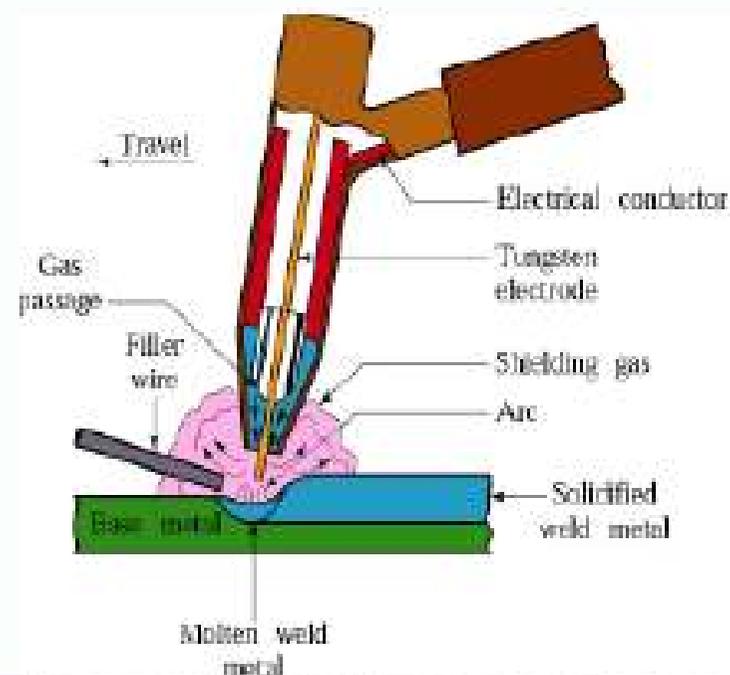


Processos de ligação



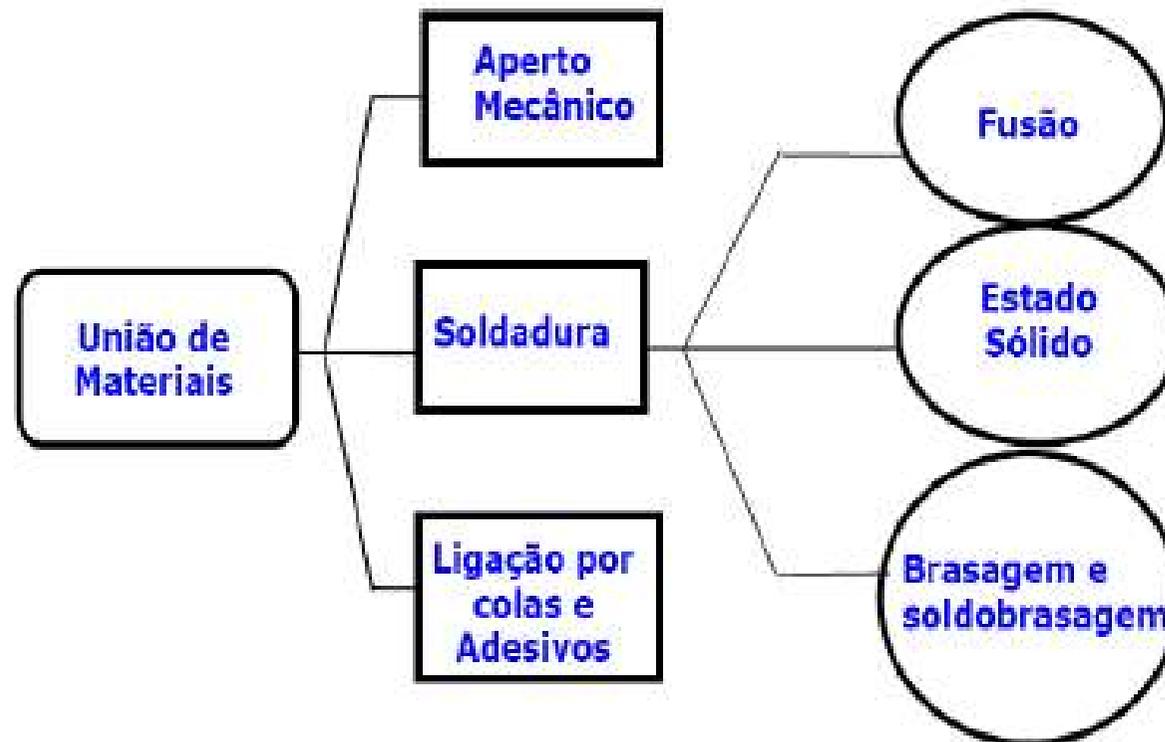
MATERIAIS E PROCESSOS

Processos de ligação

Operação

Método de união

Classes do processo de soldadura



O QUE É A SOLDADURA?

A soldadura é um meio de ligação de metais, da qual resultam:

- **ligações inamovíveis e permanentes**
- **continuidade metálica**
- **características mecânicas que na maioria dos casos são semelhantes ou mesmo superiores às dos metais base**

Por razões de ordem económica e operatória a soldadura é um dos processos tecnológicos mais utilizado na ligação de metais.

ex. Const. mecânica

Const. naval

Const. Civil

A soldadura por fusão é um dos processos mais efectivos de união de materiais, no entanto, é também um dos processos mais complexos, uma vez que uma grande variedade de fenómenos metalúrgicos ocorre num curto intervalo de tempo, enquanto a soldadura está a ser realizada.

CLASSIFICAÇÃO E SELECÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDADURA

Os processos de soldadura podem ser divididos em três classes fundamentais:

- **Soldadura por fusão**
- **Soldadura no estado sólido**
- **Brasagem e soldobrasagem**

Soldadura por fusão - engloba os processos de soldadura nos quais a fusão dos materiais base a soldar é essencial para a realização da soldadura. O MB e o MA, caso exista, encontram-se no estado líquido.

Soldadura no estado sólido - agrupa os processos de soldadura nos quais a ligação de peças ocorre a temperaturas muito inferiores à de fusão dos materiais (MB), nalguns casos mesmo próximo da $T_{amb.}$, e sem uso de metais de adição (MA).

Brasagem e Soldobrasagem - englobam os processos de soldadura em que a ligação dos metais a soldar (MB) é conseguida aquecendo-os até uma temperatura inferior à de *solidus* e em que se utiliza um material de adição (MA) com uma temperatura *liquidus* inferior à $T_{solidus}$ dos materiais de base

SELECÇÃO DO PROCESSO DE SOLDADURA

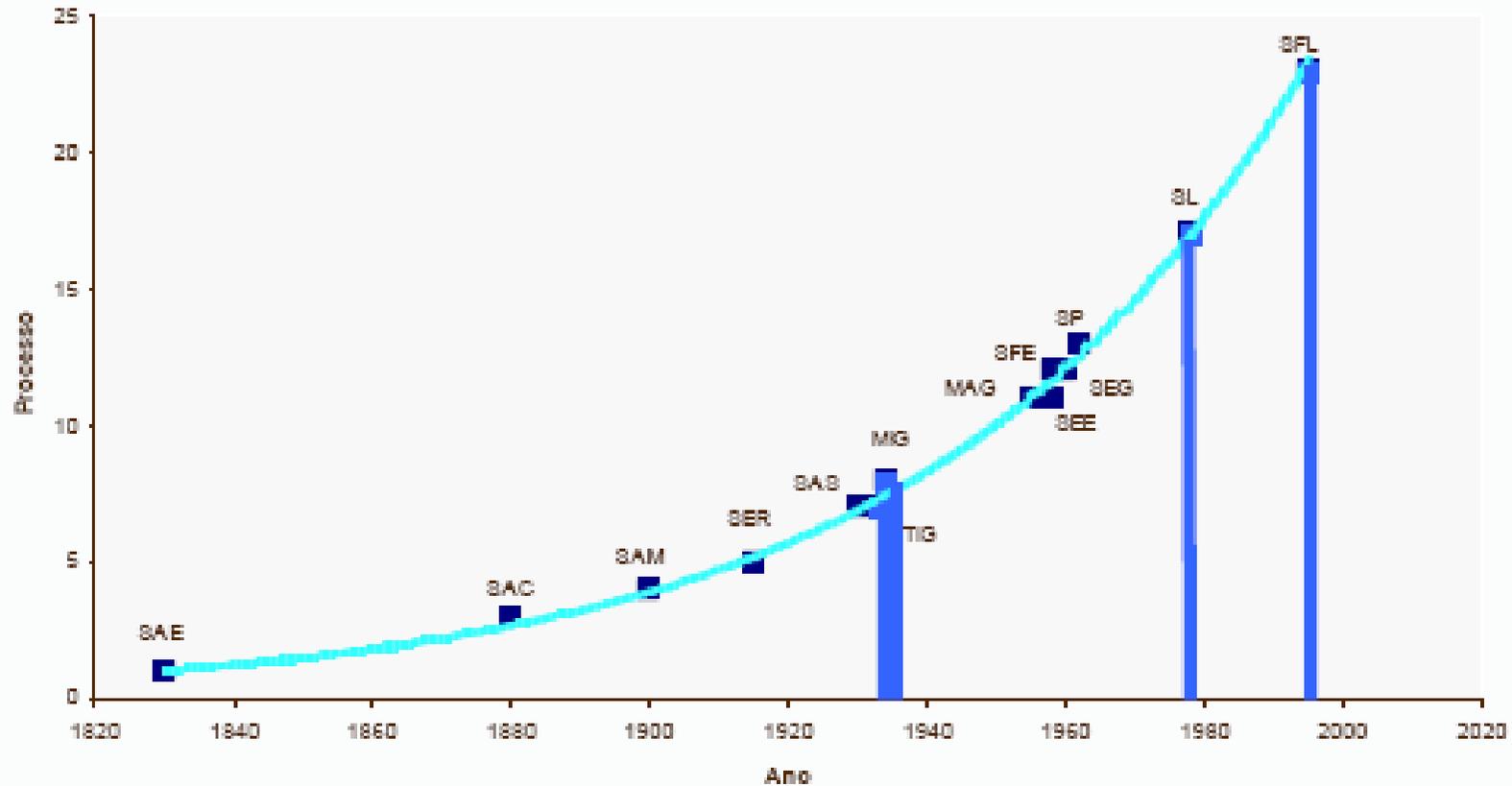
Conhecimento dos vários processos de ligação e a sua relação com:

- Tipo de material a soldar (propriedades físicas, químicas, mecânicas e efeitos de fabricação)
- Desenho da junta e sua preparação
- Espessura do material
- Limpeza
- Necessidade de tratamentos térmicos
- Custo do equipamento
- Posição de soldadura
- Número de peças
- Acessibilidade

Deverá existir uma compatibilidade suficiente dos metais envolvidos na ligação, de forma a criar fortes ligações entre os átomos, para que os metais sejam postos em contacto íntimo. Estes requisitos determinam a natureza do processo e o material de adição caso exista

Quando ocorre fusão, parte do metal base é fundido e misturado com o metal de adição, caso exista formando o banho de fusão. As propriedades da mistura resultante devem ser consideradas quando se selecciona o processo e o material de adição a utilizar.

PROCESSOS DE SOLDADURA: EVOLUÇÃO HISTÓRICA

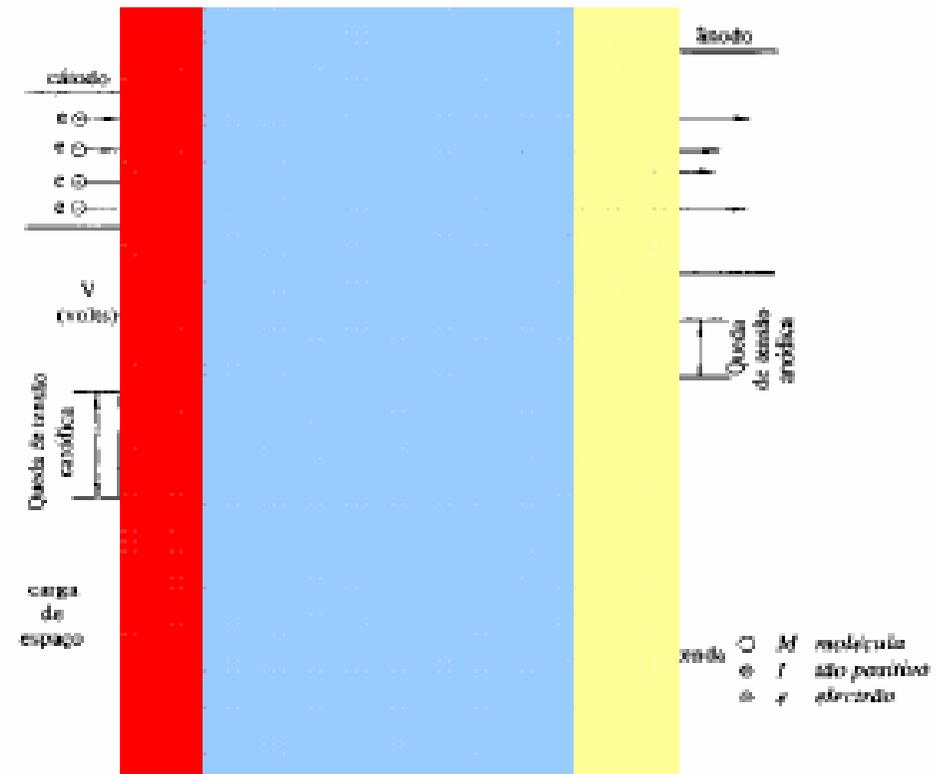


SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

- A soldadura por arco eléctrico é a mais utilizada na indústria
- A soldadura envolve geralmente a aplicação de uma determinada quantidade de calor na zona que se pretende ligar.
- O arco eléctrico pode ser considerado um condutor gasoso que transforma energia eléctrica em calorífica.
- É a fonte de calor utilizada em muitos dos principais processos de soldadura.

Arco Eléctrico

- O arco eléctrico é estabelecido através de uma descarga eléctrica entre os eléctrodos, a qual é mantida devido ao desenvolvimento de um meio condutor gasoso.
- O eléctrodo negativo, a partir do qual são emitidos os electrões que passam através do gás, é chamado **cátodo**. O eléctrodo positivo é conhecido como **ânodo**.

