

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET-MG**

APOSTILA
TECNOLOGIA DA SOLDAGEM

Soldagem ► Play

Profa. Ivanilza Felizardo, Dra.

Última atualização Março de 2025

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CAMPUS NOVA GAMELEIRA – BH/MG**

O QUE ESSAS IMAGENS TEM EM COMUM?



QUAIS PROCESSOS DE UNIÃO FORAM UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DESTAS PEÇAS?



MÉTODOS DE UNIÃO

Tipos de processos de união de peças metálicas

- Rebitagem
- Parafusagem
- Conformação mecânica (por dobra)
- Colagem
- Brasagem
- Soldagem
- Soldabrasagem

Como diferenciar os processos de união?

- Pelo tipo de ligação
 - Classificação dos processos de união

Forças macroscópicas X Forças microscópicas

Forças macroscópicas

Não há formação de ligações químicas entre as partes a serem unidas.

Forças microscópicas

Há formação de ligações químicas (ligações metálicas ou de Van der Waals) entre as partes a serem unidas.

Forças macroscópicas

Rebite, parafusos, união por dobra (transformação física)

Não há formação de ligações químicas entre as partes a serem unidas.

A resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite mais as forças de atrito entre as superfícies de contato.

Forças microscópicas

Há formação de ligações químicas (ligações metálicas ou de Van der Waals) entre as partes a serem unidas.

A união é conseguida pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, podendo utilizar um material intermediário adicional à junta.

COLAGEM X BRASAGEM X SOLDAGEM

Metal de base: material de base metálico.

Metal de adição: material de adição metálico.

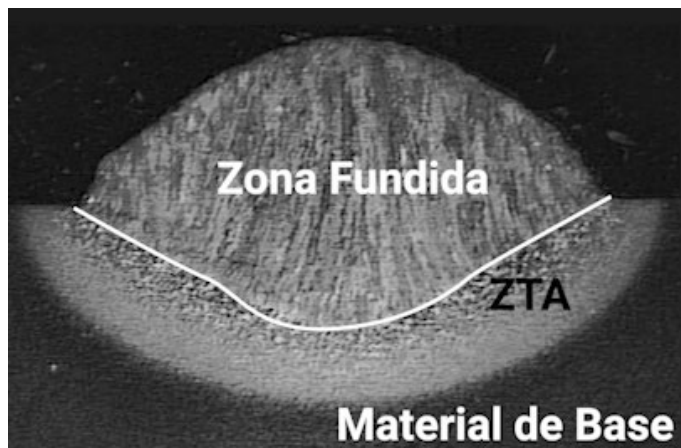
Peças a serem unidas: material de base ou metal de base (MB).

Material adicionado à junta: material de adição ou metal de adição (MA).

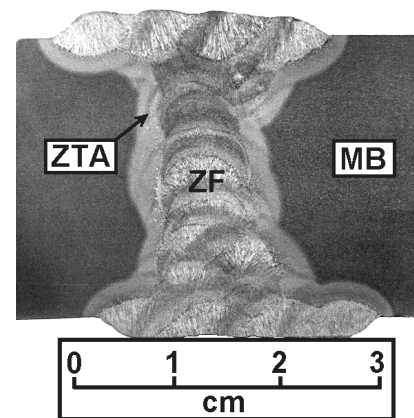
Junta (após ser soldada ou brasada): zona fundida (ZF).

Fusão: ocorre a transformação de fase do material

ZTA: zona termicamente afetada pelo calor



solda de múltiplos passes



Colagem e brasagem exige um material adicional para a união.

Em todos ocorre **coalescência** (união intensa).

Colagem: MA = material adesivo (existe um processo de cura do MA).

Brasagem: MA = material de adição (ocorre fusão do MA).

Soldagem: fusão do material de base e do material de adição (se utilizado).

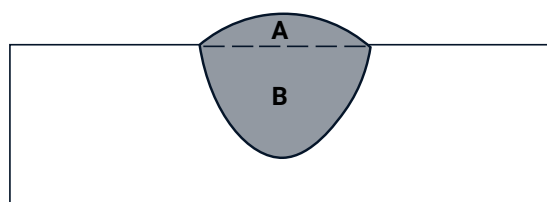
Brasagem é um processo de união de materiais em que a coalescência (união intensa) é obtida pelo aquecimento a uma temperatura adequada e suficiente para fundir apenas o material de adição (metálico). A temperatura de fusão do metal de adição é menor que a temperatura solidus (temperatura abaixo da qual o material é completamente sólido) do material de base (que pode ser metálico ou cerâmico). Brazing, quando o metal de adição funde acima de 450°C. Soldering, quando o metal de adição funde abaixo de 450°C. Na brasagem (independentemente de ser brazing ou soldering), apenas o metal de adição funde e é necessária uma boa molhabilidade do metal líquido na superfície sólida do material de base. A molhabilidade depende das tensões superficiais atuantes no sistema que é fortemente influenciada pela presença de impurezas e óxidos superficiais. A aderência na brasagem é obtida pela combinação da ação capilar (movimento do líquido) e da difusão atômica (movimentação no sólido).

Soldering: metal de adição fundi numa temperatura inferior a 450°C (termo soldering foi traduzindo por solda branda ou solda fraca – *acredito não ser o melhor termo técnico e prefiro adotar brasagem branda ou simplesmente soldering*).

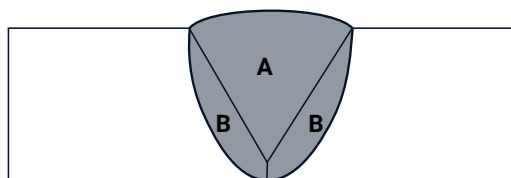
Brasagem: metal de adição fundi numa temperatura superior a 450°C e inferior a temperatura solidus do material de base.

Diluição em soldagem – parcela do material de base que funde e passa a fazer parte do material de solda.

$$\text{diluição} = \frac{\text{massa fundida do material de base (B)}}{\text{massa total do cordão de solda (A+B)}} * 100\%$$



cordão sobre chapa



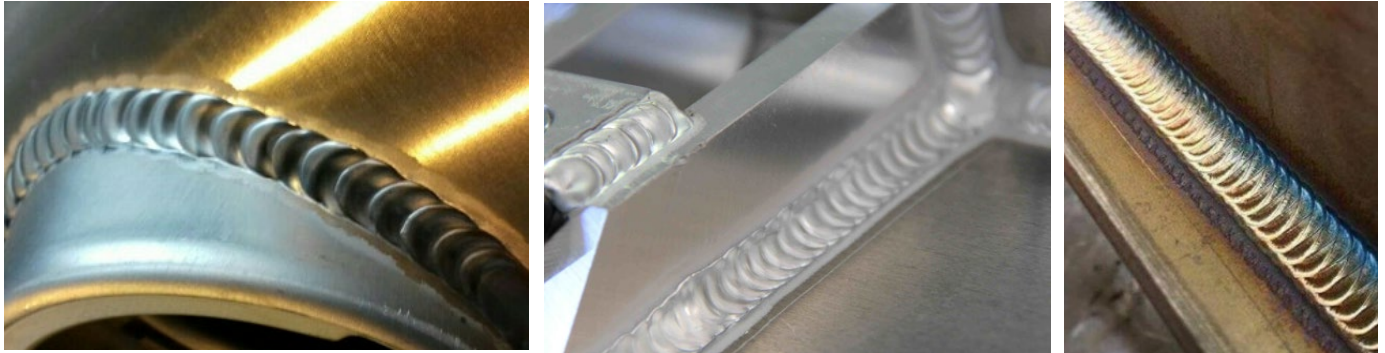
solda em chanfro

DIFERENÇA ENTRE SOLDA E SOLDAGEM

Soldagem processos, técnicas

Solda produto

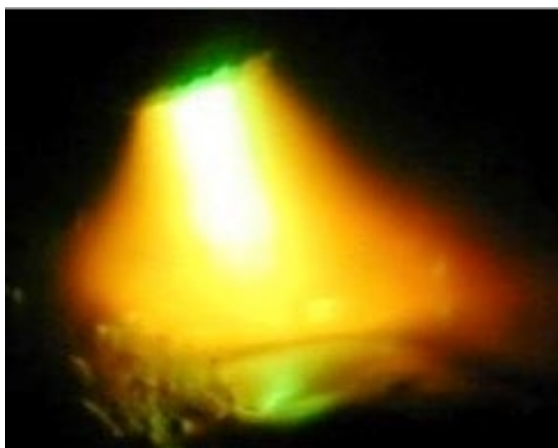
Cordões de solda de alta qualidade



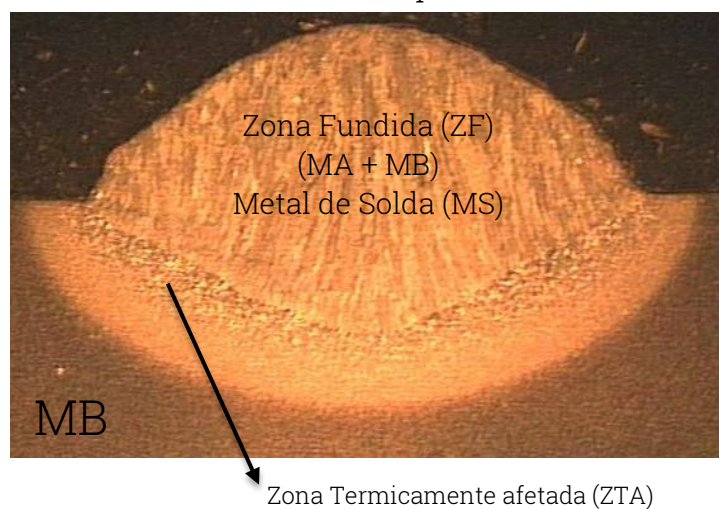
Cordões de solda de baixa qualidade



Arco Elétrico

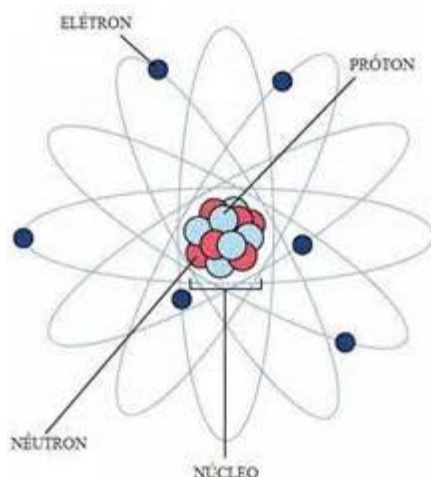


Cordão sobre chapa



TIPOS DE MATERIAIS – MATERIAIS SOLDÁVEIS – SOLDABILIDADE

Tudo é formado por átomos e é a estrutura geral do átomo que diferencia um material do outro.



Átomos: compostos por pelo menos um próton e um elétron, podendo apresentar nêutrons (com exceção do átomo de hidrogênio que não possui nêutron e que consiste apenas de um elétron girando em torno de um próton).

Átomo estável possui oito elétrons na última camada (total de 7 camadas). Hélio, neônio, criptônio, xenônio e radônio – gases nobres.

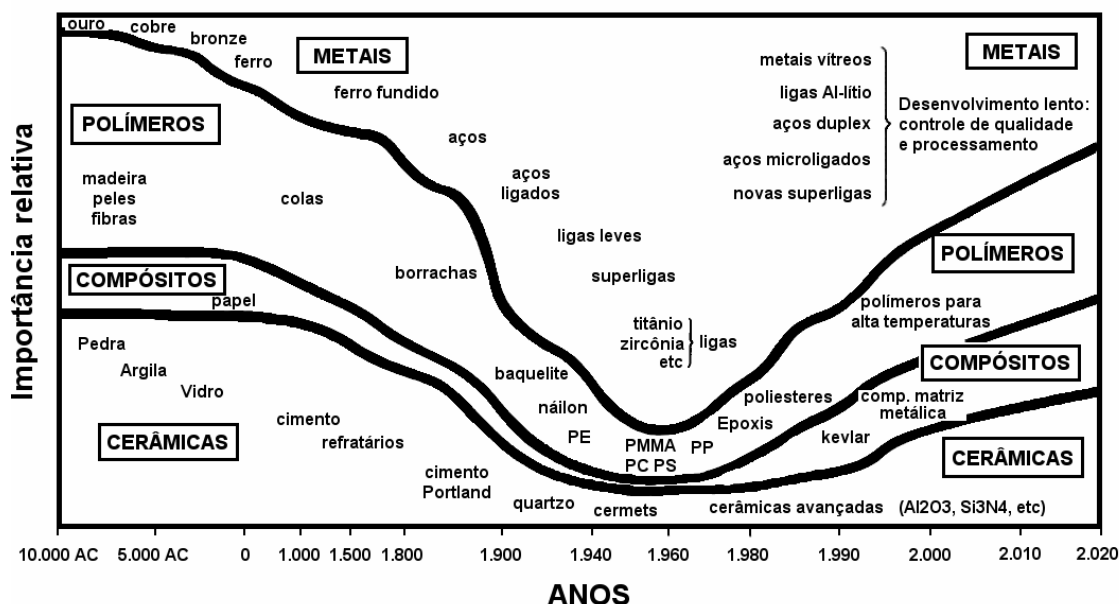
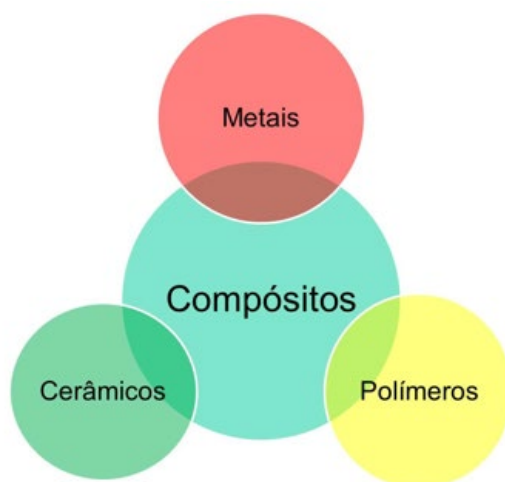
Outros átomos para se tornarem estáveis precisam combinar entre si – ligações químicas – ligações covalentes; ligações iônicas; ligações metálicas.

