cinzento				X	
Ferro fundido maleável e nodular				X	
Ferro fundido branco					X
Ligas de alumínio			X		
Ligas de cobre			X		