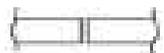
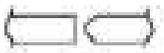
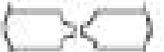


FORMAS DE ESCORVAMENTO DO ARCO ELÉCTRICO

- Escorvamento por **curto-circuito**
- Escorvamento por **faiscamento de alta frequência**
- **Curto-circuito** - consiste em tocar com o eléctrodo na peça provocando um curto-circuito, ao qual estão associados uma corrente eléctrica de muito alta intensidade e uma elevada resistência de contacto, que vão provocar uma elevada libertação de calor no ponto de contacto com conseqüente fusão e alguma vaporização de metal.
Nessa altura afasta-se o eléctrodo da peça o que vai dar origem a uma ponte de metal em fusão entre o eléctrodo e a peça, a qual devido à elevada intensidade de curto-circuito e ao afastamento vai romper aparecendo então um arco eléctrico transitório. Se a tensão em vazio da fonte de potência for suficiente estabelecer-se-á um verdadeiro arco eléctrico.
- **Faiscamento de alta frequência** - Consiste na aplicação aos terminais da fonte de potência, de uma tensão muito elevada (maior que 10^4 V) e de alta frequência, a qual é suficiente para provocar uma faísca eléctrica entre o eléctrodo e a peça afastados um do outro. Logo que esta faísca ocorre, verifica-se um rápido abaixamento da tensão e a intensidade de corrente começa a aumentar, atingindo-se cerca de 1 ms. depois as condições correspondentes a um arco eléctrico estável.

TERMINOLOGIA

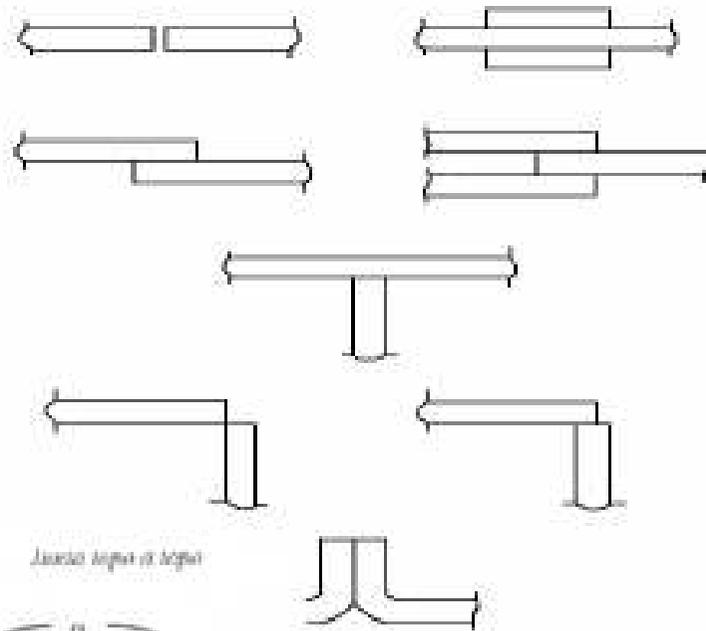
- O **chanfro** é a abertura entre as duas peças a soldar, abrindo assim um espaço à contenção da soldadura. Esse chanfro poderá ter diversas geometrias e designações dependendo da espessura das peças, do processo e da aplicação de soldadura

Designação	Esquema	Símbolo
Bordos direitos		
Em V		V
Em X		X
Em Y		Y
Em U		U
Em meio V		V
Em K		K
Em Y duplo		Y
Em U duplo		U

Quadro - Tipos de Chanfros (para maior pormenor pode-se consultar a Norma Portuguesa NP-1515 ou a ISO 2553).

Tipo de juntas

As juntas classificam-se segundo a função dos elementos a soldar. Existem cinco tipos básicos de juntas - **topo a topo, sobreposta, em T, de ângulo e rebordada.**



Juntas topo a topo

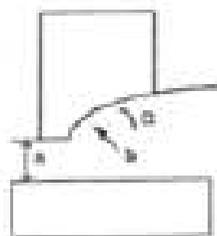
Juntas sobrepostas

Junta em T

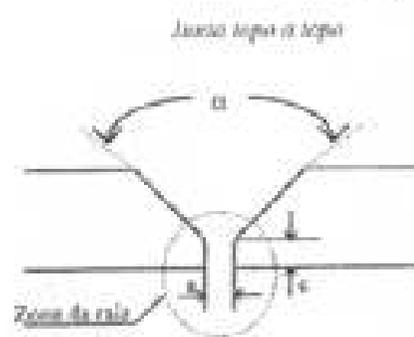
Juntas de ângulo

Junta rebordada

Junta de ângulo

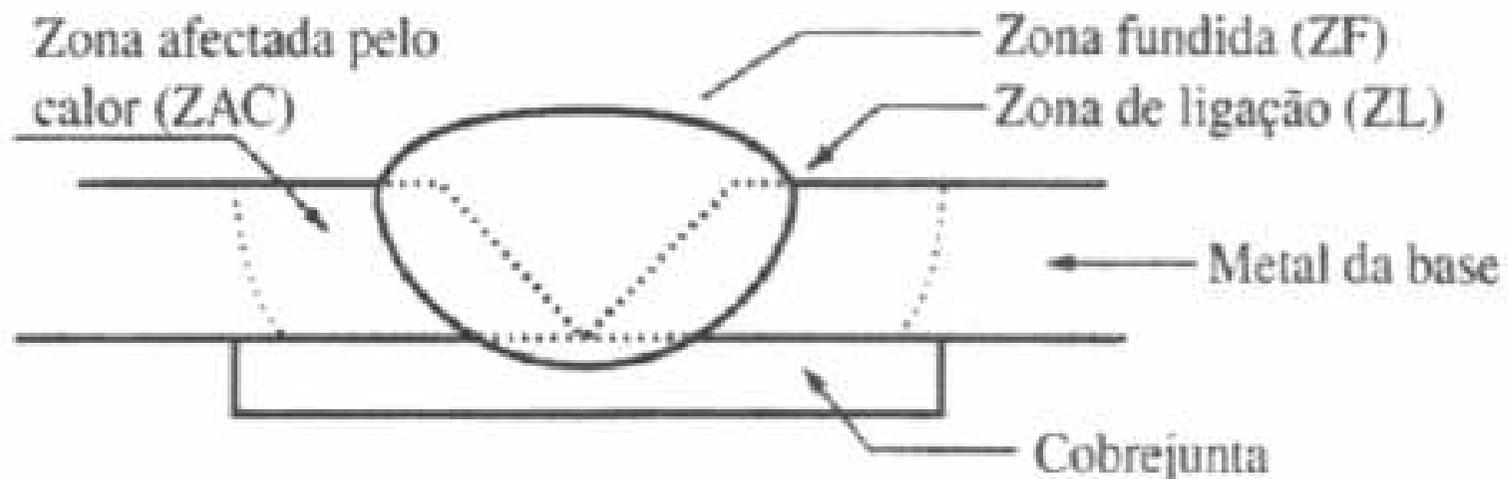


Junta topo a topo



Secção transversal de um cordão de soldadura

A figura ilustra a secção transversal de uma soldadura e as respectivas regiões. Nesta figura mostra-se também uma peça colocada na parte inferior de soldadura (zona da raiz) chamada de **cobre-junta** cuja finalidade é segurar o metal fundido durante a realização de soldadura. Terminada a soldadura a **cobre-junta** pode permanecer ou ser retirada da junta, sendo normalmente retirada.



Posições de soldadura



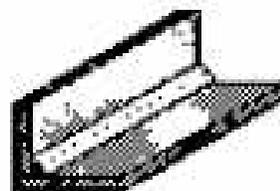
Posição ao Baixo



Posição Horizontal



Posição Horizontal



Posição Vertical



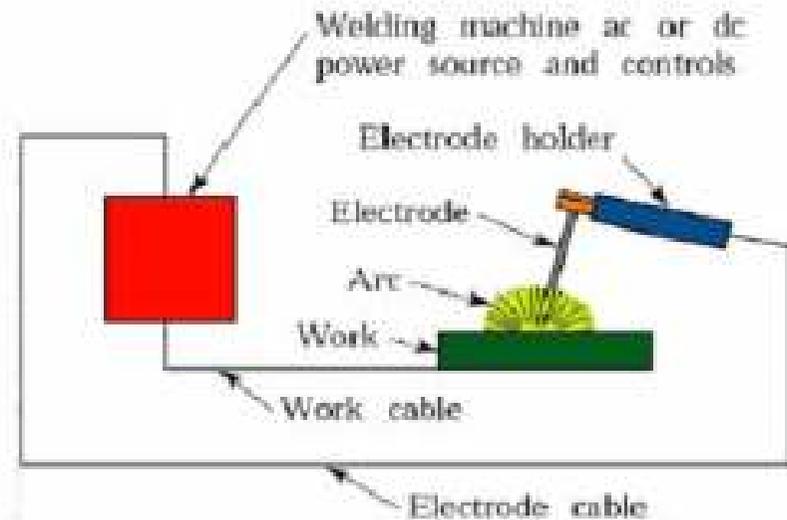
Posição no tecto



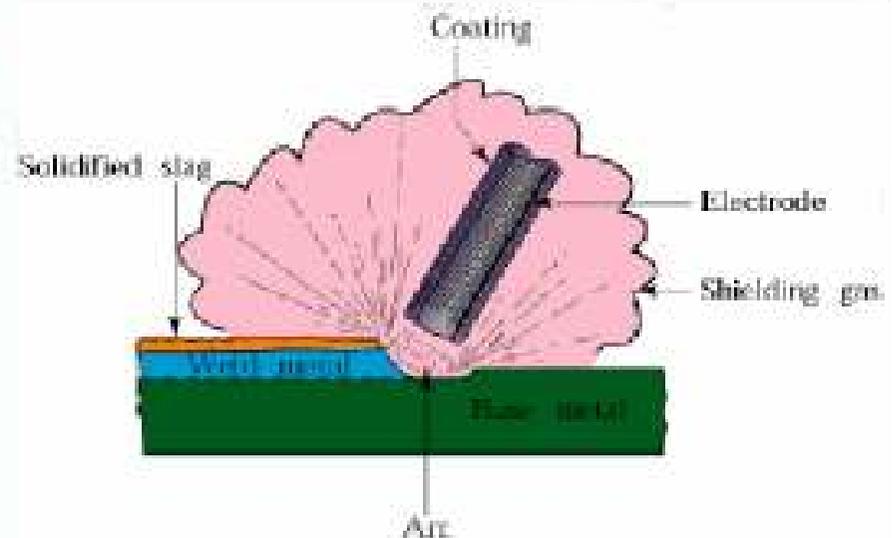
Circunferência

Soldadura por eléctrodo revestido

- É um dos processos de soldadura mais utilizados devido à sua elevada versatilidade, de requerer equipamento menos complexo, mais portátil e mais barato. Hoje em dia, no entanto, a sua utilização tem vindo a decrescer passando a ser progressivamente substituído por processos de maior produtividade.

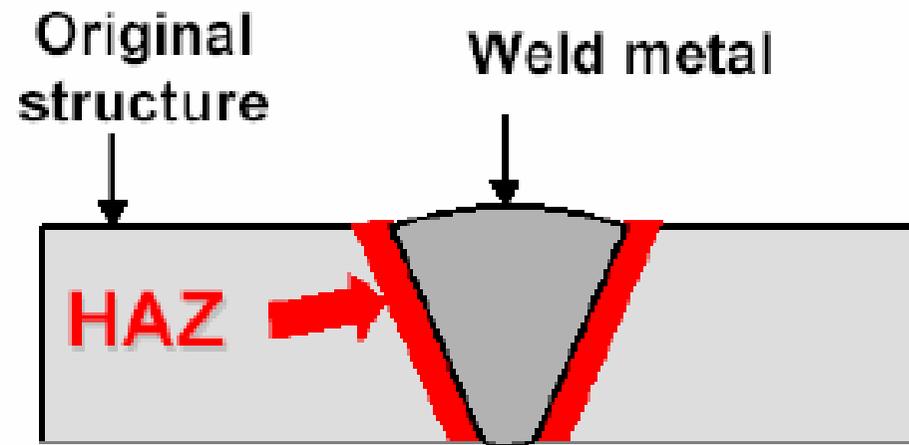


- O processo de *soldadura por eléctrodo revestido (SER)* utiliza o calor do arco eléctrico produzido entre o eléctrodo revestido e a peça a soldar, para fundir o material base e o eléctrodo (material de adição), que é depositado na junta a soldar.



Soldadura por eléctrodo revestido

- Os dois materiais fundidos pelo calor, i.e. os materiais base a soldar e o material de adição formam assim, o banho de fusão cuja composição química não é mais do que a mistura das composições químicas dos materiais fundidos que lhe deram origem.



Para um funcionamento correcto do processo é necessário ter em atenção aos seguintes factores:

- *Velocidade de soldadura*
- *Comprimento do arco*
- *Diâmetro do eléctrodo*
- *Tipo de revestimento*
- *Tipo de corrente e polaridade*
- *Intensidade de corrente e voltagem*

Soldadura por eléctrodo revestido

Aplicabilidade

- A versatilidade e simplicidade do equipamento utilizado são razões fundamentais para o seu sucesso.
- Pode ser utilizado, quer no interior, quer no exterior (ao ar livre), ou mesmo em condições hiperbáricas, como seja debaixo de água.
- Pode ser utilizado em locais de difícil acesso:
 - tanques de armazenamento
 - estruturas de barcos e pontes
- É muito utilizado para reparação
- Pode ser utilizado para soldar quase todos os tipos de metais, desde que haja eléctrodos com a composição adequada.