Ligações covalentes: quando os átomos compartilham os elétrons – ligação direcional. Exemplos: moléculas de água, diamantes, silício, germânio, materiais poliméricos (polímeros).

Ligações iônicas: quando um átomo cede, definitivamente, um elétron da última camada e outro recebe, definitivamente, esse elétron. Exemplos: cloreto de sódio (sal de cozinha) e materiais cerâmicos.

Ligações metálicas: quando a estrutura é formada por íons positivos e uma nuvem eletrônica negativa. Os elétrons não se encontram ligados a qualquer átomo em particular, eles estão mais ou menos livres para se movimentar. Ligação não direcional. Exemplos: metais e suas ligas.

CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS MATERIAIS



Fonte: Ciência dos Materiais James F. Shackelford

Metálicos		Não-Metálicos	
Ferrosos (C, Si e Fe)	Não-Ferrosos (sem Fe)	Naturais	Sintéticos
Aços C < 1,7 Aços de baixo, média e alto C e liga, inoxidável. Ferro Fundidos 1,8 < C < 4,5 Branco, cinzento e modular	Alumínio Cobre Zinco Magnésio Chumbo Estanho Titânio	Couro Asbesto (amianto / feixe de fibras de sais metamórficos) Polímeros (madeira / borracha)	Vidro Cerâmica Polímeros (Plásticos)

CONCEITO DE SOLDAGEM

“Processo de união de duas ou mais peças metálicas ou não metálicas...”.

“Processo de união de materiais...”.

“Operação que visa à união de materiais, assegurando na junta a continuidade das propriedades químicas e físicas, pela da fusão e diluição dos materiais de base e de adição envolvidos no processo”.

“Processo de união de materiais pela coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e/ou material de adição”.

“Operação que visa à união de materiais pela da aplicação de fusão e/ou pressão”

Processo de soldagem por fusão

“A energia é aplicada com o objetivo de fundir o material de base, a solubilidade se processa na fase líquida”.

Processo de soldagem por pressão

“A energia é aplicada com o objetivo de provocar uma tensão no material capaz de produzir a solubilidade na fase sólida”.

Assegurar na junta a continuidade das propriedades químicas e físicas



É indispensável que ocorra DILUIÇÃO



Requer energia

“Soldagem é um processo de união de materiais, mais especificamente, união de metais e polímeros. Na soldagem, a união é obtida pela aproximação dos átomos (nos metais) ou moléculas (nos polímeros). Diferentemente dos demais processos de união (parafusagem, rebitagem, colagem e brasagem), na soldagem ocorre a mistura dos materiais de base e de adição. Essa mistura pode ocorrer na fase sólida (nos processos de soldagem por pressão) ou na fase líquida (nos processos de soldagem por fusão). A soldagem é o único processo de união que proporciona a continuidade de propriedades entre os materiais unidos. Procura-se com a soldagem que as forças das ligações químicas na junta soldada sejam de natureza similar às atuantes nos próprios materiais a serem soldados. Também, que a junta preserve, ao máximo, as características físicas e químicas dos materiais de base. Os processos de soldagem podem ser utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas industriais. E ainda na deposição de materiais sobre uma superfície, nesse caso, para recuperar partes desgastadas ou para a formação de um revestimento característico ou mesmo para a fabricação de uma nova estrutura (manufatura aditiva).”

MATERIAIS SOLDÁVEIS = MATERIAIS RE-MANUFATURADOS

SOLDABILIDADE

Capacidade (facilidade) de um material de se deixar soldar, atendendo aos requisitos pré-estabelecidos em normas e projetos.

Soldabilidade Metalúrgica

Capacidade do material em responder bem a todos os fenômenos metalúrgicos impostos pelo procedimento de soldagem adotado. Está relacionado às alterações metalúrgicas que o material base sofre desde o aquecimento à fusão e da solidificação ao resfriamento à temperatura ambiente.

Soldabilidade Operacional

Diz respeito às questões operacionais do procedimento de soldagem - projeto e preparo de junta; método de execução da soldagem (se manual, com a habilidade, qualificação do soldador e se mecanizada ou automatizada, com as questões tecnológicas envolvidas), além das características dos materiais envolvidos - MB e MC (material de adição mais tipo de proteção). Está relacionada com a facilidade em executar todo o procedimento de soldagem.

Soldabilidade em Serviço

Diz respeito de como o material se comporta após a soldagem em serviço. Está relacionado à vida útil do material soldado. Desempenho do material soldado em serviço.

Testes de Soldabilidade

Conjunto de testes utilizado para avaliar a soldabilidade de um material:

- Teste de Tração
- Teste de Dobramento
- Teste de Impacto
- Testes Metalográficos
 - Macrografia
 - Micrografia
- Testes não-destrutivos
 - Líquido Penetrante
 - Ultrassom
 - Radiografia
 - Partícula Magnética

FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM DE METAIS

ORIGEM DAS FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM



química



radiante



mecânica



elétrica

FONTE DE ENERGIA QUÍMICA

Utiliza o calor gerado por reações químicas (todo material possui energia química armazenada em seu interior).

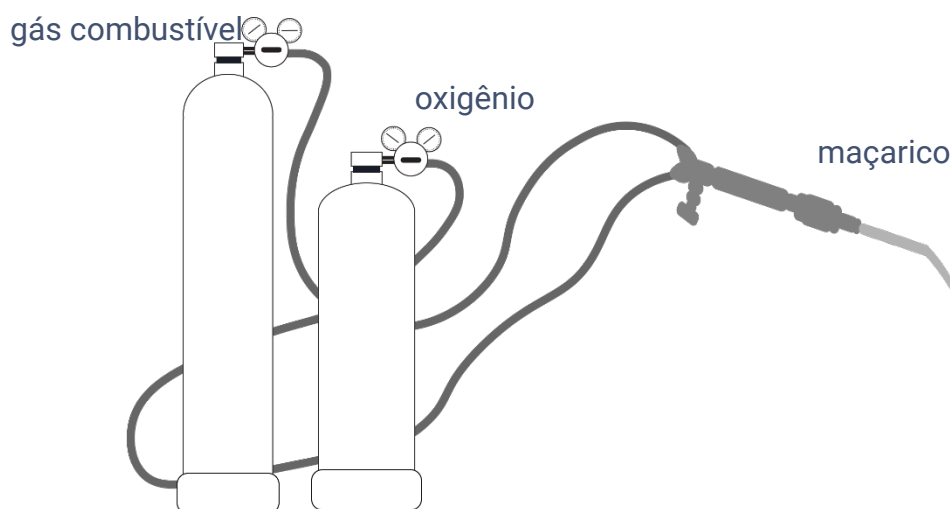
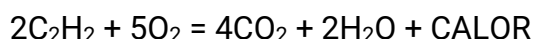
Tipos de transformações químicas dos materiais

Combustão ⇒ **SOLDAGEM OXIGÁS**

Interação entre metais e soluções ⇒ **SOLDAGEM POR ALUMINOTERMIA.**

Combustão: PROCESSO DE SOLDAGEM OXIGÁS

A energia química armazenada nos combustíveis é liberada na combustão. O combustível reage com o oxigênio produzindo água e dióxido de carbono e liberando parte da energia armazenada nas ligações químicas.





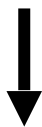
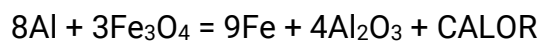
<https://i.ytimg.com/vi/oOvZdVawbNM/maxresdefault.jpg>



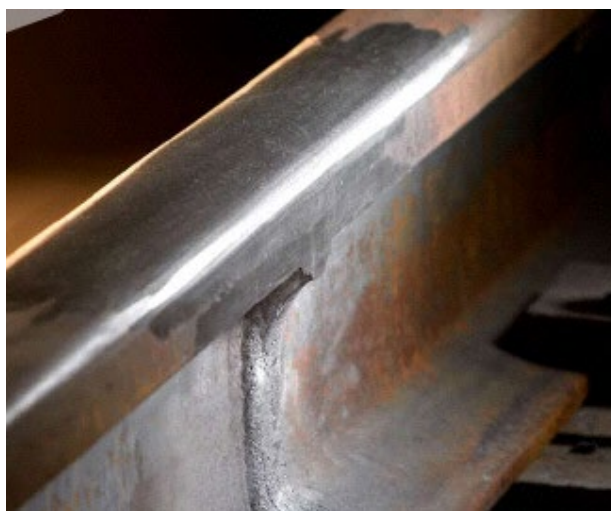
pexels-samuel-montemayor-9338480

Interação entre metais e soluções: SOLDAGEM POR ALUMINOTERMIA

Reação do alumínio com um óxido metálico dando como resultado o metal envolvido e o óxido de alumínio, com liberação de calor.



PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO



FONTE DE ENERGIA DE ALTA INTENSIDADE

Utiliza o calor gerado quando o material sofre um bombardeamento eletrônico, podendo ser de elétrons ou de fótons.

SOLDAGEM A LASER (bombardeamento de fótons)

SOLDAGEM POR FEIXE DE ELÉTRONS (bombardeamento de elétrons)



PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO

FONTE DE ENERGIA MECÂNICA

Utiliza o calor produzido a partir de movimentos mecânicos. Utiliza a dispersão ou ruptura dos filmes existentes sobre as superfícies, realizando a união sob pressão.



PROCESSOS DE SOLDAGEM POR PRESSÃO - NA FASE SÓLIDA



SOLDAGEM POR PRESSÃO A QUENTE

SOLDAGEM POR PRESSÃO A FRIO

SOLDAGEM POR EXPLOSÃO

SOLDAGEM POR ULTRA-SOM

SOLDAGEM POR FRICÇÃO

SOLDAGEM POR DIFUSÃO

SOLDAGEM POR FORJAMENTO

SOLDAGEM POR LAMINAÇÃO

FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA



elétrica

resistência elétrica



arco elétrico



SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA (PRESSÃO E FUSÃO)

Utiliza o calor produzido pela passagem da corrente elétrica num condutor.



Efeito Joule (I^2R)



SOLDAGEM A PONTO
SOLDAGEM POR COSTURA
SOLDAGEM POR PROJEÇÃO
SOLDAGEM POR PERCUSSÃO
SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO
SOLDAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA
SOLDAGEM UPSET

SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Arco elétrico consiste de uma descarga elétrica entre dois eletrodos que é sustentada através de um gás ionizado a alta temperatura chamada plasma.

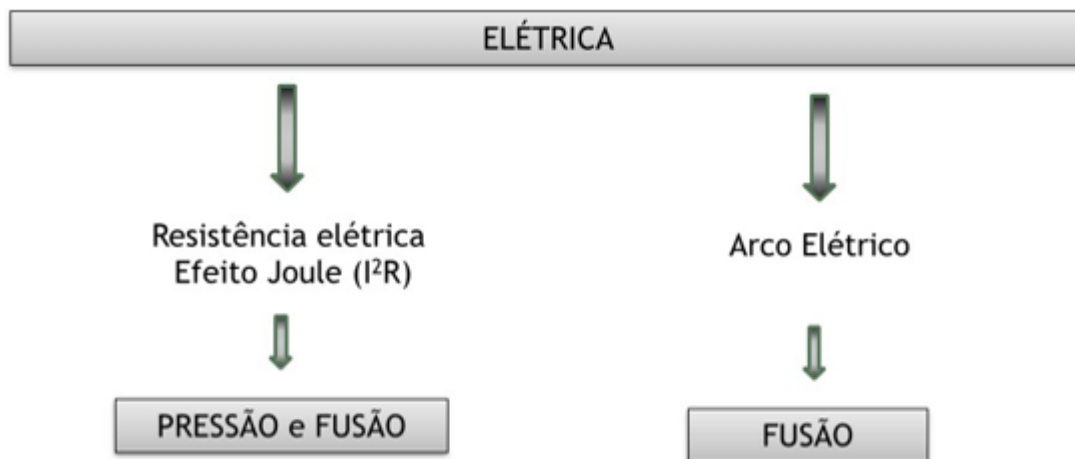


SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO
SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR
SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO
SOLDAGEM A PLASMA
SOLDAGEM MIG/MAG
SOLDAGEM TIG