Comercialmente existem eléctrodos para os seguintes materiais:

- Aço carbono
- Aços microligados
- Aços resistentes à corrosão
- Ferros fundidos
- Aços inoxidáveis
- Alumínio e ligas de alumínio
- Cobre e ligas de cobre
- Níquel e ligas de níquel

Soldadura por eléctrodo revestido

Gama de espessuras

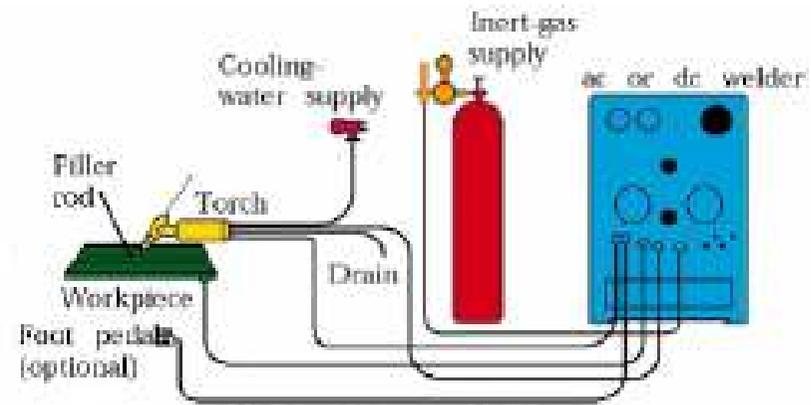
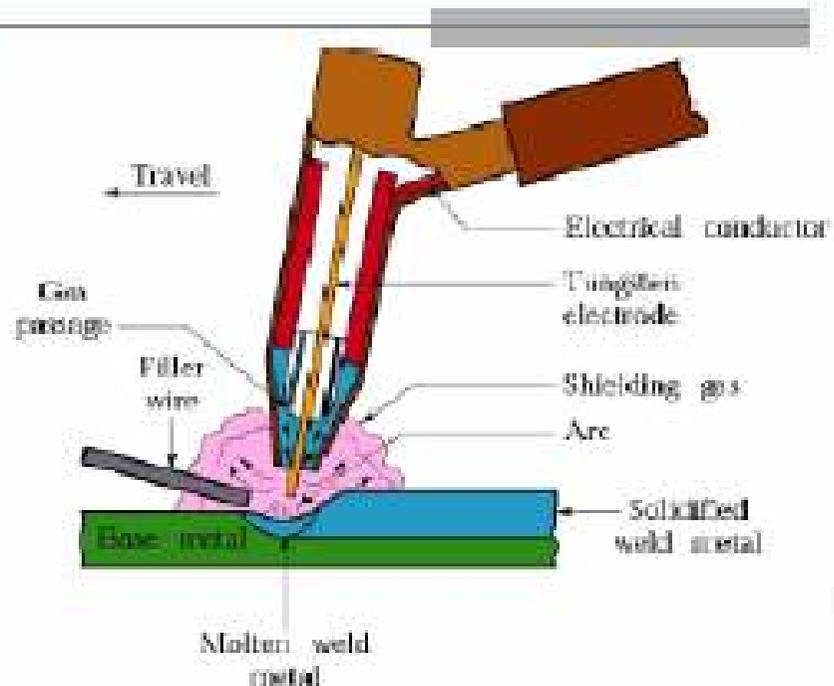
- Depende da experiência do soldador, fonte de potência, posição de soldadura e diâmetro do eléctrodo.
- Inferior a 1 mm é muito difícil - menor eléctrodo têm diâmetro de 1.5 mm
- Normalmente espessura mínima é de 1.5 mm. Para materiais de espessura inferior o material base funde antes que se crie um banho de fusão estável.
- Limite superior com eléctrodos revestidos não existe, embora outros processos, tais como arco submerso, MIG/MAG e fios fluxados possam ser muito mais económicos para espessuras elevadas.
- Existe a necessidade de remover escória em cada passe, ter um soldador com elevada experiência, e ter em atenção a necessidade da constante troca de eléctrodos.

Soldadura TIG

TIG - Tungsten inert gas
GTAW - Gas tungsten arc welding

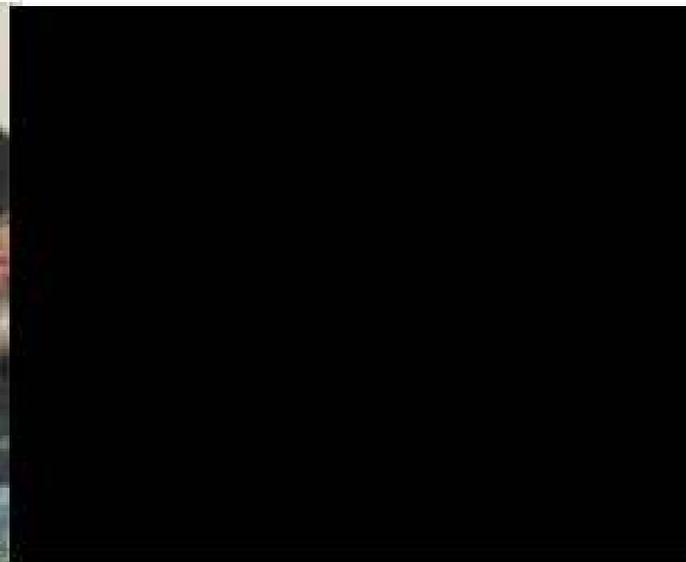
Processo associado a soldaduras de elevada responsabilidade, em que a probabilidade de ocorrência de defeitos é mínima.

É um processo de soldadura por arco eléctrico, estabelecido entre o eléctrodo não consumível de tungsténio e a peça a soldar no seio de uma atmosfera de protecção de gás inerte (argon ou hélio)



O gás de protecção deverá ser inerte para não contaminar o eléctrodo.

Soldadura TIG

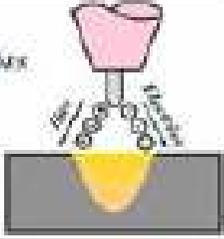


Soldadura TIG

Técnicas Operatórias:

- Contaminação do Electrodo



TIPO DE CORRENTE	DC
TIPO DE POLARIDADE	Positiva
ESCALAMENTO DE IONS E DE ELECTRONES	
PENETRAÇÃO	Não
AÇÃO DE LIMPEZA DOS ÓXIDOS	Não
DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NO ARCO	70% no Pólo 30% no Electrodo
PENETRAÇÃO	Profunda e estreita
CAPACIDADE ELECTRICA	Quilovolt (100 Amp. - 3,00 mm)

Efeito do Tipo de corrente e da Polaridade no Processo TIG

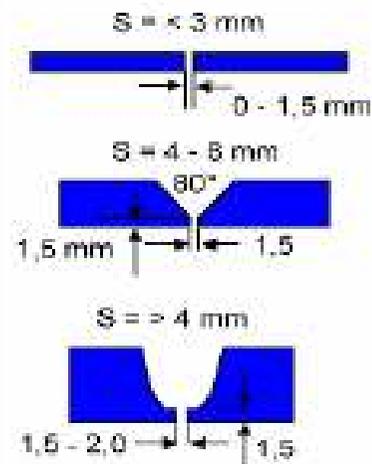
TIPO DE CORRENTE	DC
TIPO DE POLARIDADE	Positiva
ESCALAMENTO DE IONS E DE ELECTRONES	
PENETRAÇÃO	Não
AÇÃO DE LIMPEZA DOS ÓXIDOS	Não
DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NO ARCO	70% no Pólo 30% no Electrodo
PENETRAÇÃO	Muito e larga
CAPACIDADE ELECTRICA	Baixa (100 Amp. - 3,00 mm)

Efeito do Tipo de corrente e da Polaridade no Processo TIG

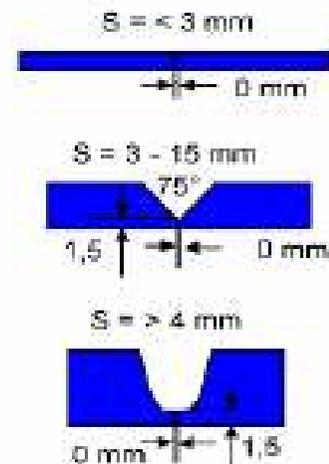
TIG: Tipo de juntas



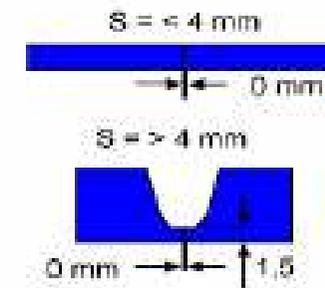
TIG Manual com Adição de Material



TIG Manual sem Adição de Material



TIG Mecanizado



Soldadura TIG

VANTAGENS

- Possibilidade de soldar a maior parte dos metais e ligas
- Fonte de calor extremamente concentrada
- Banho de fusão calmo
- Soldaduras de elevada qualidade e bom aspecto
- Possibilidade de ser utilizado “em posição”
- Arco e banho de fusão visíveis
- Metal de adição não atravessa o arco \Rightarrow a quantidade de material adicionado não depende da intensidade de corrente
- MA nem sempre necessário
- Possibilidade de soldar materiais muito finos, devido ao excelente controlo da entrega térmica.
- Ausência de escória, não é necessário limpeza.
- Ausência de salpicos

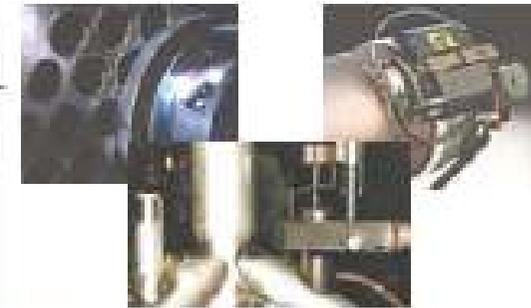
LIMITAÇÕES

- Baixa velocidade de soldadura
- Contaminação do eléctrodo
- Baixas taxas de depósito - soldar chapas grossas é dispendioso
- Protecção do arco contra correntes de ar que afastam o gás de protecção
- Partículas provenientes do eléctrodo de W podem ser introduzidas no banho de fusão
- Posicionamento correcto das chapas a soldar

Soldadura TIG

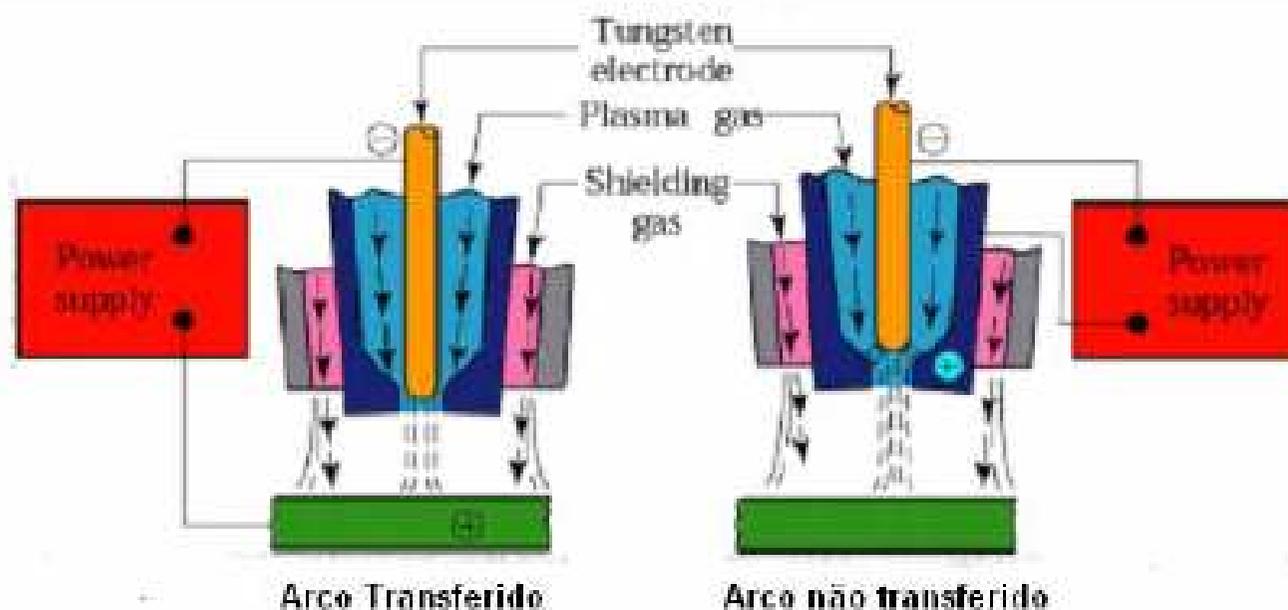
APLICAÇÕES

- *Aconselhável para a ligação de metais de pequena espessura e para a realização em componentes sensíveis ao calor.*
- *Pequenos trabalhos e reparações em muitas oficinas de fabricação devido à facilidade de controlo do processo e à possibilidade de utilização de material de adição, quando necessário.*
- *Cordões de elevada qualidade com forma suave e uniforme.*
- *Adequado a quase todos os tipos de metais, em particular para ligações em alumínio e magnésio, devido ao facto destes materiais formarem óxidos refractários, e para metais reactivos como o titânio e o zircónio, os quais fragilizam quando são expostos ao ar, ainda em fusão*
- *Realização de passes de raiz em cordões para cujo enchimento se utiliza a soldadura por arco submerso ou MIG/MAG.*
- *Adequado para soldar espessuras com 3 mm ou inferiores*
- *Para espessuras superiores a 6.5 mm são preferidos outros processos. No entanto pode realizar-se soldadura multipasse quando é requerida uma elevada qualidade (ex. ind. aeroespacial e aeronáutica).*



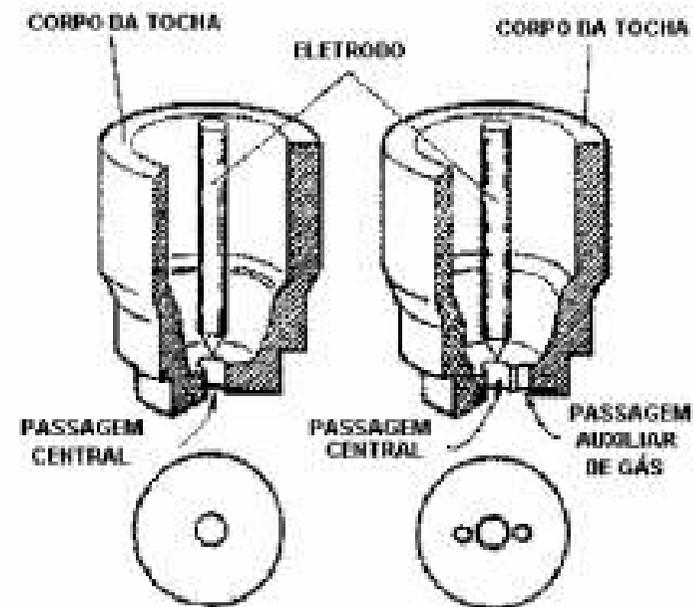
Soldadura por plasma

- A **soldadura por plasma** é um processo de soldadura por arco eléctrico no qual a fusão dos metais é provocada pelo aquecimento proveniente de um arco constrangido estabelecido entre o eléctrodo e a peça.
- A protecção é obtida através do gás ionizado proveniente da tocha, e de uma fonte adicional de gás de protecção inerte. Pode-se adicionar, ou não, metal de adição através de uma vareta, tal como em TIG.
- A soldadura por Plasma caracteriza-se por uma densidade de energia mais elevada e uma velocidade superior do gás de plasma, devido ao arco ser obrigado a passar por um orifício que o constrange.

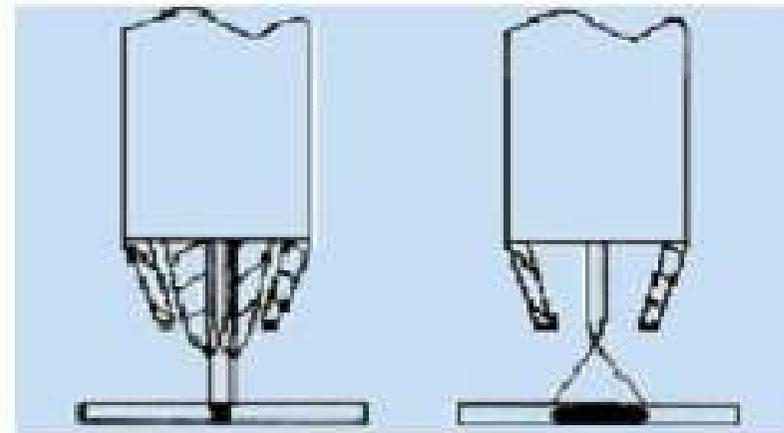
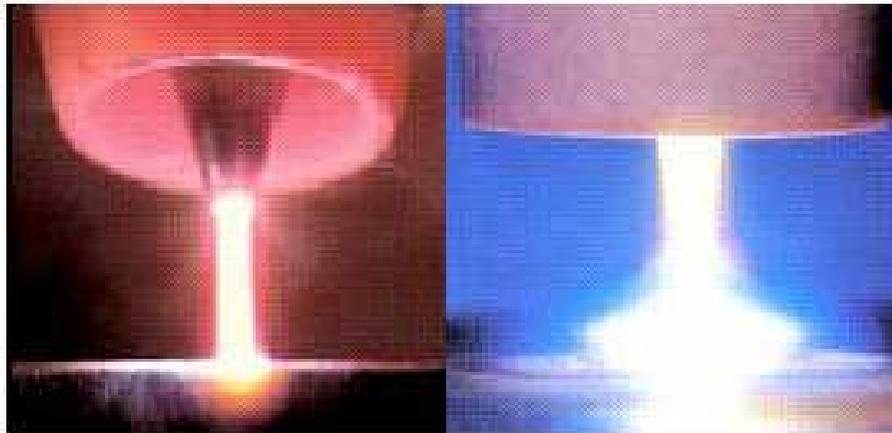


Soldadura Plasma

- O eléctrodo fica dentro do bocal a uma determinada distância do orifício.
- Em TIG o eléctrodo aparece fora do bocal \Rightarrow o arco não é constrangido e toma uma forma cónica, incidindo sobre uma zona relativamente grande da peça. Num arco com esta forma as alterações da distância tocha-peça, provocam uma alteração significativa da dimensão da zona sobre a qual o arco actua, e conseqüentemente na densidade de energia fornecida.
- Em Plasma o arco é forçado a passar através de um orifício no bocal, de dimensão pré-determinada \Rightarrow arco de forma cilíndrica, cuja zona de incidência da peça não sofre alterações significativas mesmo que a distância tocha/peça se modifique.



Soldadura Plasma



Plasma

Tig

Arco estrangido

- Mais “duro” e direccionado.
- Maior estabilidade direccional
- Insensibilidade a variações de distância tocha/peça
- Permite soldar a velocidades superiores devido ao aumento de penetração que se obtém.
- Dá origem a cordões mais estreitos para penetrações iguais.
- Maior concentração de energia

Soldadura Plasma

APLICAÇÕES DO PROCESSO

- É utilizada para soldar quase todos os metais que podem ser soldados por TIG.
- Para espessuras até cerca de 6.0 mm permite a execução da ligação em um só passe, em preparações direitas sem material de adição.
- Em soldadura por plasma automática, pode-se utilizar material de adição, neste caso o problema de contaminação do eléctrodo não existe: uma vez que este está dentro do bocal.
- Podem ser soldadas em um só passe peças com espessuras entre os 0.025 a 6 mm
- O poder penetrante do jacto de plasma pode ser utilizado para reduzir a quantidade de material de adição, o número de passes e o tempo de arco para soldar chapas espessas com cordões multipasse.

Soldadura Plasma

VANTAGENS

- Facilidade do controlo do processo.
- Aumento da velocidade de soldadura.
- Insensibilidade a alteração do comprimento do arco.
- É especialmente bem sucedida a aplicação deste processo a soldadura de tubos de diâmetro, cuja espessura seja suficiente para permitir a utilização do modo “Keyhole”. Nestes casos o processo é mais rápido que o TIG e origina taxas de reparação menores.

DESVANTAGENS

- Equipamento mais dispendioso que o de TIG (2 a 5 vezes mais)
- Diâmetro da tocha maior
- Maiores conhecimentos da parte do soldador

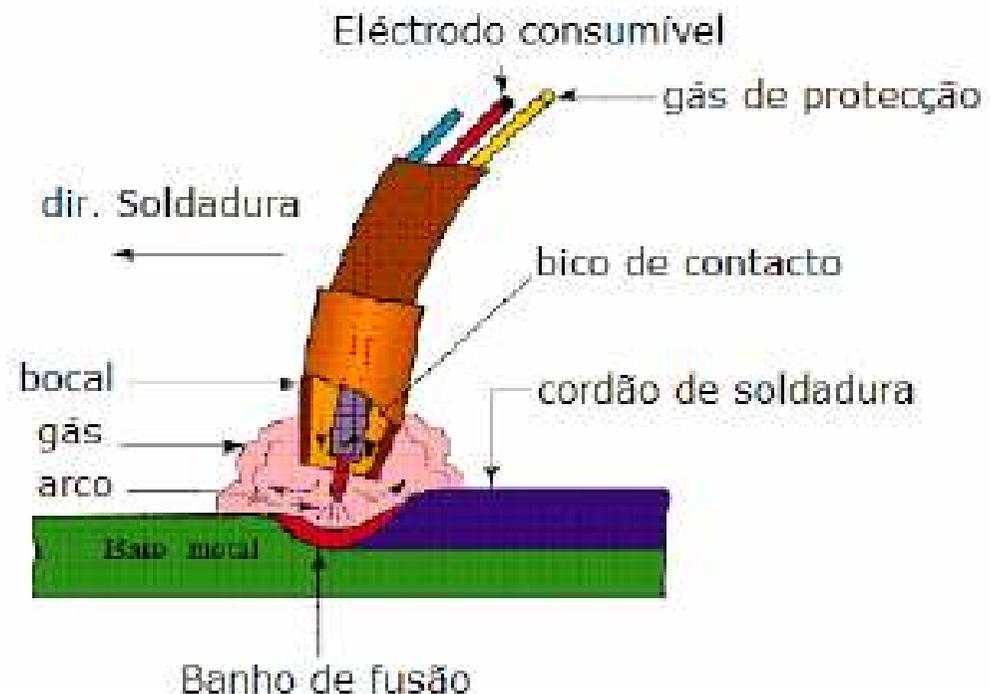
Soldadura MIG/MAG

- O processo de soldadura MIG/MAG é uma técnica de soldadura na qual o calor necessário é fornecido por um arco eléctrico, que se estabelece entre um fio eléctrodo consumível, alimentado continuamente, e o metal base.
- O eléctrodo, o arco, a zona fundida e a peça a soldar são **protegidos da contaminação atmosférica por um fluxo de gás, activo ou inerte, que passa através da tocha de soldadura.**

• **MIG** - Metal Inert Gas

• **MAG** - Metal Active Gas

• **GMAW** - Gas Metal Arc Welding



Soldadura MIG/MAG

VANTAGENS

- Pode ser utilizado para soldar praticamente todos os metais e ligas
- Elevadas taxas de depósito
- Pode ser facilmente automatizado ou mecanizado
- A soldadura pode ser efectuada em todas as posições, ao contrário do que acontece na soldadura por arco submerso
- Processo de elevada produtividade
- Não existe praticamente escória

DESVANTAGENS

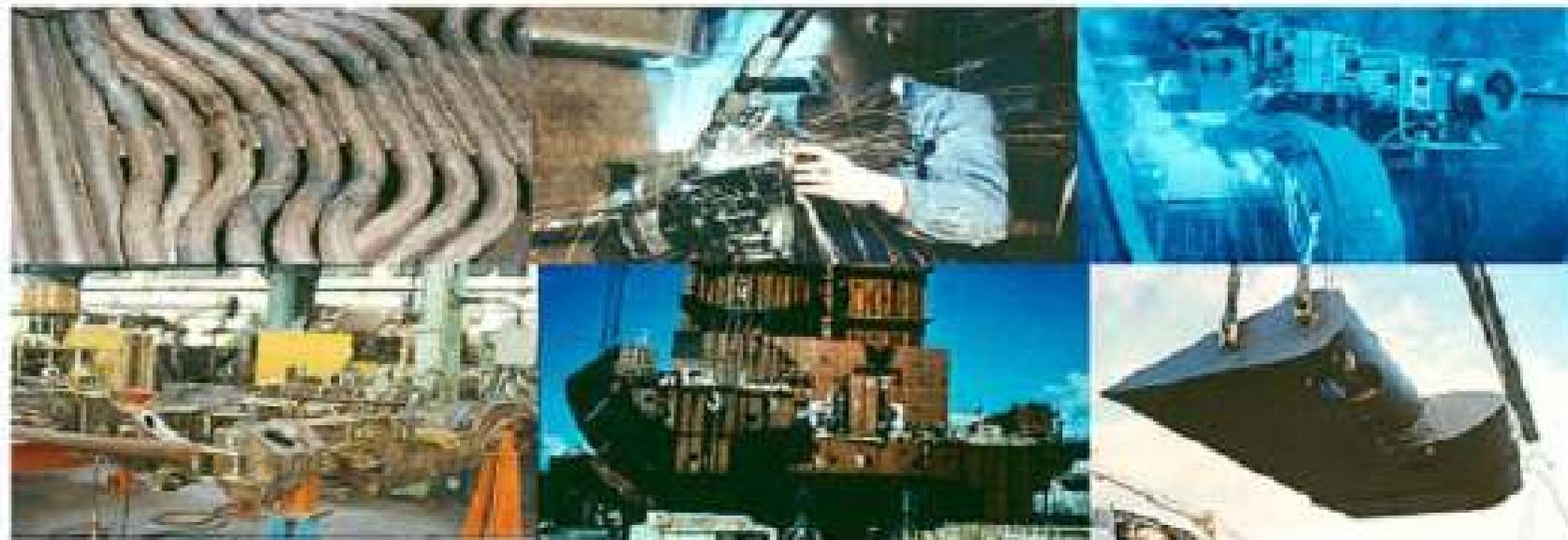
- Utilização no exterior menos eficaz, devido às correntes de ar que tendem a dispersar o gás de protecção
- Equipamento mais complexo, caro e menos portátil que outros processos (por ex. SER)
- Limitado a espessuras até 50mm

SOLDADURA MIG/MAG

- Ao longo da linha de produção, diversos componentes são soldados por MIG/MAG à carroçaria, utilizando robôs

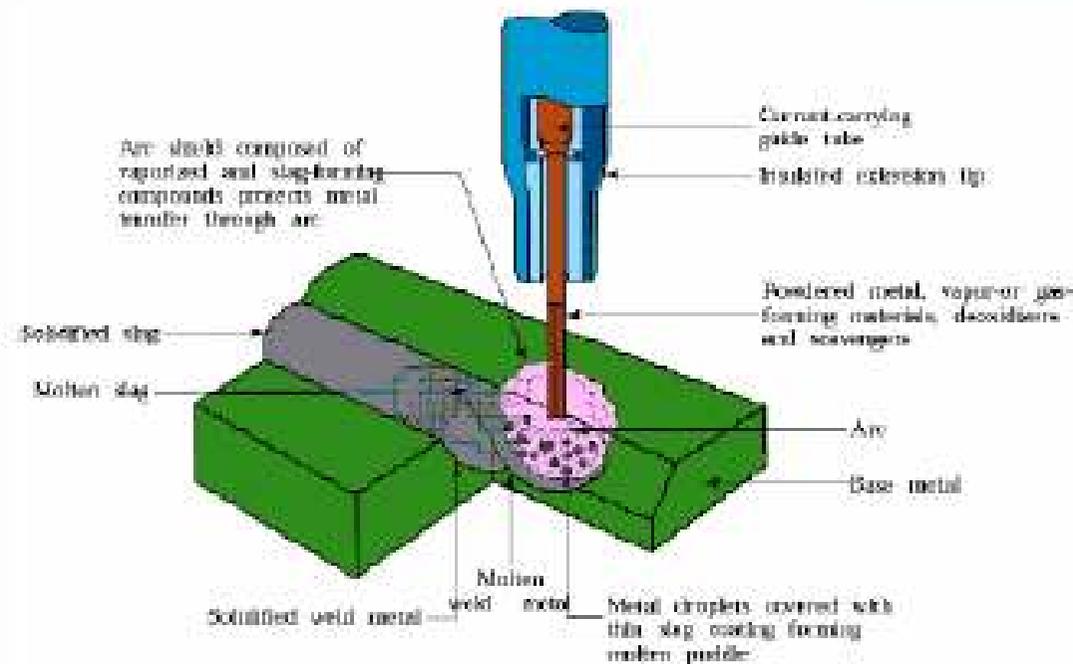


Soldadura MIG/MAG: Aplicações



Soldadura com Fios Fluxados

- A diferença entre este processo e outros de soldadura por arco eléctrico consiste no facto de o **consumível** utilizado, embora enrolado numa bobine como em soldadura MIG/MAG, ser **neste caso tubular** e no seu interior encontrar-se um fluxo.
- A protecção do banho de fusão é realizada através da fusão e escorificação do fluxo, podendo também ser utilizada uma protecção gasosa exterior suplementar.
- Os cordões de soldadura realizados com este processo, apresentam-se totalmente ou parcialmente cobertos por uma camada de escória.



Soldadura com Fios Fluxados

VANTAGENS (Comparação com os processos manuais):

- Proporcionam a versatilidade dos eléctrodos revestidos, mas envolvem uma menor diversidade de tipos de diâmetros
- A produtividade é elevada
- Processo com baixos teores em hidrogénio
- Não são necessárias estufas, armazenamento simplificado, baixo desperdício
- Inventário reduzido, normalmente só se utiliza um diâmetro de fio
- Fácil aplicação à soldadura automática

Soldadura com Fios Fluxados

VANTAGENS (Comparação com utilizados em MIG/MAG):

- Maior taxa de deposição
- Melhor qualidade, menor risco de falta de fusão
- Penetração superior, particularmente vantajosa para juntas de canto
- Devido ao facto de ambos os fios fluxados **permitirem o uso de intensidades de soldadura superiores**, há ganhos de produtividade, quer na soldadura em posição, quer na soldadura ao baixo.
- A **maior densidade de corrente dos fios fluxados** em relação aos fios sólidos, com um mesmo diâmetro e para uma mesma intensidade de corrente, deve-se ao facto de só existir condutibilidade eléctrica através da tira de metal e apenas uma pequena parte através do fluxo metálico.