SOLDAGEM POR PRISIONEIRO
SOLDAGEM POR ELETROESCÓRIA
SOLDAGEM ELETROGÁS

FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM DE POLÍMEROS

SOLDAGEM POR CORPO QUENTE
SOLDAGEM POR INFRAVERMELHO
SOLDAGEM POR GÁS AQUECIDO
SOLDAGEM POR IMPLANTE
SOLDAGEM POR ALTA FREQUÊNCIA
SOLDAGEM POR INDUÇÃO
SOLDAGEM POR FRICÇÃO
SOLDAGEM POR ULTRASSOM



PROCESSOS DE SOLDAGEM



oxigás
aluminotermia



laser
feixe de elétrons



pressão a quente
pressão a frio
forjamento
laminação
ultra-som
explosão
difusão
fricção

ponto
costura
descarga
capacitiva
centelhamento
percussão
projeção
upset



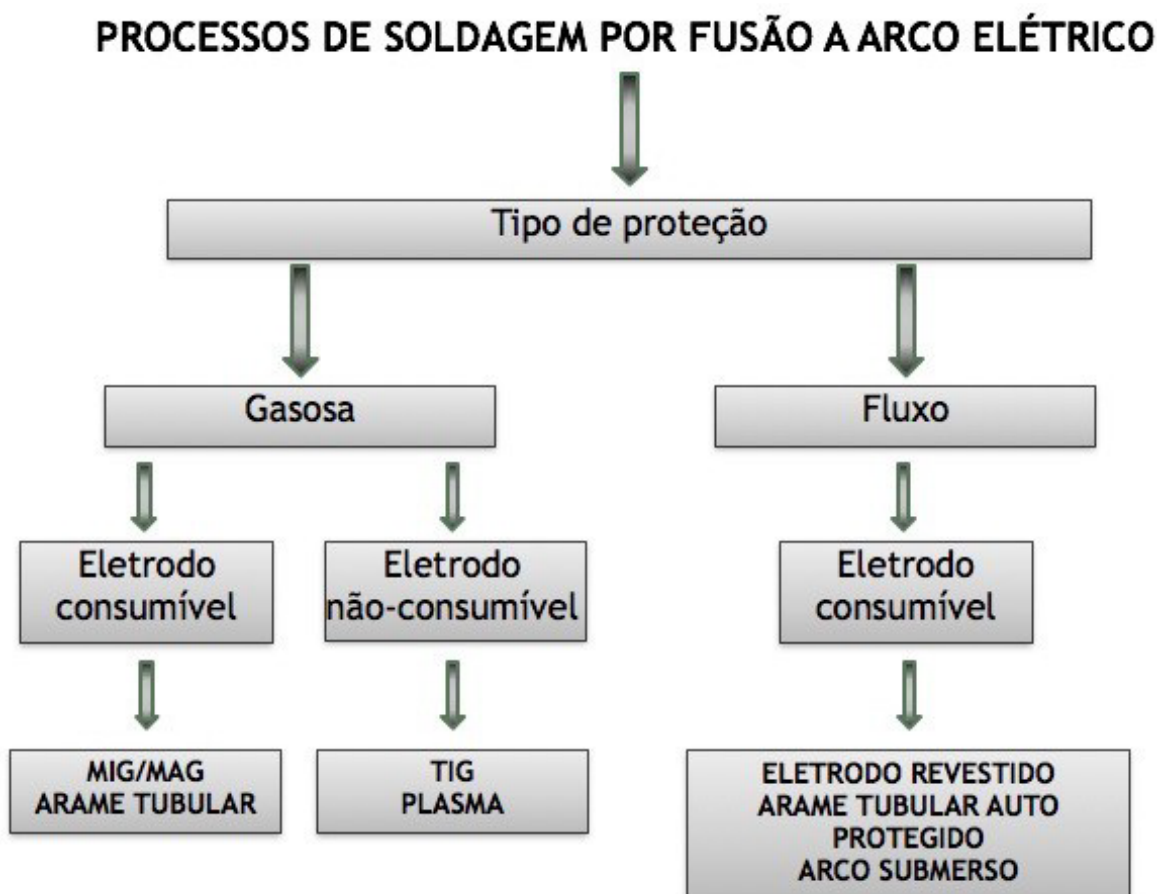
corpo quente
infravermelho
gás aquecido
implante
alta frequência
indução

eletrodo
revestido
arco submerso
tig
mig/mag
plasma
arame tubular
prisioneiro
eletroescória
eletrogás

PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO A ARCO ELÉTRICO

ARCO ELÉTRICO: “descarga elétrica controlada entre dois eletrodos, sustentada por um gás ionizado a alta temperatura chamado plasma, produzindo energia térmica suficiente para a fusão localizada do material de base e de adição (se existir)”.

SMAW	Shielded Metal Arc Welding (eletrodo revestido);
SAW	Submerged (arco submerso);
FCAW	Flux Cored Arc Welding (arame tubular);
GMAW	Gas Metal Arc Welding (arame sólido);
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding (eletrodo de tungstênio, TIG);
PAW	Plasma Arc Welding (Plasma).



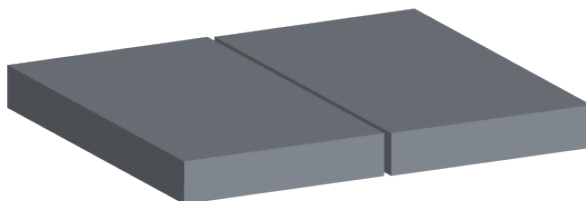
TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA DE SOLDAGEM

Classificação quanto à posição relativa entre as peças a serem soldadas

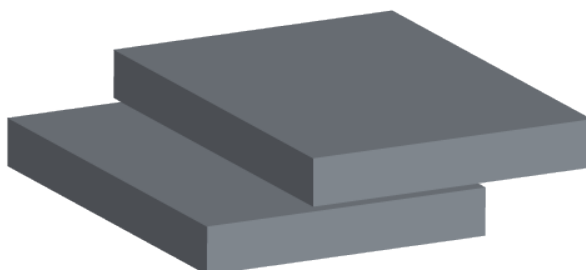
Tipos de Juntas

Junta – disposição relativa entre duas partes a serem unidas.

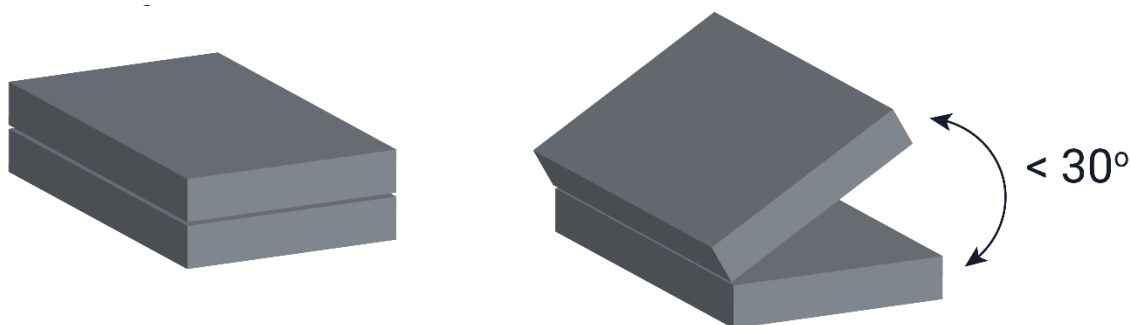
Junta de topo: as partes estão alinhadas no mesmo plano e a soldagem é executada entre as peças.



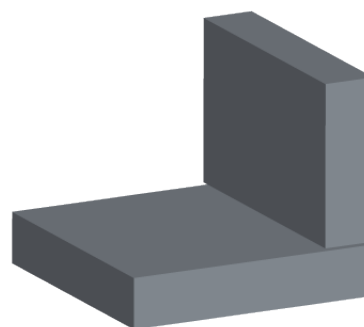
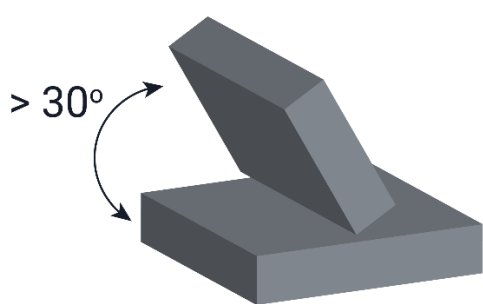
Junta sobreposta: uma peça é sobreposta a outra e a soldagem é executada entre a extremidade da peça superior e a superfície da peça inferior.



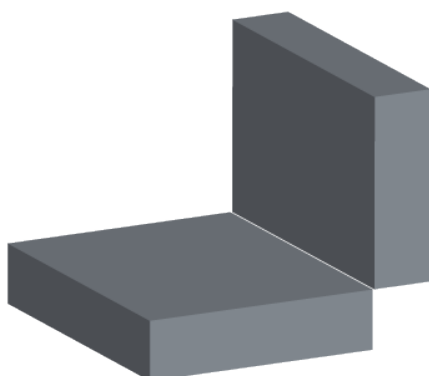
Junta de aresta: uma peça é sobreposta a outra, porém a região a ser unida é as extremidades das peças, que pode formar um ângulo de 0 até, no máximo, 30 graus.



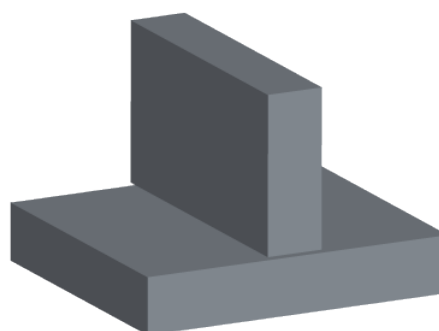
Juntas em ângulo: podem ser juntas em L, em quina ou em T (juntas de filete).



em L

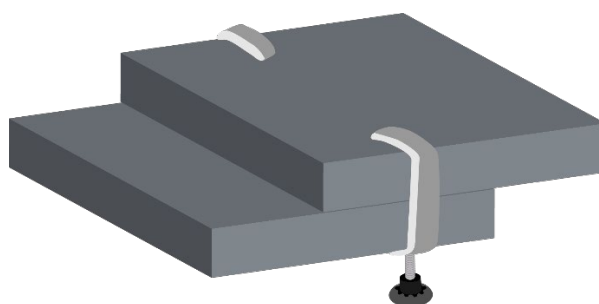


em quina



em T

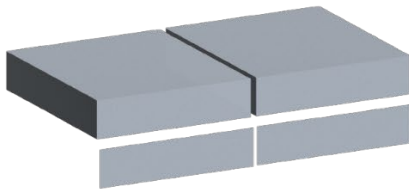
Grau de fixação – o quanto uma peça está bem-posicionada, fixa durante a soldagem. Quando maior o grau de fixação, menos o conjunto a ser soldado se move durante a soldagem.



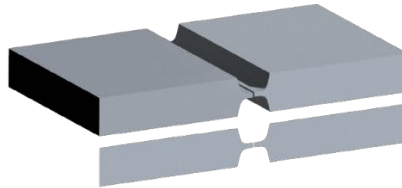
Classificação quanto à forma como as peças são preparadas

Tipos de Chanfros

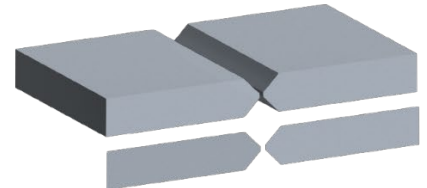
Chanfro (groove) – espaçamento, formato entre duas partes (peças) a serem unidas. O nome dado ao chanfro lembra a letra formada entre as partes.



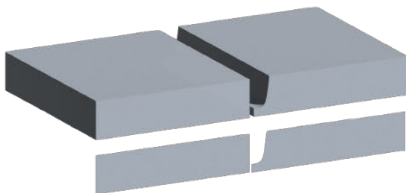
I



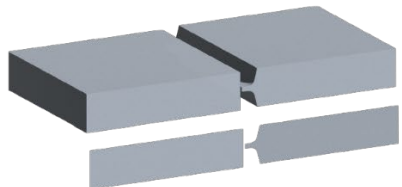
duplo U



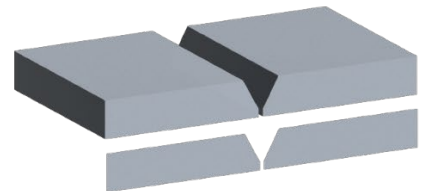
X ou duplo V



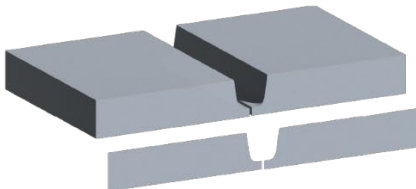
J



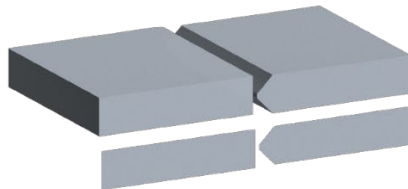
duplo J



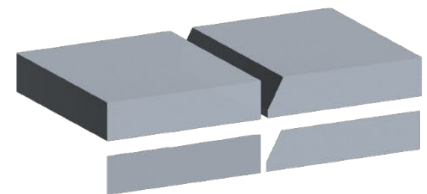
V



U



K

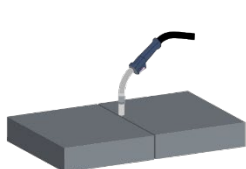


meio V

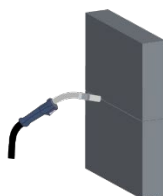
Classificação quanto à posição das peças em relação a soldagem

Posição de Soldagem

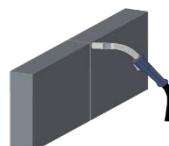
Posição de soldagem – direcionamento do arco elétrico em relação ao material de base. São estabelecidas em normas e referenciadas por números acompanhadas pelas letras G ou F e sempre que for a letra F, a junta é do tipo fillet.