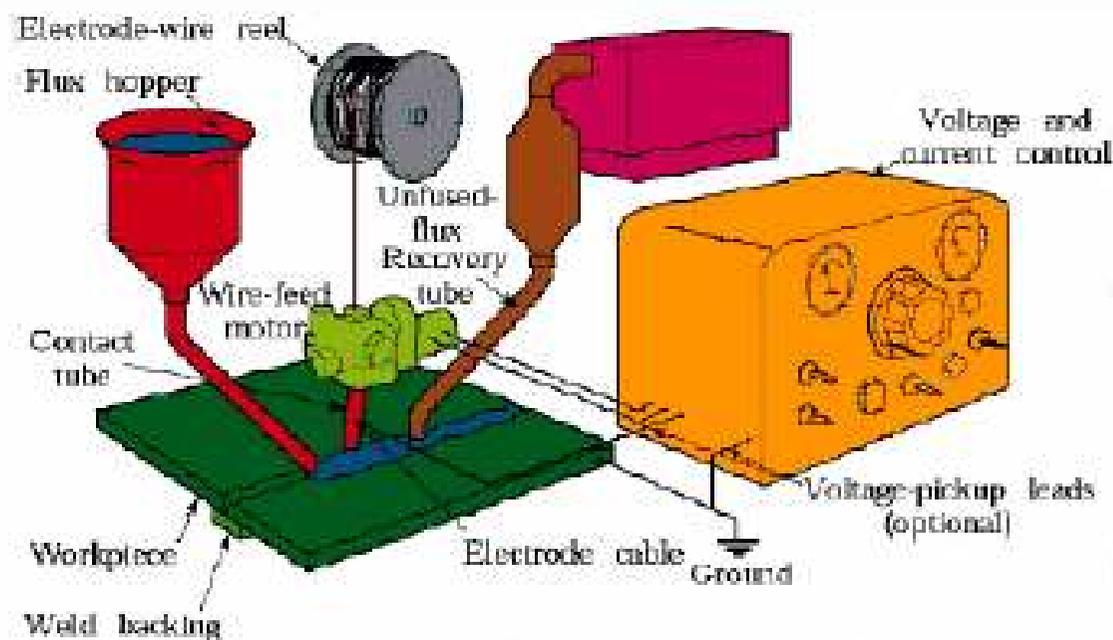
Soldadura com Fios Fluxados

APLICAÇÕES

- *Pode ser utilizado em qualquer posição de soldadura.*
- *O processo pode ser utilizado no exterior*
- *A gama de espessuras a soldar vai desde os 2 mm até aos 80 mm.*
- *O desenvolvimento dos fios fluxados tem permitido aumentar a produtividade da soldadura de diversos tipos de junta, nomeadamente em:*
 - *Construção naval*
 - *Construção de pipelines*
 - *Centrais nucleares e de vapor*
 - *Tanques,...*

Soldadura por Arco Submerso

- É um processo automático, no qual a junta soldada é realizada através da fusão simultânea dos bordos dos materiais a soldar e de um ou mais fios eléctrodos, os quais formam conjuntamente o banho de fusão.
- O banho de fusão é totalmente coberto por um fluxo granulado o qual funde parcialmente formando a escória.
- O arco eléctrico é totalmente submerso pelo fluxo granulado, o qual tem um papel idêntico ao do revestimento dos eléctrodos revestidos.
- Calor desenvolvido, uma pequena parte por efeito de Joule, e a restante pelo arco eléctrico.



Soldadura por Arco Submerso



Soldadura por Arco Submerso

VANTAGENS

- As juntas podem ser preparadas com chanfros em V apertados, resultando em menos MA a ser utilizados. Em algumas aplicações não é necessário chanfro.
- O arco opera sob protecção do fluxo eliminando a libertação de salpicos
- O processo pode ser utilizado com elevadas velocidades de soldadura e taxas de depósito, na posição ao baixo

DESVANTAGENS

- Necessidade de posicionadores e cobre juntas
- O fluxo está sujeito a contaminação
- Não é apropriado para ser utilizado para chapas inferiores a 5 mm
- Limitado à posição ao baixo e horizontal

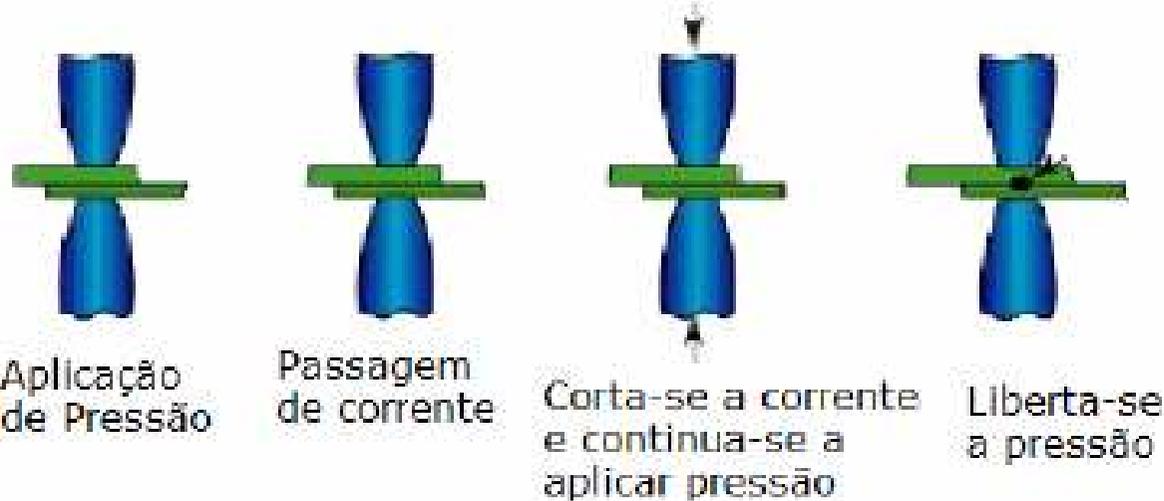
Soldadura por Arco Submerso

APLICAÇÕES

- *A sua maior aplicação é na soldadura de aço carbono e baixa liga.*
- *É utilizado sobretudo na posição ao baixo, de espessuras superiores a 8mm, em que os cordões a realizar têm um grande comprimento e são rectilíneos.*
- *É possível a sua utilização em outras posições, como a horizontal, embora sejam necessárias montagens especiais para tal efeito.*
- *É utilizada em fabricação, manutenção e recuperação de peças metálicas e encontra uma grande aplicação em estaleiros navais, fábricas de perfis e estruturas metálicas, etc.*

Soldadura por Resistência

- Este processo serve para realizar uma soldadura, sem MA, utilizando a ação conjunta de uma pressão e de calor (obtido por efeito da passagem de corrente através da partes a soldar).



GERAÇÃO DE CALOR

Segundo a lei de *Joule*:

$$Q = RI^2t$$

em que:

Q - calor produzido (J)

I - intensidade de corrente (A)

R - resistência total, $R_1+R_2+R_3+R_4+R_5$

t - duração da corrente (s)

O circuito é constituído por 5 resistências em série

Soldadura por Resistência

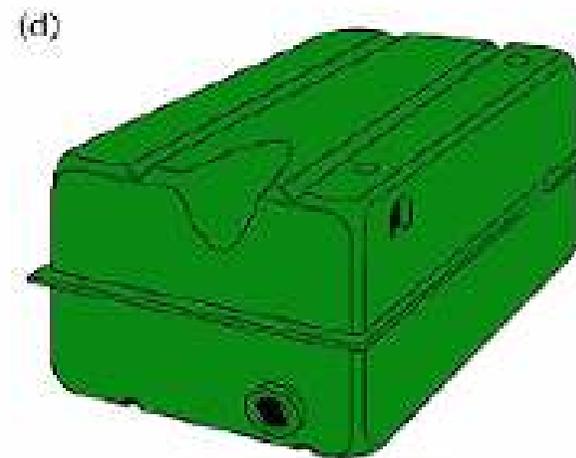
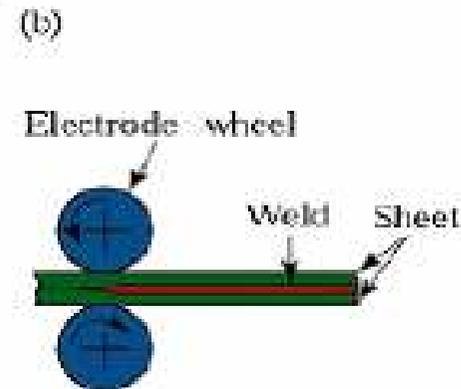
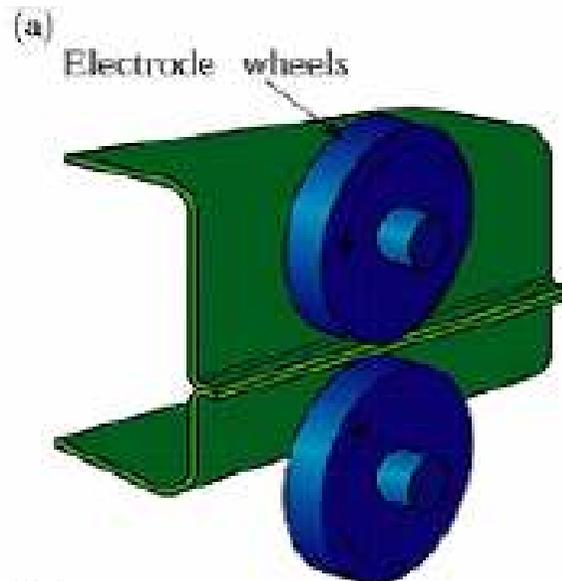
Tipos de soldadura por resistência:

- Pontos
- Contínua ou por roletes
- Projecção ou bossas



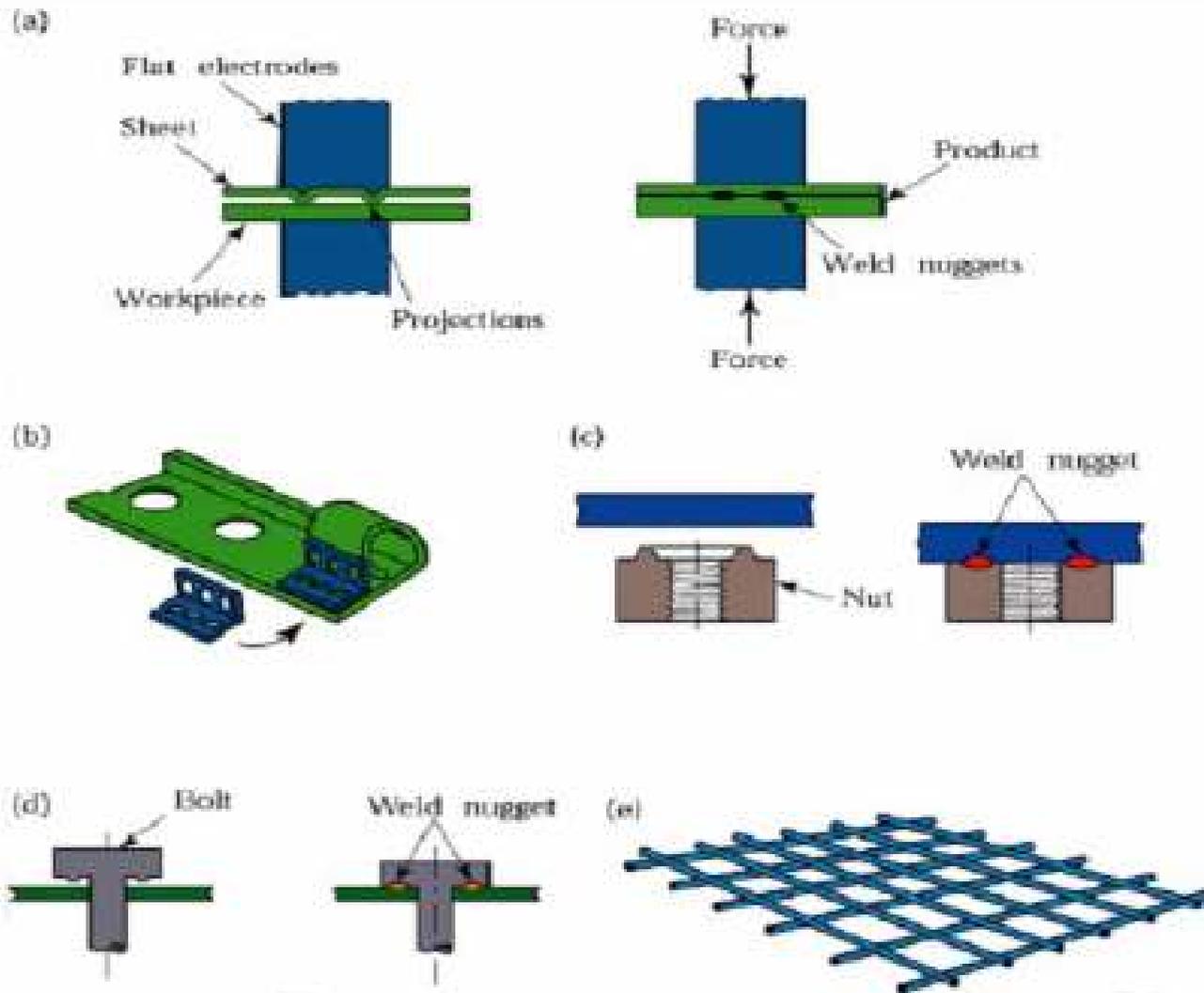
Soldadura por Resistência

Soldadura por roletes

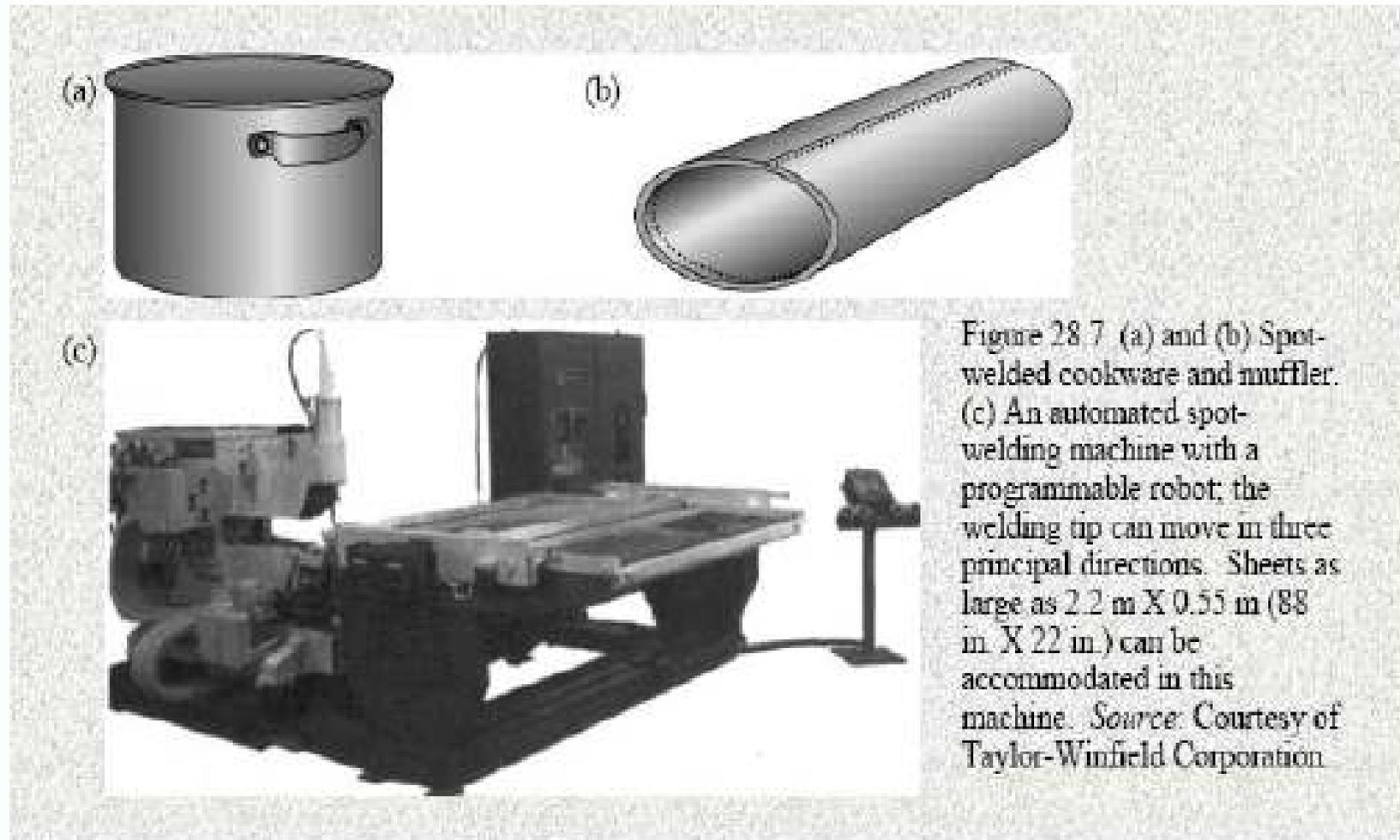


Soldadura por Resistência

Soldadura por projecção ou bossas

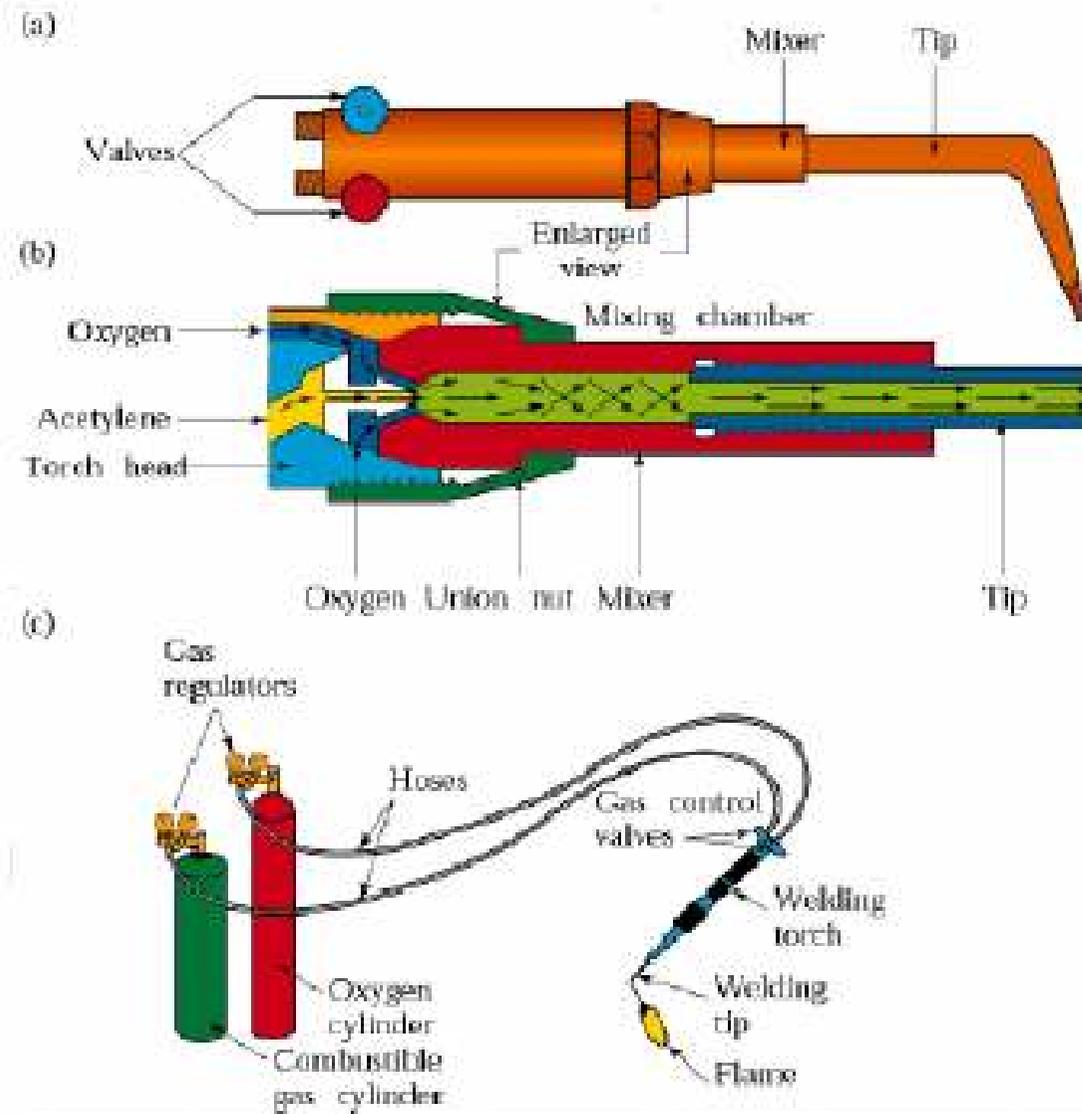


Soldadura por Resistência

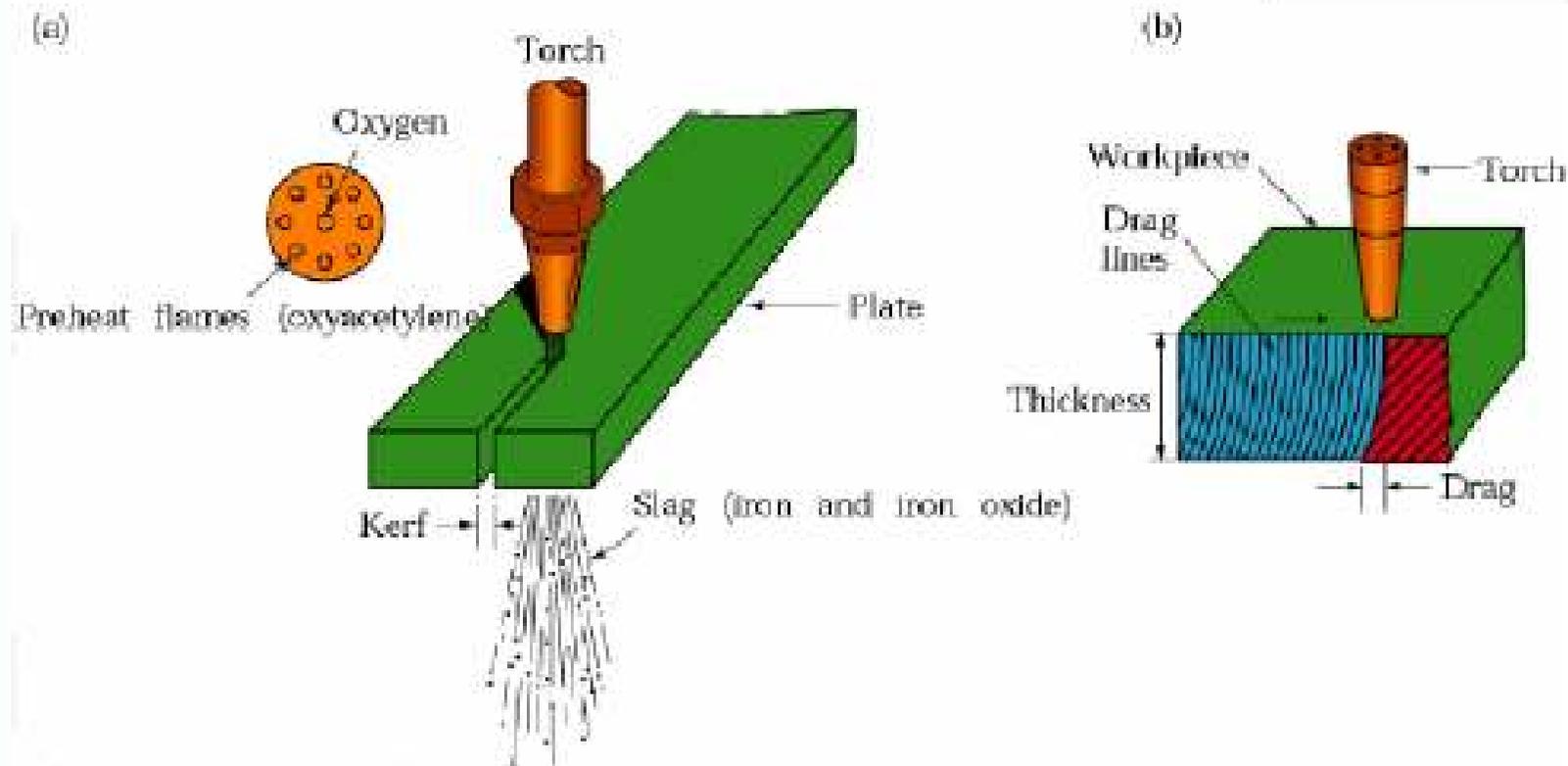


Soldadura Oxigás

- Processo de soldadura que utiliza a **chama como fonte de calor**, para fundir o material a soldar e sempre que necessário utiliza ainda uma vareta com material de adição.
- A chama é proveniente da combustão de uma mistura de oxigénio e de um gás combustível (geralmente acetileno) numa proporção bem definida.



Oxicorte



CORTE POR OXIGÁS

- O corte dos metais é obtido pela reacção do oxigénio puro com o metal, a alta temperatura. Esta alta temperatura é conseguida através de uma chama oxigénio-gás combustível.

Soldadura Laser

- As iniciais **LASER** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) significam “amplificação da luz através da emissão estimulada de radiação”.
- A soldadura por Laser pode ser definida como o processo de soldadura em que a fusão dos materiais se obtém devido ao **calor desenvolvido por um feixe concentrado de luz** que incide sobre as superfícies a soldar

Os fótons possuem uma determinada energia dada por:

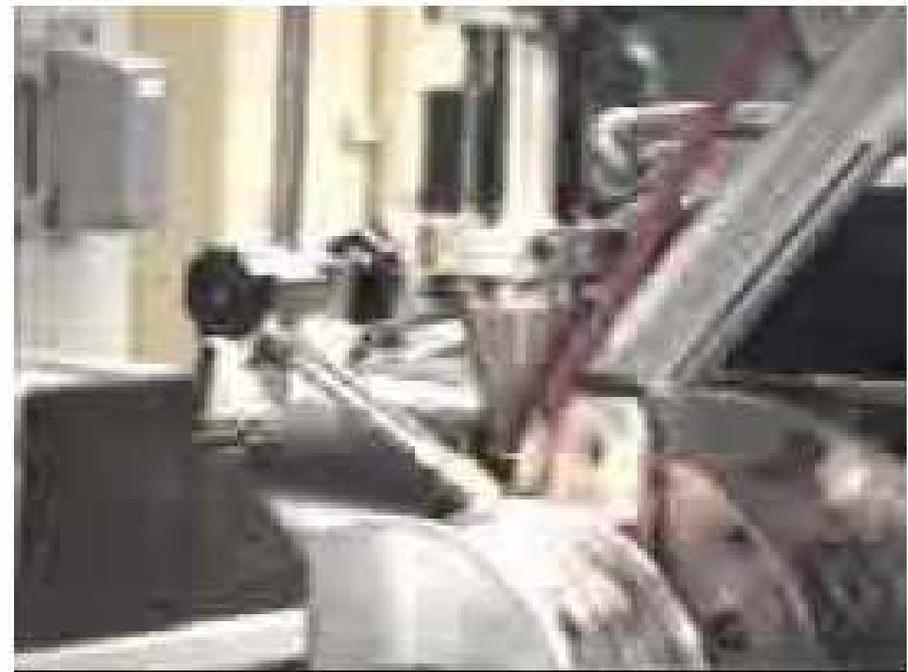
$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

h - é a constante de Plank

c - é a velocidade da luz

λ - é o comprimento de onda da radiação (m)

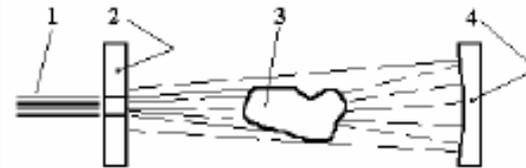
ν - é a frequência luminosa (s^{-1})



Soldadura Laser

O equipamento Laser é constituído por:

- Um meio activo - que contém os elementos responsáveis pela emissão estimulada.
- Uma fonte de excitação - ou de bombardeamento - que fornece a energia necessária para gerar espécies excitadas em nº superior ao das espécies no estado fundamental
- Uma cavidade ressonante - que delimita o volume que contém os fotões ou a radiação laser produzida.



- 1 - feixe LASER
- 2 - lente plana e espelhada com furo
- 3 - meio ativo
- 4 - lente côncava

Soldadura Laser

O tipo de laser refere-se normalmente ao meio activo usado.

O comprimento de onda da radiação emitida depende da substância activa no processo de emissão estimulada da radiação.