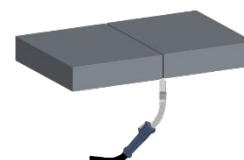
1G



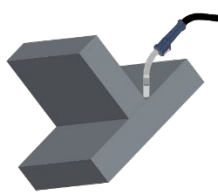
2G



3G

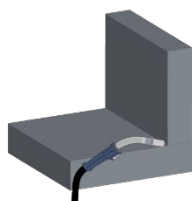


4G



1F

Plana



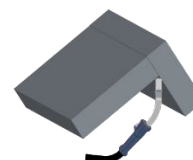
2F

Horizontal



3F

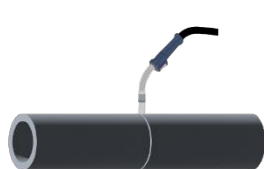
Vertical



4F

Sobrecabeça

Soldagem circunferencial - Tocha parada e tubo gira



1G

Plana



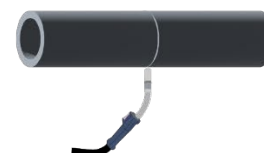
2G

Horizontal



3G

Vertical

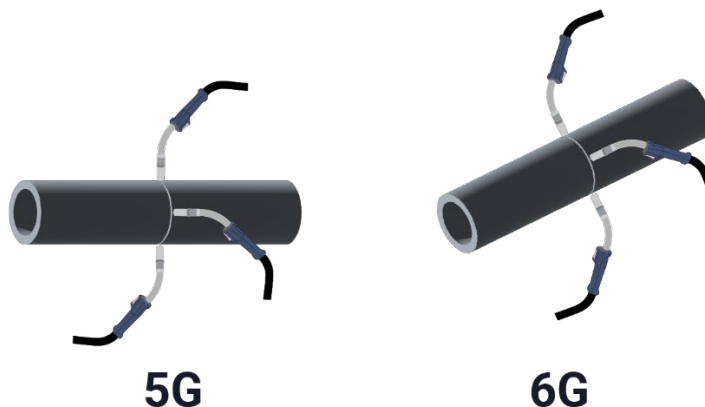


4G

Sobrecabeça

Soldagem Orbital (todas as posições)

Tubo parado e a tocha que gira ao redor do tubo

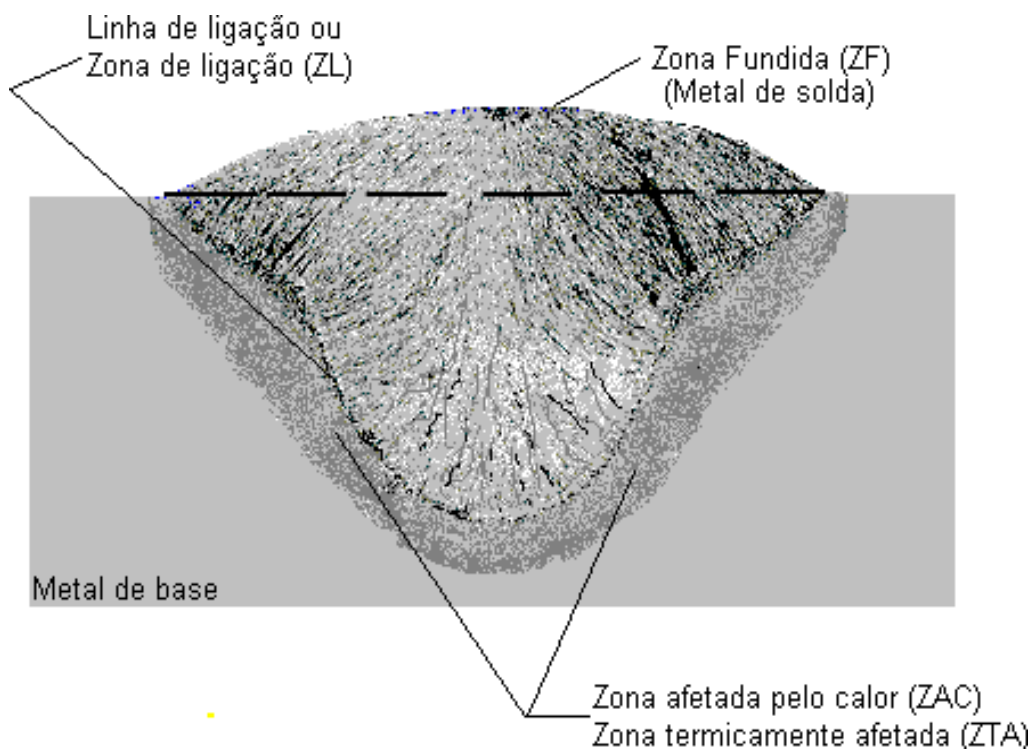


ALGUNS TERMOS TÉCNICOS EM SOLDAGEM

Material de base – materiais a serem unidos. Solda-se metais (metais de base) e polímeros. Brasa-se metais e cerâmicos.

Material de adição – material utilizado para preenchimento da junta soldada ou brasada.

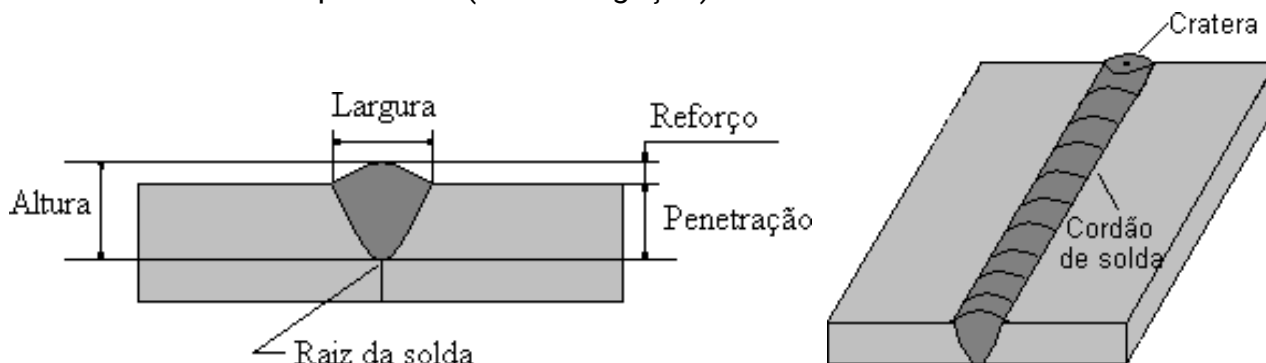
Cordão sobre chapa – é um cordão de solda executado sobre a superfície de uma chapa sem chanfro.



Zona fundida - material de adição e parte do material de base que fundiram e solidificaram, formando, o cordão de solda.

Zona termicamente afetada (ZTA) – região do material de base que não fundiu, mas sofreu alteração microestrutural devido ao aquecimento.

Margem da solda (zona de ligação) – linha (região) entre a zona fundida e a zona termicamente afetada pelo calor (zona de ligação)



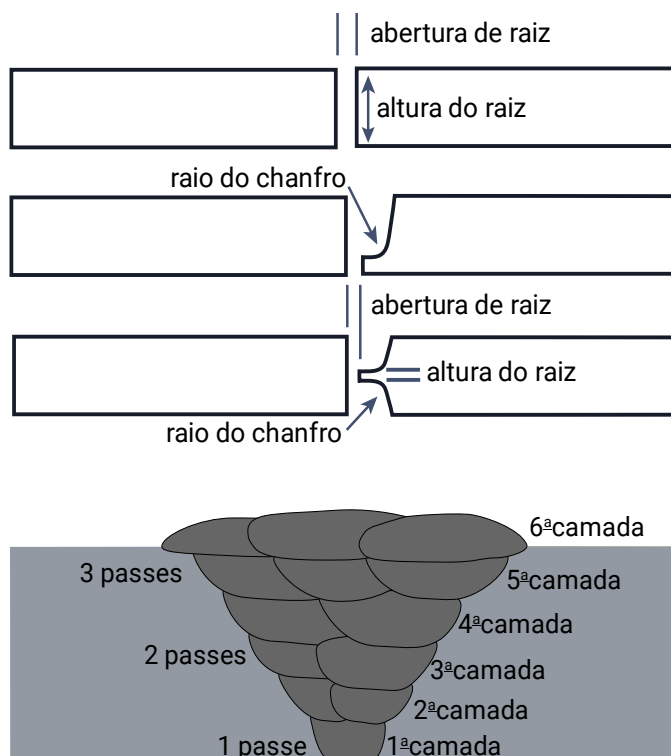
Abertura de raiz (root opening) – menor distância entre as partes a serem soldadas.

Altura do nariz – parte não chanfrada de um componente da junta.

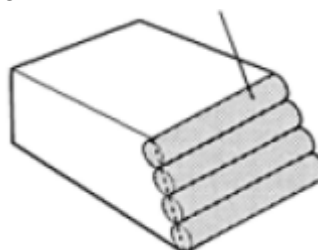
Passe de solda – depósito de material obtido pela progressão sucessiva de uma só poça de fusão. A solda pode ser feita em um único ou vários passes (ver camada de solda)

Camada de solda – deposição de um ou mais cordões de solda consecutivos e dispostos num mesmo plano.

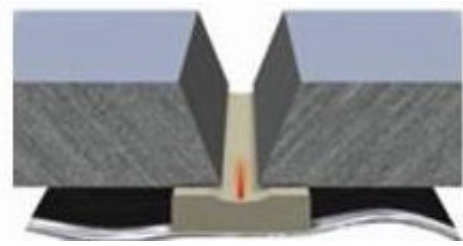
Amanteigamento (buttering) – depósito de um ou mais passes de solda sobre a face do chanfro que tem como objetivo produzir um metal de solda compatível para a subseqüentes etapas de soldagem.



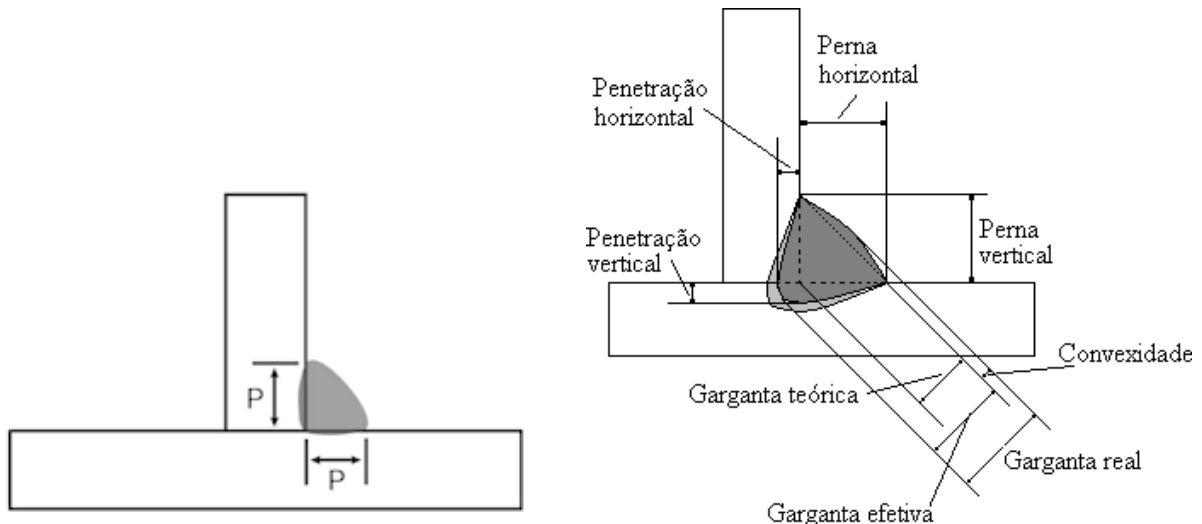
Amanteigamento – revestimento do chanfro



Cobre junta ou mata junta (backing) – material colocado na abertura de raiz para suportar o material fundido durante a soldagem, evitando que ocorra vazamento ou perda desse material. É muito utilizado cobre junta cerâmico.