- *Lasers sólidos (Nd/YAG)*
- *Lasers gasosos (CO₂ e excímeros)*



Soldadura Laser

VANTAGENS

- *Soldadura de bordos quase paralelos,*
- *Minimas distorção e tensões residuais;*
- *Baixa entrega térmica, ZAC estreita;*
- *Grande razão profundidade/largura;*
- *Permite velocidades elevadas;*
- *Facilidade de automação dos processos;*
- *Facilidade de soldadura de dissimilares*

DESVANTAGENS

- *Elevado investimento inicial*

APLICAÇÕES

- *Indústria automóvel*
- *Indústria aeroespacial*
- *Indústria electrónica*

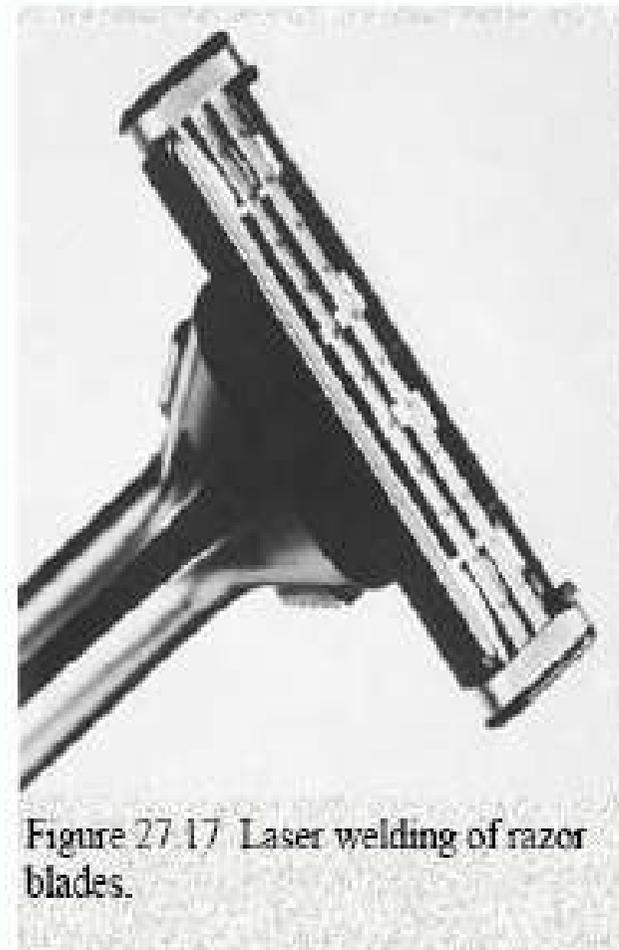


Figure 27.17 Laser welding of razor blades.

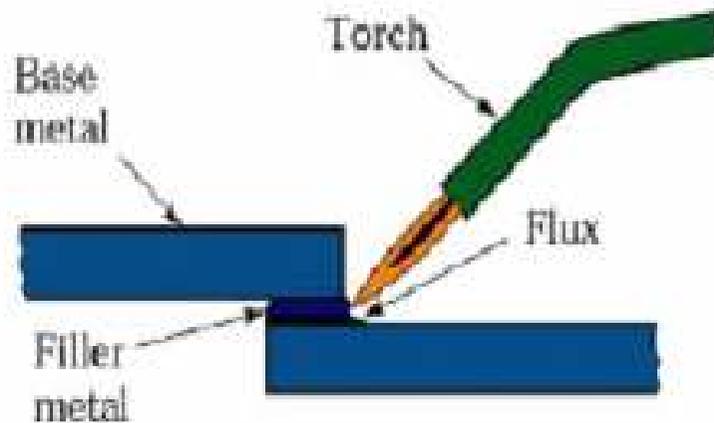
Corte por Laser

- A indústria automóvel começou a utilizar a **Tecnologia LASER** como uma ferramenta de corte, que se apresentou vantajosa tanto em termos de qualidade de corte, como na redução dos tempos e dos custos de fabrico.



Brasagem

- A brasagem é o mais antigo dos processos que utilizam a fusão para ligar peças metálicas.
- O termo brasagem abrange um conjunto de processos de união que provocam a ligação metálica:
 - pelo aquecimento a uma temperatura adequada
 - pela utilização de um metal de adição cujo ponto de fusão é mais baixo que a T. "solidus" do MB.
- O MA penetra na junta, preenchendo-a por acção capilar

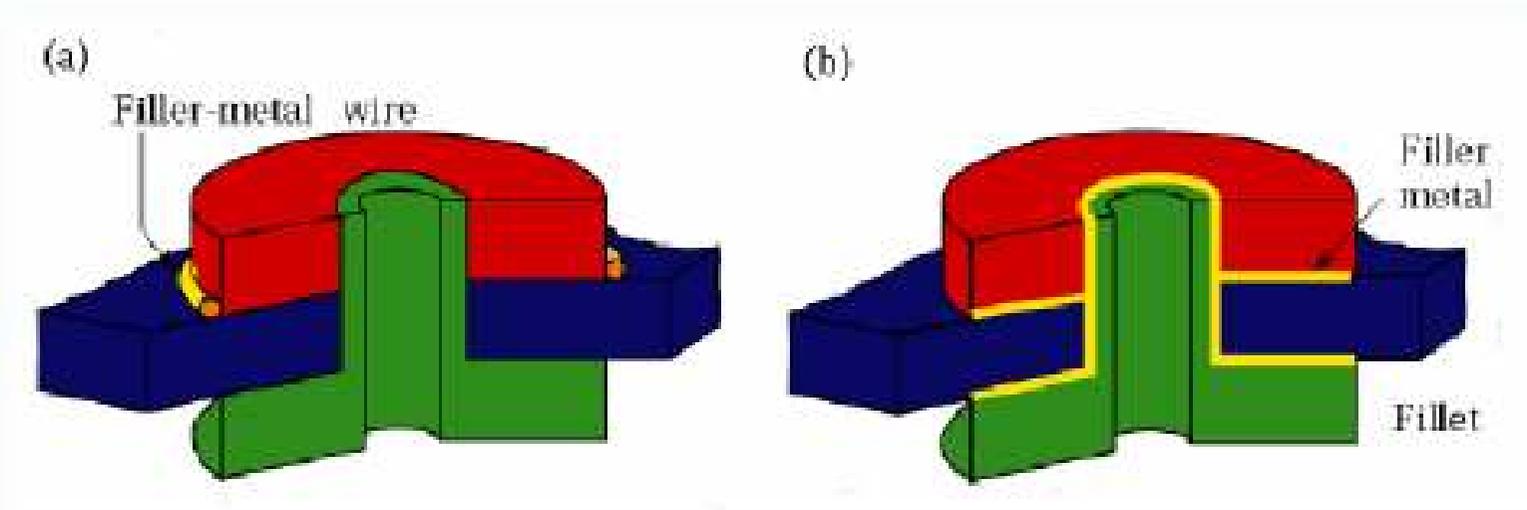


Brasagem

- Brasagem fraca - a T. fusão do MA é inferior a 450 °C.
- Brasagem forte - a T. fusão do MA é superior a 450 °C

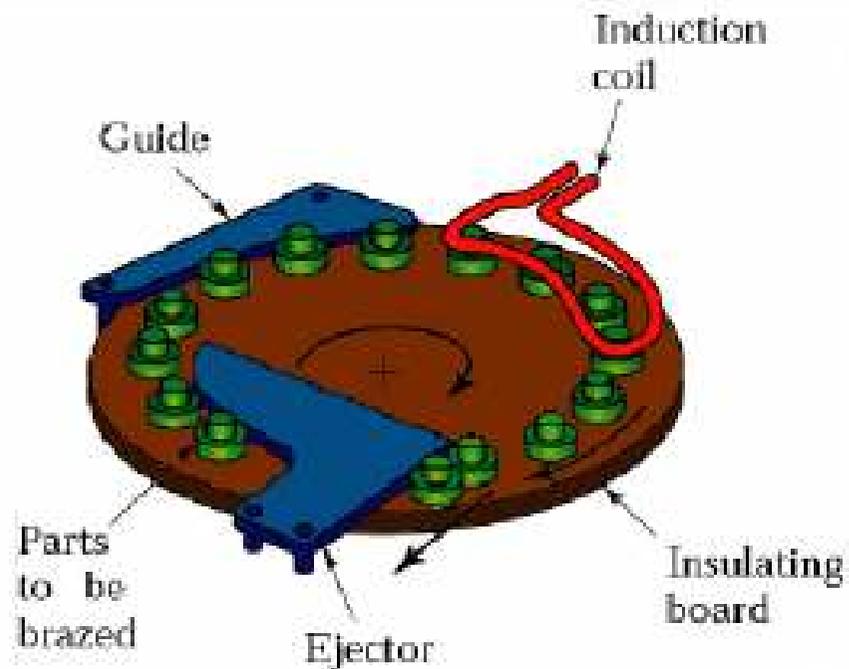
Brasagem

Brasagem no forno



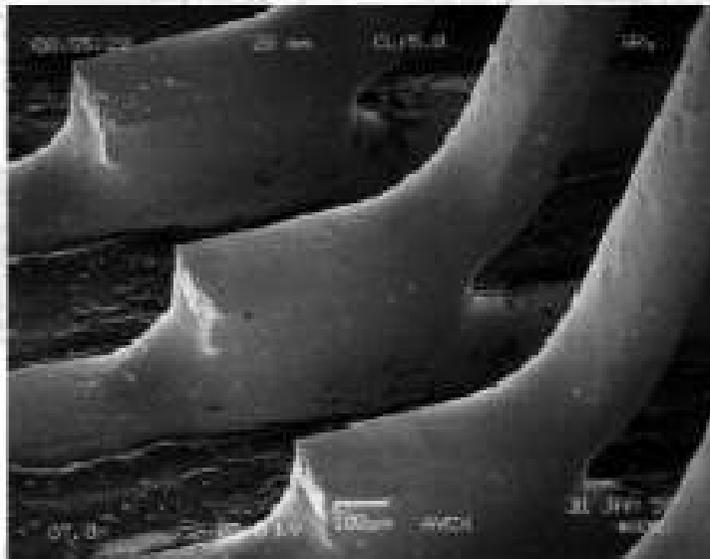
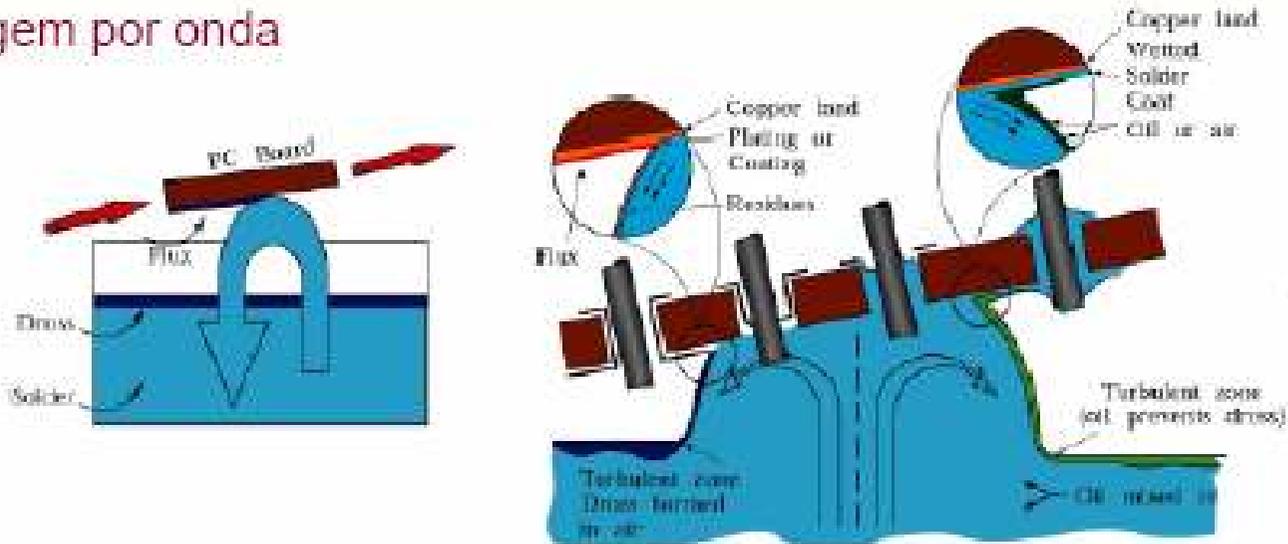
Brasagem

Brasagem por indução



Brasagem

Brasagem por onda



Brasagem

APLICAÇÃO

- O maior campo de aplicação de qualquer um destes processos é na soldadura de metais dissimilares, união de peças de pequena espessura, união de metais tratados termicamente e onde não são permitidas deformações, uniões metal cerâmico, etc.
- A brasaqem fraca encontra o seu maior campo de aplicação na indústria eléctrica e electrónica , para a soldadura de componentes e placas de circuitos impressos, ligações de terminais eléctricos, etc.
- A brasaqem forte encontra o seu maior campo de aplicação na indústria eléctrica e electrónica, na industria automóvel e aeronáutica, etc.