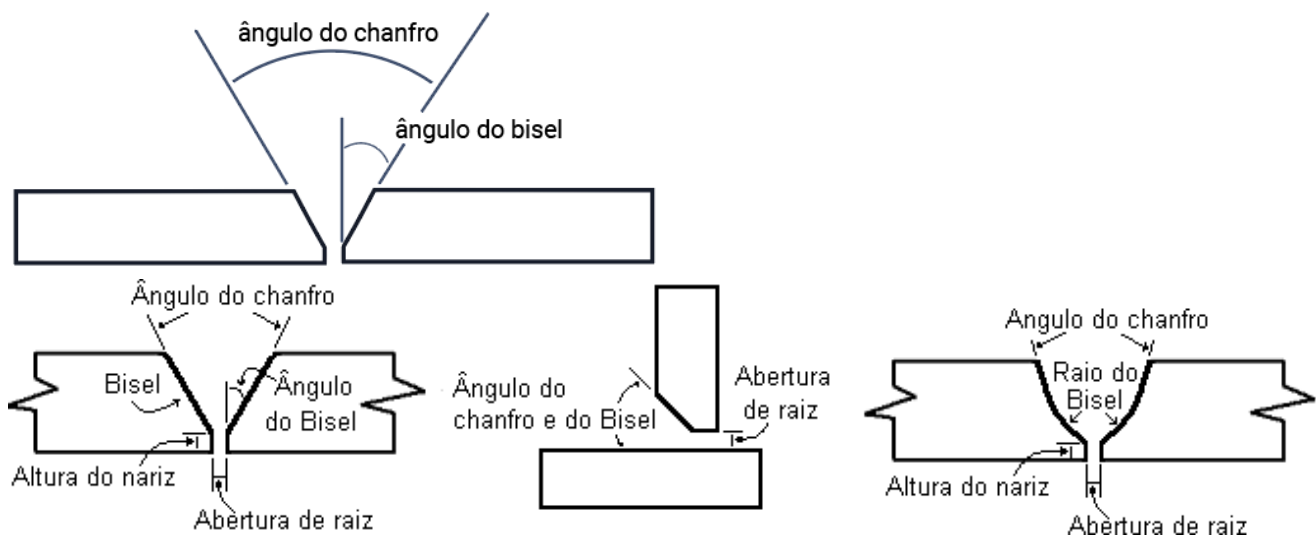


Perna – distância do início da raiz da junta à margem da solda em juntas de filete.



Ângulo do bisel (bevel angle) – ângulo formado entre a face da junta e uma linha perpendicular ao plano.

Ângulo do chanfro (groove angle) – ângulo formado entre as faces da junta.



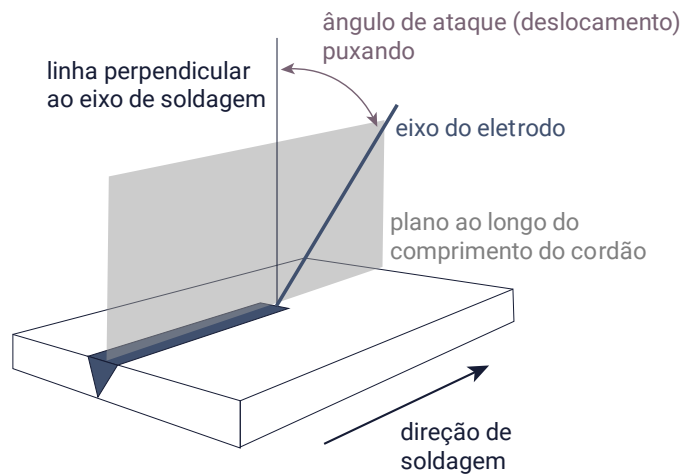
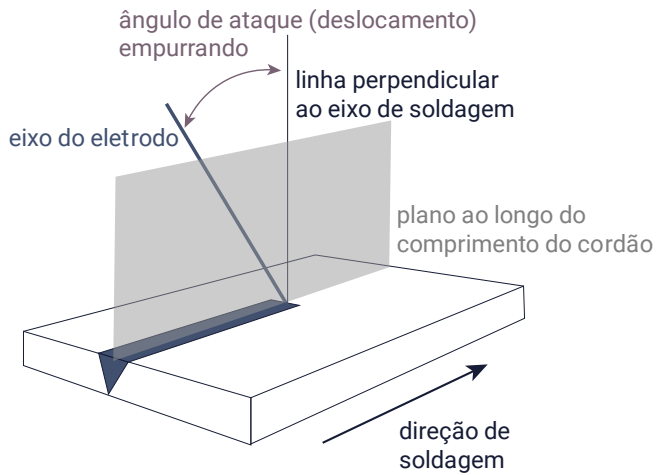
Ângulo do eletrodo (ou ângulo de soldagem) – depende de duas posições: do ângulo de deslocamento (ataque) e do ângulo de trabalho.

Ângulo de ataque (ou ângulo de deslocamento) (travel angle) – ângulo na direção de

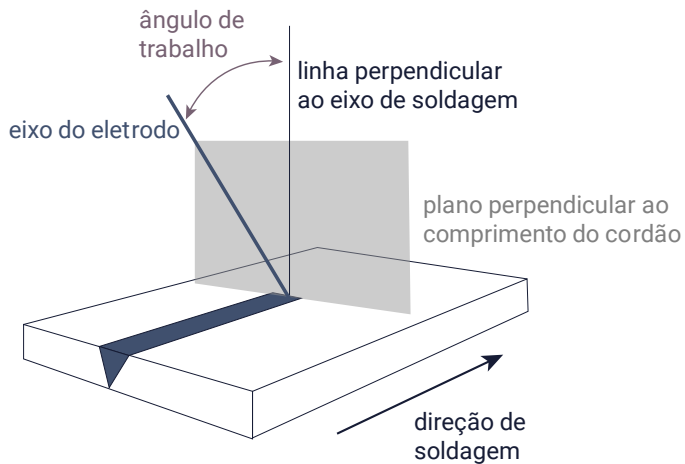
soldagem formado entre o eixo do eletrodo e uma linha perpendicular ao eixo de soldagem e no plano ao longo do comprimento do cordão de solda.

O ângulo de ataque pode ser negativo, quando o eletrodo (tocha) empurra a poça de fusão.

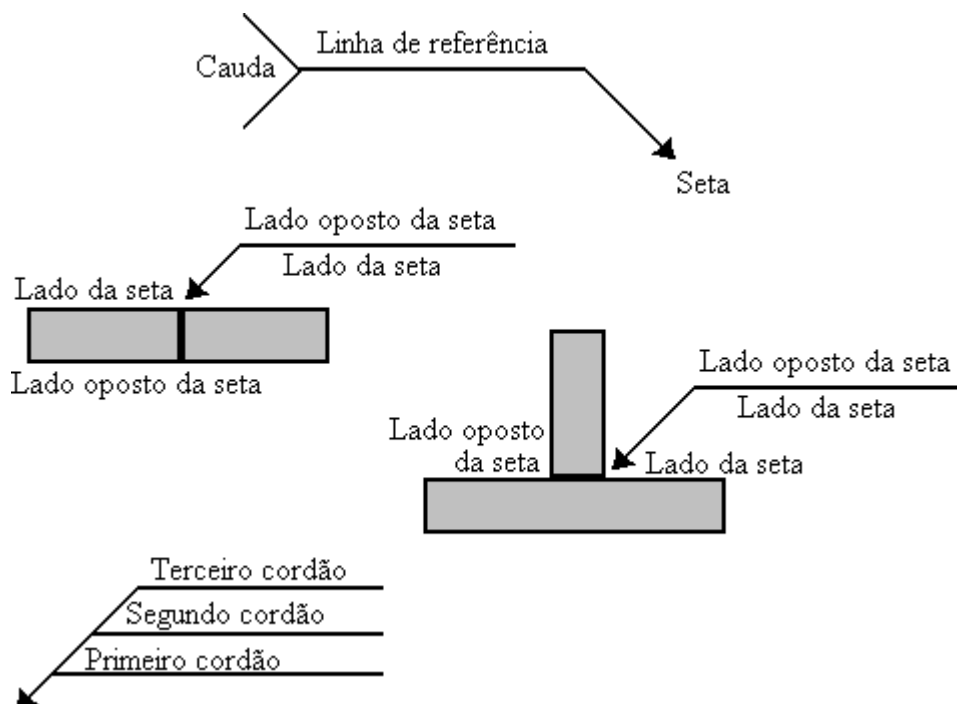
O ângulo de ataque pode ser positivo, quando o eletrodo puxa a poça de fusão.



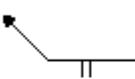
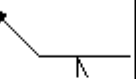
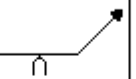
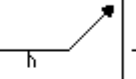
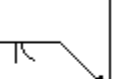
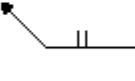
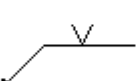
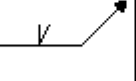
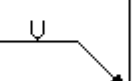
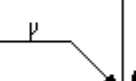
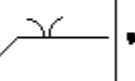
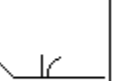
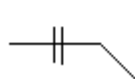
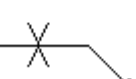
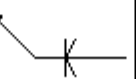
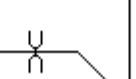
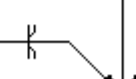
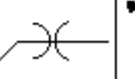
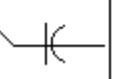
Ângulo de trabalho (work angle) – ângulo formado entre o eixo do eletrodo e uma linha perpendicular ao eixo de soldagem e no plano perpendicular ao comprimento do cordão de solda.

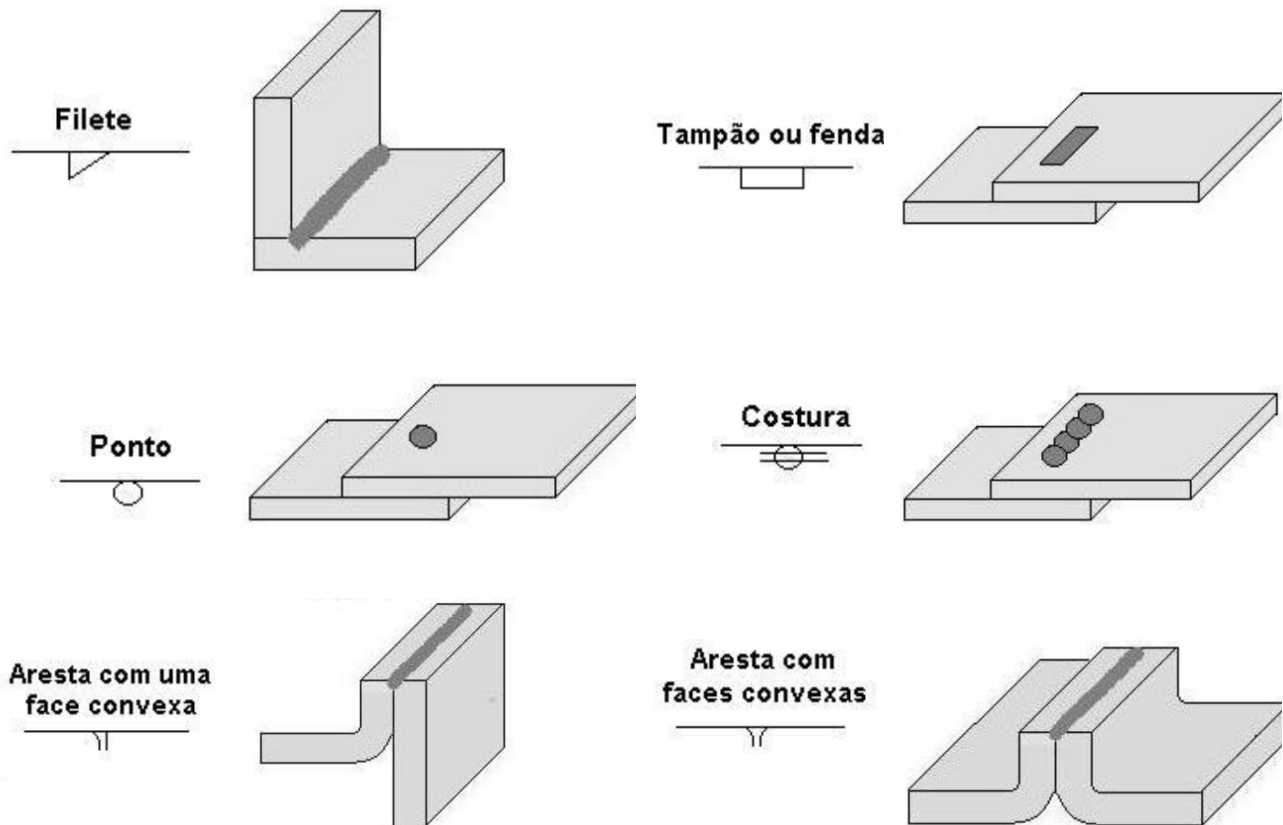


SÍMBOLOS EM SOLDAGEM



Símbolo básico de solda

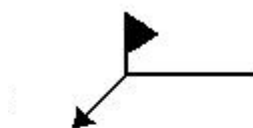
Solda em chanfro							
Localização	Reto ou sem chanfro	V ou X	Meio V ou K	U ou duplo U	J ou duplo J	Com fases convexas	Com uma fase convexa
Lado da seta							
Lado oposto							
Ambos os lados							



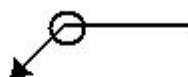
Solda em chanfro				
Localização	Em ângulo	Tampão ou fenda	Por ponto ou projeção	Costura
Lado da seta				
Lado oposto				
Ambos os lados		não usado	não usado	não usado
Sem indicação				

Símbolos suplementares de solda

Soldagem de campo



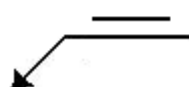
Soldagem em todo o contorno



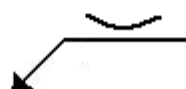
Penetração total



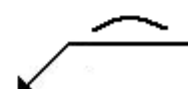
Contorno plano



Contorno côncavo



Contorno convexo



Símbolos de acabamento de solda

C – Corte/rebarbamento (cutting) G – Esmerilhamento (grinding)

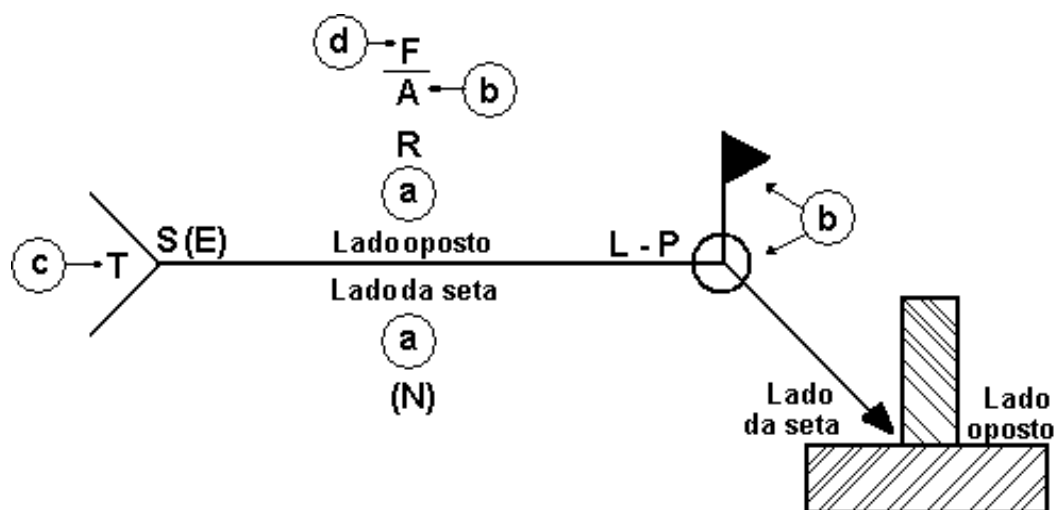
M – Torneamento, fresamento, ect (machining) R – Laminação (rolling)

H – Martelamento (hammering)

Especificações, processos e outras referências.

Designação AWS	Processos de Soldagem	Designação Brasileira
SMAW	Soldagem com eletrodo revestido	ER
SAW	Soldagem a arco submerso	AS
GMAW	Soldagem com arame sólido e proteção gasosa	MIG / MAG
FCAW	Soldagem com arame tubular	ET
GTAW	Soldagem com eletrodo tungstênio	TIG
PAW	Soldagem por plasma	PL
EBW	Soldagem por feixe de elétrons	FE
LBW	Soldagem a laser	La

Esquema geral da simbologia de soldagem



- (a) Símbolos básicos
- (b) Símbolos suplementares
- (c) Procedimentos, processos ou referências (T)
- (d) Detalhe, acabamento final (F)

S = profundidade do chanfro

E = penetração da solda ou garganta efetiva

L = comprimento da solda ou de cada trecho de solda descontínua

P = distância entre cordões

A = ângulo do chanfro

N = número de cordões

R = abertura de raiz, altura do enchimento para solda de tampão ou fenda, ou folga da junta

VARIÁVEIS DE SOLDAGEM

Material de base (composição química) – MB (se aço, carbono equivalente)

Espessura do material de base

Tipo de junta

Tipo de chanfro

Posição de soldagem

Material de adição (eletrodo/arame)

Diâmetro do material de adição

Proteção por fluxo (composição do fluxo/revestimento)

Proteção gasosa (tipo e vazão do gás)

Processo de soldagem / Máquina de soldagem / Polaridade

Corrente de soldagem (tipo e magnitude) $\Rightarrow$ fusão do arame/eletrodo

Tensão do arco elétrico $\Rightarrow$ Comprimento do arco elétrico

Velocidade de soldagem

Sequência de soldagem

Tratamento térmico e/ou mecânico antes (pré-), durante, após (pós-) a soldagem

CORRENTE DE SOLDAGEM

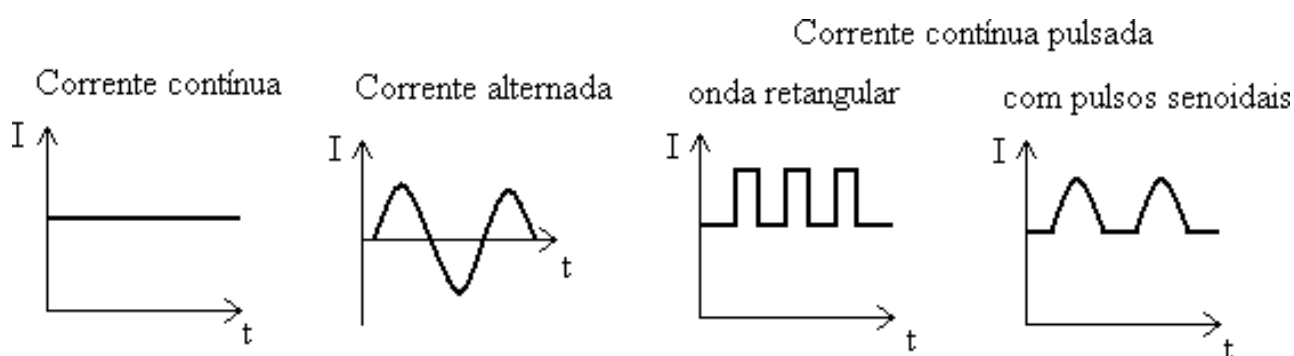
Quando um gás se ioniza, torna-se condutor de eletricidade.

A soldagem a arco elétrico se baseia no uso do calor gerado pela corrente elétrica passando por um gás ionizado.

A corrente elétrica é um fluxo de partículas (positivas, negativa ou ambas), portadoras de carga elétrica. Para que haja o fluxo dessas cargas elétricas é necessário que exista uma diferença de potencial elétrico.

Cargas elétricas de mesmo sinal (+ ou -) se repelem e as de sinal contrário se atraem
POLARIDADE.

Tipos de Corrente Aplicada à Soldagem



Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA).

Sendo que a corrente contínua pode ser constante ou pulsada

Corrente contínua (CC)

Pode ser definida como a que se obtém a partir do estabelecimento de uma diferença de potencial entre dois terminais (pólos) cujas polaridades são invariáveis no tempo. A corrente assim obtida tem um único sentido de percurso. Quando a intensidade da mesma é invariável no tempo, esta é chamada de corrente contínua constante.

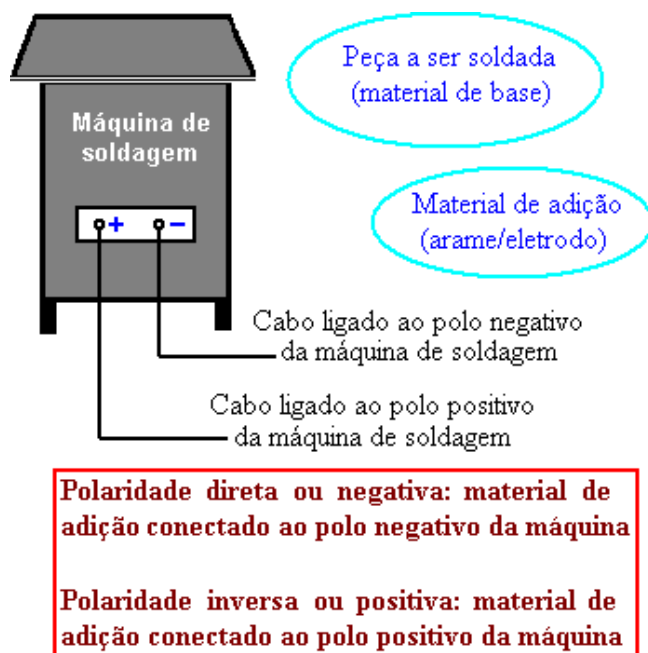
Corrente contínua pulsada

Quando a intensidade da corrente contínua varia periodicamente no tempo. Esta corrente pode apresentar uma variedade de formas de pulsação: retangular ou senoidal, por exemplo.

Corrente alternada (CA)

Pode ser definida como a que se obtém a partir do estabelecimento de uma diferença de potencial elétrico entre dois terminas, cuja polaridade é alternadamente positiva e negativa. O sentido das partículas de carga, íons e elétrons, numa tal corrente, muda a cada alteração de polaridade. A forma mais comum de corrente alternada é a senoidal completa, isto se deve ao fato dela ter origem nas características elétricas dos geradores utilizados para produzir a energia.

POLARIDADE EM SOLDAGEM



CONSEQUÊNCIAS DA POLARIDADE

Soldagem com CC

Os pólos do arco não se comportam de forma igual.

A zona catódica corresponde ao pólo negativo. É de onde partem os elétrons e para onde se dirigem os íons positivos. Os elétrons livres do cátodo devem passar à coluna do arco, para que fique garantida a continuidade da corrente. Isso acontece fundamentalmente de três formas distintas e simultâneas:

- por emissão termiônica, que ocorre devido ao fato dos íons acelerados na zona catódica atingirem o cátodo, levando-o à incandescência (emissão termiônica é quando um metal é conectado a um pólo energizado de uma fonte de energia elétrica e submetido a um campo elétrico, passa a emitir elétrons quando se torna incandescente);
- devido à ação do campo elétrico que, por ter aí alto valor (106 volts/cm), é capaz de arrancar elétrons do cátodo;
- por reflexão de íons neutralizados, que em cada choque roubam elétrons.

Na zona anódica (pólo positivo, para onde se dirigem os elétrons), imediatamente diante da sua superfície, há uma corrente pura de elétrons, já que aquele não pode emitir íons. A ionização se dá de suas formas:

- por efeito da alta temperatura;
- por choque dos elétrons que se dirigem ao ânodo.

Teoricamente, o bombardeio a que os elétrons sujeitam o anodo deve ser mais eficiente do que o bombardeio dos íons no cátodo, pelas seguintes razões:

A energia cinética (quantidade de energia devido ao movimento dos elétrons) de cada elétron é M/m vezes maior que a de cada íon, sendo M a massa do íon e m a massa do elétron;

O número de elétrons livres geralmente é maior que o número de íons livres;

A emissão termiônica aumenta ainda mais o número de elétrons que atingem o anodo (a emissão termiônica do anodo não é considerada por que a força eletrostática a impede);

O forte campo elétrico que existe junto ao catodo arranca elétrons adicionais deste, aumentando ainda mais o número de elétrons que atingem o anodo;

A evaporação de elétrons do cátodo consome energia, enquanto que a chegada no anodo se efetua com a entrega de energia.

Assim, torna-se evidente que os fenômenos físicos que ocorrem nos pólos de um arco voltaico são diferentes. De fato, com arco entre dois eletrodos permanentes e iguais, verifica-se que a temperatura do anodo é maior que a do catodo. Por este motivo, normalmente na soldagem com eletrodo não consumível (soldagem TIG), o eletrodo é conectado ao pólo negativo (catodo) enquanto que a peça a ser soldada é conectada ao pólo positivo (anodo). Na soldagem com eletrodo consumível (SMAW, GMAW, FCAW), ocorre o contrário, o eletrodo é conectado ao pólo positivo (anodo), enquanto a peça é conectada ao pólo negativo (catodo).

Soldagem com CA

Em um arco alimentado com corrente alternada, não se tem uma polaridade determinada, já que os eletrodos (eletrodo e a peça) permutam sua polaridade de acordo com a frequência da corrente. No caso de uma corrente alternada de 60 hertz, têm-se 120 inversões de polaridade por segundo.

Com essa alternância os pólos ora recebem choques de elétrons, ora choques de íons, resultando numa tendência de equalização da energia absorvida por ambos os pólos. Quando ao aspecto visual, não há quase diferença entre um arco de corrente contínua e um arco de corrente alternada, mas há uma maior dificuldade na manutenção de um arco em corrente alternada. Isto se explica considerando que a tensão, em cada ciclo, passa de um valor positivo a um valor negativo e, bem próximo ao zero, não há tensão suficiente para sustentar o arco. Por isso, é mais difícil acender um arco de corrente alternada bem, como mantê-lo. Para corrigir a instabilidade do arco é preciso:

Trabalhar com arco mais curto;

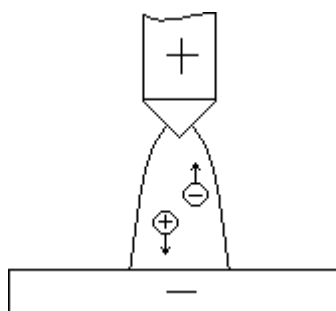
Usar tensões mais elevadas;

Usar eletrodos concebidos para CA;

Aumentar a frequência da corrente ou sobrepor à corrente normal uma outra de alta frequência, alta tensão e baixa intensidade.

Devido ao elevado custo do equipamento de soldagem com corrente alternada, seu uso é restrito, sendo mais utilizado no processo TIG.

Corrente contínua polaridade reversa

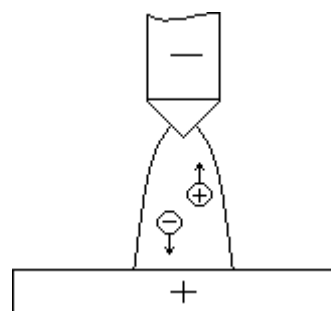


DCRP – Direct Current Reverse Polarity
DCEP – Direct Current Electrode Positive

Calor aplicado no eletrodo

CC+

Corrente contínua polaridade direta



DCSP – Direct Current Straight Polarity
DCEN – Direct Current Electrode Negative

Calor aplicado na peça

CC-

EFEITO DA POLARIDADE NA MORFOLOGIA DA SOLDA

Observação: É muito comum encontrar na literatura a seguinte frase:

“Com eletrodo consumível, o mais comum é obter um maior consumo do eletrodo quando ele está conectado pólo negativo da máquina e obter maior fusão do metal de base quando o eletrodo está conectado ao pólo positivo da máquina”.