METALÚRGIA DA SOLDADURA

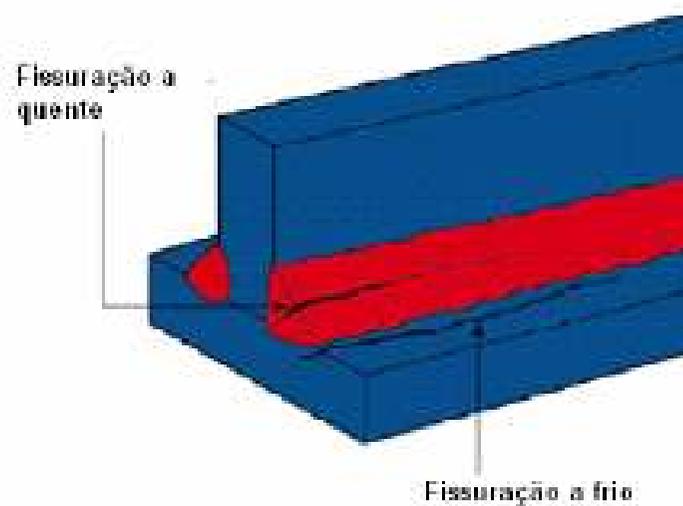
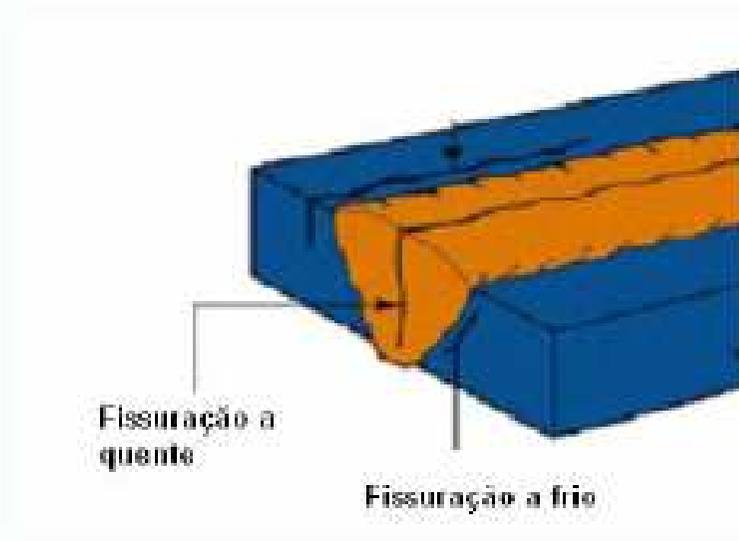
MATERIAIS E PROCESSOS

Problemas Metalúrgicos dos aços carbono

Fissuração a frio (fissuração pelo hidrogénio)

- Ocorre geralmente na ZAC (zona afectada pelo calor)
- Surge quase sempre no arrefecimento, quando se atingem temperaturas baixas (< 300°C), podendo em alguns casos ocorrer horas depois da soldadura ter terminado.
- Ocorre quando existirem simultaneamente numa soldadura:
 - a) Hidrogénio introduzido na soldadura devido a:
 - Humidade na superfície dos consumíveis
 - Produtos da combustão na soldadura oxiacetilénica
 - Presença do hidrogénio no MB ou nos gases de protecção
 - Revestimentos celulósicos de eléctrodos em soldadura por arco eléctrico
 - b) Elevado nível de tensões na junta: provocado pelas contracções de arrefecimento e rigidez da junta.
 - c) Microestruturas duras e frágeis, dependendo o seu aparecimento da composição química do aço e das velocidades de arrefecimento
 - d) Baixas temperaturas (entre 200 e 100°C)

Fissuração a frio



Fissuração a frio

- O hidrogénio é introduzido na soldadura através do banho de fusão na sua forma instável de H+, ficando dissolvido na estrutura do aço durante a solidificação.
- Durante o arrefecimento a solubilidade do hidrogénio vai diminuindo, especialmente quando se dá a transformação $\gamma \rightarrow \alpha + perlite$
- O material depositado, que tem geralmente um teor em carbono menor que o MB, sofre a transformação $\gamma \rightarrow \alpha + perlite$ antes da austenite da ZAC se transformar em martensite.
- Uma vez que a solubilidade do hidrogénio na ferrite é menor que na austenite, o hidrogénio é rejeitado para a ferrite junto da interface austenite/ferrite+perlite.
- Dado o acréscimo do teor em hidrogénio na ferrite este tende a difundir-se para a zona auténica, na ZAC adjacente à zona fundida. Esta difusão é promovida pelo elevado coeficiente de difusão do hidrogénio na ferrite.
- Dado que o hidrogénio tem um baixo coeficiente de difusão na austenite (CFC) o hidrogénio tem dificuldade em difundir-se desta fase para o material fundido, antes de ocorrer a transformação martensítica, ficando "aprisionado" nesta fase, dando origem a uma estrutura sobre-saturada em hidrogénio.
- Ao precipitar o H+ vai passar à sua forma mais estável, a molecular: H₂. O que é acompanhado de um enorme aumento de pressão local (estado triaxial de tensões).
- O estado triaxial de tensões, sobreposto ao efeito das tensões que caracterizam o arrefecimento e das tensões resultantes da transformação da austenite/martensite, pode provocar a fissuração.

Fissuração a frio

Formas de prevenir a fissuração

- 1 - Controlo do teor de hidrogénio na soldadura
 - Processos de soldadura que conduzam a baixos teores de hidrogénio
 - Consumíveis com baixos teores em hidrogénio
 - Consumíveis básicos bem secos
 - Mb convenientemente limpo
- 2 - Controlo do nível de tensões:
 - Tipo de junta (reduzir o mais possível os efeitos de entalhe)
- 3 - Controlo da estrutura metalúrgica
 - Pré-aquecimento
 - Pós-aquecimento
- 4 - Escolha do MA:
 - Eléctrodos de baixa resistência permitem diminuir o nível de tensões na ZAC.

Fissuração a frio

- Se o **carbono equivalente** (CE) for superior a 0.35%, o material é susceptível de fissurar a frio.
- Para aços em que a %C > 0.22:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} + \frac{\%Cr + \%V + \%Mo}{5}$$

- Para aços em que a %C varia entre 0.07 e 0.22:

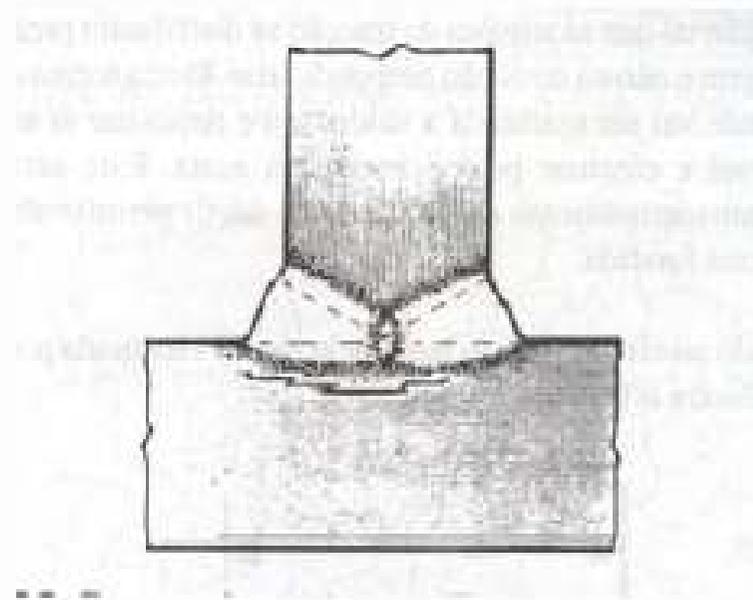
$$CE = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Mn + \%Cu + \%Cr}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5\%B$$

- Nota: a **Entrega Térmica** (J/mm) é dada por: $E_T = \frac{VI}{v} \eta$
Em que V – voltagem
I – Intensidade de corrente
v – velocidade de soldadura (mm/s)
η - rendimento do processo

- Quanto maior a entrega térmica menor é a velocidade de arrefecimento, o mesmo se verifica quando se fazem pré ou pós-aquecimentos.

Arrancamento lamelar

- O arrancamento lamelar é uma forma de fissuração **que ocorre em juntas soldadas altamente constrangidas** e com uma geometria tal que o MB é solicitado à tracção perpendicularmente à direcção de laminagem.
- O AL resulta de uma **combinação de tensões altamente localizadas** devidas ao processo de soldadura e **a uma baixa ductilidade do MB no sentido da espessura** devida à presença de inclusões não metálicas alongadas e alinhadas paralelamente à direcção de laminagem.
- O AL é iniciado por descoesão destas inclusões (silicatos ou sulfuretos) junto à soldadura na ZAC ou imediatamente adjacente a esta.



Arrancamento lamelar

Formas de evitar o arrancamento lamelar:

- Usar aços de boa ductilidade: tais como os tratados com Cério (Ce), que permitem obter inclusões de sulfuretos de forma preferencialmente esférica, mesmo em aços laminados a quente
- Actuar na configuração da junta: de modo a promover uma distribuição mais homogénea e menos localizada das tensões: utilizar sempre que possível juntas de configuração tal que as tensões de tracção se distribuam preferencialmente na direcção da laminagem e não na direcção perpendicular.
- Usar eléctrodos que permitem depositar materiais de baixa tensão de cedência: uma vez que estes têm boa capacidade para acomodar as tensões de contracção de soldadura. No entanto, as características mecânicas finais requeridas para a junta limitam essa possibilidade.
- Utilizar a técnica de “amanteigamento”: maquinando a zona do MB onde vai ser realizada a soldadura e depositar aí um material dúctil, como ligas de níquel, e efectuar posteriormente a junta. Este depósito dúctil permite absorver as tensões de contracção na zona fundida.

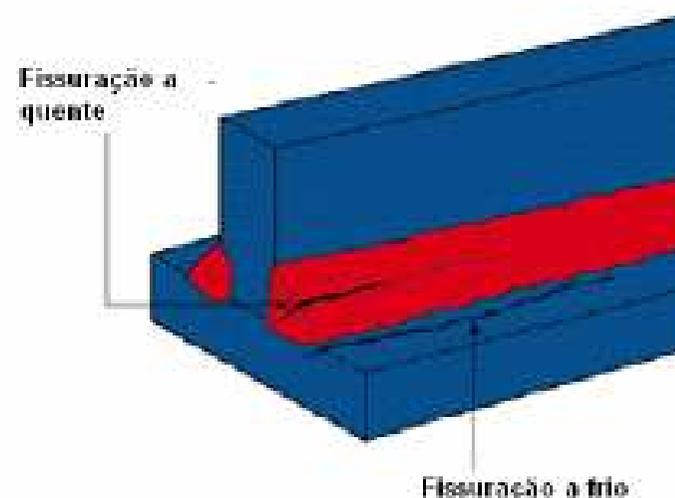
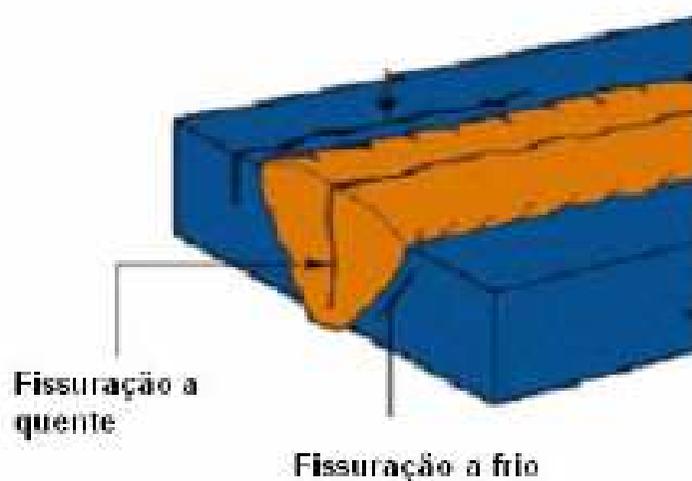
Fissuração a quente

- Diz-se FQ pelo facto de ocorrer a T superiores a 1200°C, a estas temperaturas as superfícies oxidam-se, ganhando uma cor azulada.
- As fissuras ocorrem geralmente a meio do cordão, devido ao modo de solidificação da soldadura: como o MB está mais frio, a soldadura solidifica a partir da zona de fusão, o que significa que a última zona a solidificar é a zona central do cordão, a qual é por isso mais frágil.
- **O principal factor que afecta a FQ é a composição química do material**: O MB contém elementos que se existem em quantidade suficiente podem segregar formando filmes de baixo ponto de fusão entre os cristais.
- Sob acção das tensões que ocorrem durante a solidificação esses filmes podem abrir e dar origem a fissuras.
- A fonte mais comum deste problema é o enxofre e o fósforo, cujo efeito é agravado pelo aumento do teor em carbono

Fissuração a quente

Para minimizar este problema:

■ A % de S nos aços deverá ser inferior a 0.04% ou utilizar uma relação $Mn/S > 20$, pois o S é mais afim para o Mn do que para o Fe, formando sulfuretos de manganês, em vez de sulfureto de ferro, eutético que se forma a 985°C e precipita na forma de filmes líquidos.



Problemas metalúrgicos aços inoxidáveis auteníticos

Precipitação de carbonetos de cromo (sensitização)

- Os carbonetos de cromo podem precipitar nos limites de grão quando estes aços são sujeitos a temperaturas entre os 500 e os 900 °C.
- A sua formação acarreta uma diminuição do teor de cromo junto dos limites de grão, criando, assim, condições para o aparecimento de corrosão intercrystalina devido ao empobrecimento em Cr nesse local.
- Ocorre normalmente nas zonas adjacentes ao cordão de soldadura, as quais permaneceram, devido aos ciclos térmicos de soldadura, durante tempos relativamente longos na gama crítica de temperaturas (500 a 900°C).

Formas de evitar ou minimizar a sensitização

- Utilizar aços inoxidáveis com baixo teor em carbono: pois quanto mais alto for o teor em C, menor será o tempo necessário para que ocorra a sensitização
- Utilizar ET (Entrega térmica) baixas: pois assim as taxas de arrefecimento são superiores (o tempo de permanência na gama de temperaturas críticas é menor).
- Utilizar aços estabilizados com Ti ou Nb: pois o C é mais afim para o Ti e o Nb do que para o Cr.
- Efectuar um TT de hipertêmpera: consiste em aquecer a peça a uma temperatura da ordem dos 1000 a 1200 °C, às quais os carbonetos de cromo se vão dissolver, arrefecendo-a em seguida muito rapidamente. Este arrefecimento permite a passagem na gama de temperaturas críticas de sensitização muito rapidamente, de modo a não ocorrer precipitação de carbonetos de cromo.
- Esta solução, ainda que tecnicamente correcta, é muitas vezes difícil ou mesmo impossível de executar, e se realizado conduz normalmente a deformações inaceitáveis nas peças soldadas.

- Nota: A Entrega Térmica é dada por:
$$E_T = \frac{VI}{v} \eta$$

Fissuração a quente

- ❖ *É também susceptível de ocorrer nestes aços devido às elevadas tensões de contracção que surgem nestes aços durante a fase do arrefecimento, pois comparados com os aços C ou C/Mn, os aços inoxidáveis austeníticos têm:*
 - *Um coeficiente de dilatação térmica cerca de 50% mais elevado*
 - *Uma condutibilidade térmica cerca de 40% inferior*

- ❖ *Os mecanismos que levam à FQ nestes aços são os mesmos que se verificam nos aços carbono, sendo por isso de natureza interdendrítica e ocorrendo a $T_s > 1200$ °C.*

Fissuração a quente

- ❖ A susceptibilidade a este tipo de **fissuração diminui com a existência de uma pequena quantidade de ferrite**, sendo praticamente nula para 2 a 8% de ferrite na estrutura, devido a:
 - Uma maior ductilidade a alta temperatura da ferrite em relação à da autenite, que permite uma melhor adaptação do metal fundido às tensões que possam estar na origem da FQ.
 - Uma maior solubilidade de elementos como o Si, P e S na ferrite do que na autenite. Esta maior solubilidade vai evitar o aparecimento de filmes líquidos de baixo ponto de fusão.
 - Serem as estruturas austeno-ferríticas muito mais finas do que as totalmente austeníticas. Este facto torna muito mais difícil a formação de um filme contínuo de um composto de baixo ponto de fusão nos limites de grão.

Fissuração a quente

- A fixação de um teor máximo para a ferrite está relacionado com o aparecimento da fase σ , dura e frágil.
- Os melhores resultados são conseguidos, na maioria dos casos, com um teor em ferrite no cordão entre os 3 e os 5%.