Cuidado com esta frase...

A composição química do material de adição influencia os resultados:

Para eletrodos revestidos comerciais E6013, o consumo do eletrodo na polaridade positiva é menor que na polaridade negativa, enquanto que para eletrodos E7018, o consumo na polaridade positiva é maior que na polaridade negativa.

Exemplos de materiais soldáveis

Aço de baixo carbono (%C < 0,30)
Aço de médio carbono (0,31 < %C < 0,45)
Aço de alto carbono (%C > 0,46)
Aços de baixa liga (elementos de liga inferior a 5%)
Aços de média liga (entre 5 a 10%)
Aços de alta liga (acima de 10%)
Aço inoxidável (austenítico, martensítico e ferrítico)
Alumínio e suas ligas
Cobre e suas ligas
Titânio e suas ligas
Níquel e suas ligas
Ferro Fundido (cinzento, nodular, maleável, ligado e branco), etc.

E polímeros (termoplásticos)

CARBONO EQUIVALENTE

Estimativa para a soldabilidade e/ou temperabilidade de um aço. Válido para aço carbono e ligado.

Quanto maior o C_{eq} mais baixa é a soldabilidade e mais alta a temperabilidade do aço.

$C_{eq} < 0,4 \%$ $\Rightarrow$ excelente soldabilidade e nenhuma temperabilidade.

$0,4 < C_{eq} < 0,6 \%$ $\Rightarrow$ soldabilidade e temperabilidade razoável.

$0,6 < C_{eq} < 0,9 \%$ $\Rightarrow$ soldabilidade difícil e fácil temperabilidade.

$C_{eq} < 0,9 \%$ $\Rightarrow$ soldabilidade péssima e excelente temperabilidade.

Fórmulas para cálculo do carbono equivalente

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%(Mn + Si)}{6} \quad (\text{aço carbono}) \quad (\% \text{ em peso})$$

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%(Mn + Cr)}{9} + \frac{\%Ni}{18} + \frac{\%Mo}{13} \quad (\text{Seferian}) \quad (\% \text{ em peso})$$

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15} \quad (\text{fórmula IIW}) \quad (\% \text{ em peso})$$

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (\% \text{ em peso})$$

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%(Mn + Cr + Cu)}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{3} + 5 * B \quad (\text{Fórmula Pcm}) \quad (\% \text{ em peso})$$

Equação adotada pela AWS – American Welding Society

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Mn + \%Si}{6} \right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right)$$

Equação indicada pelo IIW – Internacional Institute of Welding

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

Quando maior o valor do C_{eq} maior a importância na seleção dos parâmetros de soldagem. O pré-aquecimento é essencial, podendo ser necessário também o uso de pós-aquecimento. Os consumíveis devem ser escolhidos de modo que o limite de resistência do metal depositado seja, no mínimo, igual ao limite de resistência mínimo especificado para o metal de base.

Quanto maior o valor do C_{eq} maior a temperatura de pré-aquecimento, sendo que essa temperatura está diretamente relacionada com a espessura do material.

Dica para determinar a temperatura mínima de pré-aquecimento:

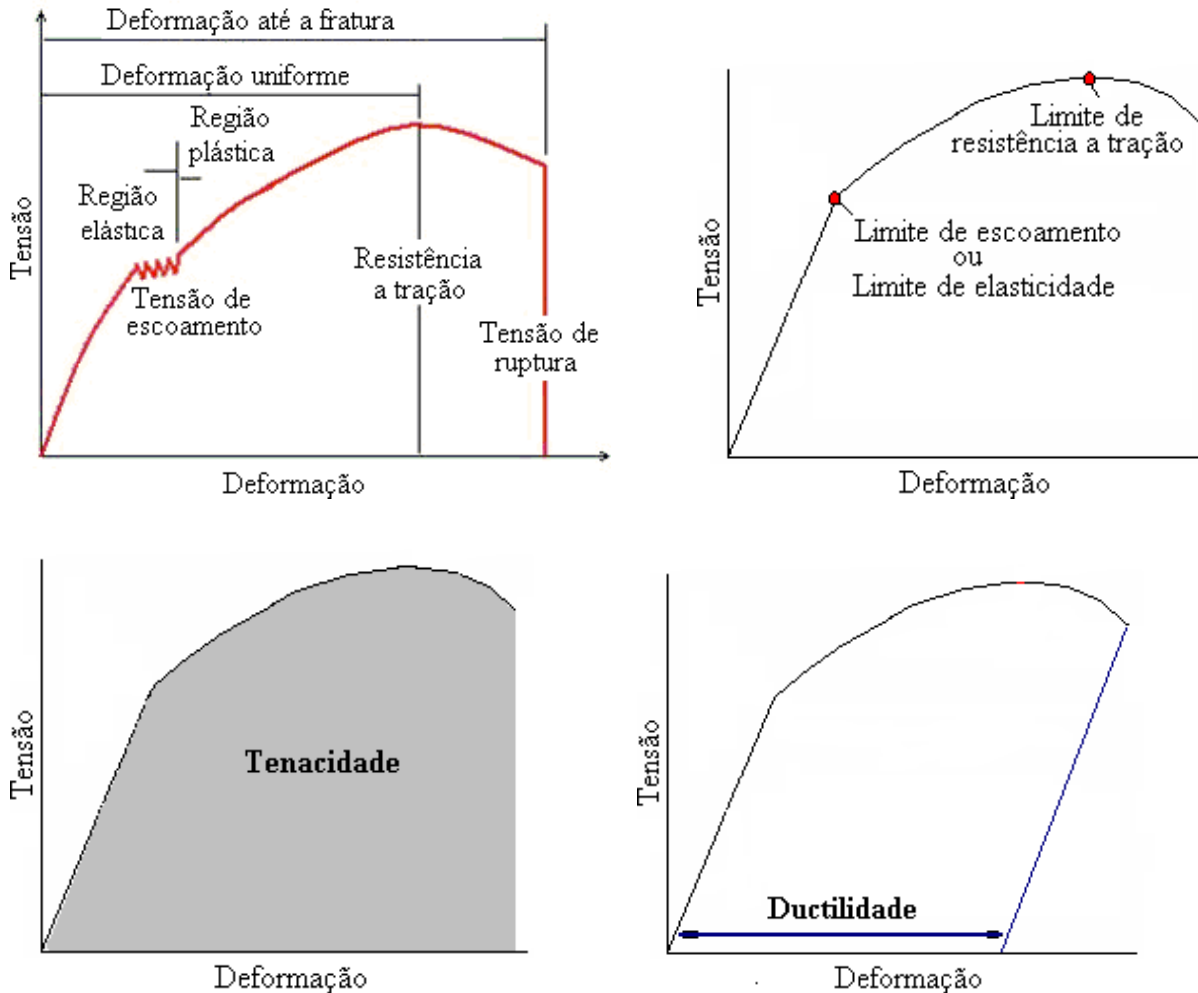
$$T_{p_{min}} = 350 * \sqrt{C_{eq} * (1 + 0,005E)} - 0,25$$

$$T_{p_{max}} = T_{p_{min}} + 100 \text{ a } 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

onde: E = espessura da chapa

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Teste de tração - Curva tensão x deformação



Elasticidade: capacidade do material se deformar elasticamente.

Limite de escoamento: limite no qual o material passa a se deformar plasticamente.

Deformação plástica: está relacionado com a rigidez do material.

Limite de resistência à tração: tensão máxima que o material suporta, se essa tensão for mantida, ocorrerá a ruptura do material.

Tenacidade: capacidade do material de absorver energia, isso é, de se deformar, elástica e plasticamente, antes de trincar ou romper.

Ductilidade: é a deformação específica do material. Deformação máxima menos à elástica.

Fragilidade: propriedade contrária à ductilidade; materiais frágeis se rompem sem que ocorra uma deformação plástica apreciável.

Dureza: é a capacidade do material resistir aos esforços externos.

CONSTITUINTES DOS AÇOS CARBONO

Aço: liga de ferro-carbono

Constituintes dos aços: austenita, ferrita, cementita, perlita, bainita e martensita.

Austenita: só existe em temperaturas superiores a 723°C;

Constituintes dos aços (liga ferro-carbono) para um “resfriamento lento”:

Aços com %C < 0,77 ⇒ Austenita = ferrita e perlita

Aços com %C = 0,77 ⇒ Austenita = perlita

Aços com %C > 0,77 ⇒ Austenita = perlita e cementita

Ferrita: ferro contendo traços de carbono; possui baixa dureza, alta ductilidade e boa tenacidade.

Cementita: carboneto de ferro (Fe_3C) contendo grande quantidade de carbono; possui alta dureza e baixa ductilidade e tenacidade.

Perlita: mistura de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita (têm aparência de lâminas extremamente delgadas, distribuídas alternadamente em ferrita e cementita); possui propriedades intermediárias entre ferrita e cementita.

Efeito da velocidade de resfriamento nos constituintes dos aços: quanto maior a velocidade de resfriamento, menores são as chances de transformação da austenita em ferrita, cementita e perlita. Novos constituintes dos aços podem surgir: bainita e martensita.

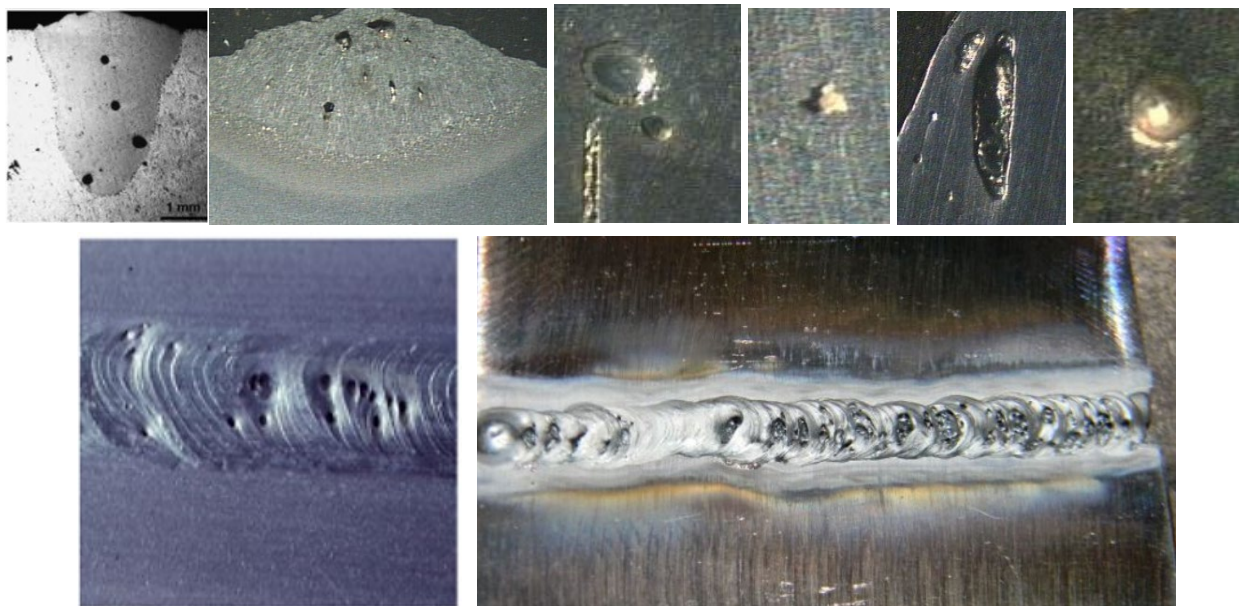
Efeito da adição de elementos de liga nos constituintes dos aços: todos os elementos de liga que são adicionados aos aços, com exceção do cobalto, retardam a transformação da austenita, tendo como principal consequência maior facilidade para obter a estrutura martensítica (alta temperabilidade).

“Soldagem é caracterizada como um processo que pode apresentar altas taxas de resfriamento”.

“Atenção especial deve ser dada para os tratamentos térmicos, pré e pós-aquecimento e para materiais que apresentam alta condutividade térmica”.

DESCONTINUIDADES MAIS COMUNS EM SOLDAGEM

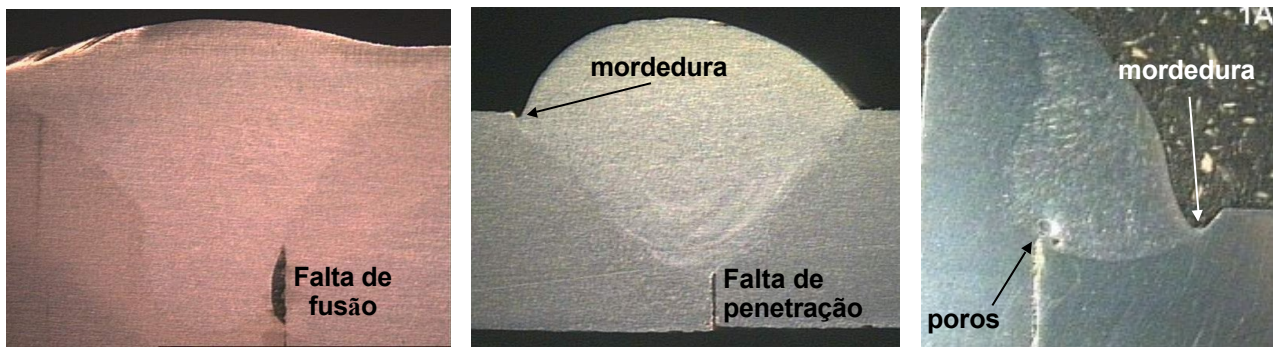
Porosidades – Descontinuidade mais comum encontrado no metal de solda devido à soldagem. Consiste de uma cavidade formada pelo aprisionamento de gases durante a solidificação do metal fundido. A formação de poros está diretamente relacionada com a utilização de alto aporte térmico, resultando em uma taxa de resfriamento elevada, não dando tempo para que os gases gerados e/ou formados na zona fundida escapem. A formação de poros está relacionada também com a umidade excessiva do metal de base ou de adição ou com a limpeza imprópria da junta durante preparação para a soldagem. Tensões elevadas, alta distância entre o eletrodo e o metal de base e uma má proteção gasosa propiciam o surgimento de poros. Os poros podem ser internos ao cordão (poros fechados) ou externos (poros abertos). Em linhas gerais, poros abertos, visíveis concentram um nível maior de tensão, são mais problemático que poros internos. Poros aparentes (visíveis) devem ser corrigidos, devem ser eliminados para a continuidade do processo de soldagem. O formato do poro pode ser esférico e regular ou mais alongado, conhecido worm holes, buraco de minhoca, que são os poros vermiculares ou vermiforme. Os poros também podem aparecer uniformemente distribuídos, em grupo ou alinhados. Em linhas gerais, poros vermiculares e poros alinhados são mais problemáticos. Poros reduzem a seção efetiva da junta, poros são espaços vazios, menos material para resistir às solicitações, aos esforços externos. Uma pequena quantidade de poros é aceitável, sendo que tudo é estabelecido por norma, tanto a quantidade quanto o tamanho do poro. É fundamental saber e conhecer a norma que rege o projeto que se está desenvolvendo.



Falta de fusão – Condição na qual a fusão é inferior à completa. É uma ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou entre dois cordões adjacentes. Resulta da manipulação incorreta da tocha de soldagem e do uso de condições de soldagem incorretas (velocidade de soldagem excessiva, corrente insuficiente e pobre preparação da junta). Limpeza incorreta e desvio do arco elétrico devido ao sopro magnético podem ser causadores em potenciais. A falta de fusão atua como um concentrador de tensão severo, podendo facilitar a propagação de trincas. A falta de fusão é corrigida removendo toda a região defeituosa por esmerilhamento e realizando a deposição de material novamente.

Falta de penetração – Condição na qual a penetração da junta é menor que a especificada. A falta de penetração reduz a seção efetiva da junta e atua como um severo concentrador de tensão. Tem relação direta com procedimentos de soldagem inadequados: manipulação incorreta da tocha de soldagem; junta mal projetada; diâmetro excessivo do eletrodo/arame; velocidades de soldagem excessiva; corrente insuficiente. A falta de penetração é corrigida removendo a região soldada adjacente a região não penetrada por esmerilhamento e realizando a deposição de material novamente.

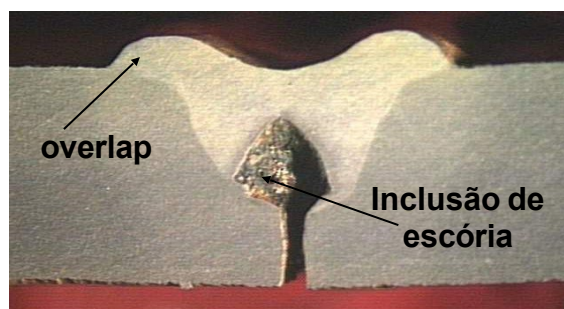
Mordedura – Tem o formato de um chanfro. Ocorre entre o metal de base e o cordão de solda. Esta região não é preenchida pelo metal de solda. Podem ocorrer só de um lado do cordão ou nas duas laterais. Podem ainda ser contínuas ou ocorrer ao longo de pequenos trechos. Resulta do uso de condições de soldagem incorretas (velocidade de soldagem, tensão e correntes excessivas, uso de um gás de proteção inadequado e ângulo da tocha incorreto). A existência de mordeduras significa redução da seção resistente e, consequentemente, um enfraquecimento da junta soldada. Em uma junta submetida a tensões de fadiga, a presença de mordeduras geralmente serve como pontos iniciais de ruptura, por serem pontos concentradores de tensão. Quando mordeduras ocorrem, essas devem ser removidas, esmerilhando o local e realizando uma nova deposição de material.



Inclusão de tungstênio – Ocorre quando a ponta do eletrodo de tungstênio se desprende e passa a fazer parte do metal de solda. Procedimentos impróprios, tais como a utilização de uma corrente de soldagem excessiva para o tamanho e tipo do eletrodo utilizado, utilização de gás de proteção impróprio para o processo (gases ativos ou misturas de gases ativos com inertes) propiciam o surgimento desse problema.

Inclusão de escória – Ocorre somente nos processos de soldagem que envolvem a produção de escória (eletrodo revestido, arco submerso, arame tubular). Movimentos incorretos (zig-zag e/ou vai e vem) ou movimentos radicais do eletrodo/tocha de soldagem, tais como tecelagem rápida e uma remoção prévia incompleta da escória em soldagem de múltiplos passes são causas comuns da inclusão de escória no metal de solda ou entre o metal de solda e o metal de base. Corrente de soldagem baixa e velocidade de soldagem alta reduzem a quantidade de calor fornecido ao material que é necessária para a fusão dos materiais envolvidos.

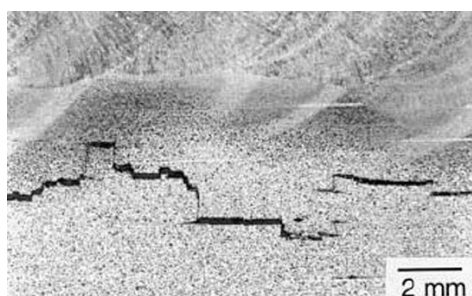
Sobreposição (overlap) – Protuberância de metal de solda que excede o pé, a face ou a raiz da solda. A poça de fusão flui excessivamente e cobre o metal de base, muitas vezes, sem se aderir a ele. É necessário esmerilhar toda a área afetada e realizar a deposição novamente.



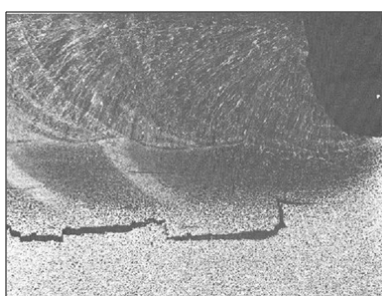
Trincas – Podem ocorrer na zona fundida, na ZTA e no material de base. Podem ser macroscópicas (**macrofissuras**) ou microscópicas (**microfissuras**). Podem iniciar nos estágios finais da solidificação da poça de fusão (**trinca a quente**) e podem ocorrer depois de um tempo de soldagem (**trincas a frio**). Quando a trinca ocorre na linha central do cordão de solda, no sentido longitudinal e surge no estágio final da solidificação da poça de fusão, a trinca é a **trinca a quente por solidificação**. A quantidade de impurezas no metal de solda, a presença de segregação, o estado de tensão resultantes no material devido à soldagem são fatores que propiciam o surgimento desse tipo de trinca. Podem ser longitudinais e superficiais, ocorrendo, frequentemente, no centro do cordão de solda e podem ocorrer internamente e serem transversais ao cordão. Podem ocorrer na soldagem da maioria das ligas metálicas. Fatores associados as trincas por solidificação: a incapacidade do material deformar-se plasticamente (alto grau de restrição) e a presença de solicitações de tração que ultrapassaram a capacidade de resistência mecânica do material. O estágio final do processo de solidificação da zona fundida é o momento de maior fragilização do material, pois existem regiões solidificadas e regiões com filmes de material líquido, fundido, frágil. Velocidade e sequência de soldagem são variáveis importantíssimas para minimizar a ocorrência de trincas a quente por solidificação que ocorrem na zona fundida. Quando a trinca a quente ocorre na zona termicamente afetada pelo calor, na ZTA, a trinca a quente ocorre, provavelmente, devido à **liquação** na ZTA. O metal de base pode conter elementos que possuem temperatura de fusão mais baixa que fundem durante o aquecimento da ZTA. Forma-se bolsões de material líquido na ZTA e esse líquido pode espalhar entre os contornos de grão e gerar fissuras. As trincas por liquação ocorrem geralmente próximas da linha de fusão e sempre ao longo dos contornos de grãos. A liquação pode ocorrer no metal de solda quando se trata de soldagem de múltiplos passes. Quando esse tipo de trinca ocorre ao longo de contornos de grão, porém sem apresentar evidências de formação de fase líquida, de filmes de segregação na superfície dos grãos, provavelmente, trata-se das trincas a quente devido a **perda de ductilidade**, que pode correr na ZTA ou no metal de solda em caso de solda de múltiplos passes. Também se tem as **trincas a frio, fissuração pelo hidrogênio**, que é um dos maiores problemas na soldagem de aços estruturais. Ocorrer tanto na zona fundida quanto, principalmente, na ZTA, na região de crescimento de grãos. A trinca se forma quando o material está próximo à temperatura ambiente e pode, inclusive, levar até a 48 horas após a soldagem para a sua completa formação. O crescimento da trinca por hidrogênio ocorre de forma lenta e descontínua. Podem ser longitudinais, transversais, superficiais ou subsuperficiais. Se originando em pontos de concentração de tensões como

a margem e a raiz da solda. Fatores que propiciam a formação de trincas a frio: presença de hidrogênio na região da solda; formação de microestrutura de elevada dureza, susceptível à fragilização pelo hidrogênio e solicitação de tensões internas (as residuais) ou externas. As formas de minimizar a ocorrência de fissuras por hidrogênio é atacando os 3 fatores causadores do trincamento. Trincas que ocorrem no metal de solda, fora da ZTA, alinhado a linha de fusão e com aparência de um caminho entre degraus, provavelmente são as trincas por **decoesão lamelar**. Chapas quando são laminadas, a espessura da chapa é reduzida, ocorre um alongamento das inclusões no plano de laminação e uma redução da ductilidade da chapa na direção da sua espessura. A fissuração ocorre paralelamente à linha de fusão, assumindo um perfil em degraus. Uma maneira para evitar a decoesão laminar é utilizando metal com boas propriedades na direção de sua espessura. Ensaio de tração em corpos de prova retirados na direção Z da chapa, ao longo da espessura, pode ser utilizado para avaliar a sensibilidade à decoesão lamelar. A utilização da técnica de manteigamento que é a deposição de uma camada de solda de um material de alta ductilidade na região susceptível ao trincamento, antes da soldagem propriamente, pode ser aplicado para minimizar a decoesão lamelar. Quando a soldagem ocorreu a algum tempo e a peça foi submetida às operações subquentes de fabricação, como, por exemplo, um reaquecimento, e a trinca apareceu, tem-se, provavelmente, as trincas por **reaquecimento**. Essas ocorrem, em geral, na ZTA, em região de crescimento de grão, e propagam ao longo dos contornos de grão. Se o ambiente de trabalho da peça pós soldagem é um ambiente corrosivo, essa corrosão pode induzir ao surgimento de trinca de **corrosão sob tensão**. Este problema não é devido à soldagem, é devido ao fato da peça soldada estar num ambiente corrosivo, que fragilizará uma região já fragilizada. Quando um material soldado é submetido a esforços variados e cíclicos pode ocorrer a fratura do material, muito conhecida como **trinca por fadiga**. A trinca por fadiga se propaga lentamente por um período até que atinge um tamanho crítico. A partir desse ponto, ocorre uma ruptura de forma rápida e inesperada. Na trinca por fadiga, o material é submetido a ciclos alternados de tensão (tensões cíclicas) e muitas vezes precede a fratura frágil. A fratura por fadiga apresenta uma relação de 90% dos casos de falha de componentes metálicos. Pode ser dividida em 3 etapas: nucleação da trinca, sem nenhum dano visível nessa fase; crescimento da trinca de fadiga em um plano perpendicular ao da principal tensão de tração e rompimento brusco da peça.

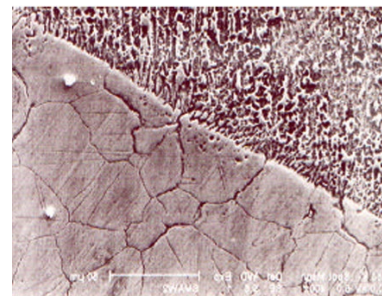
Decoesão lamelar



Decoesão lamelar



Liquação





Trincas de solidificação



Distorções e/ou tensões residuais – Durante a soldagem, o material aquece e expande e durante o resfriamento, o material contrai. Essas expansões e contrações ocorrem de maneira não uniforme ao longo de uma peça soldada e dependendo do grau de restrição, tensões residuais e distorções podem ser geradas. O uso de aportes térmicos elevados e na soldagem de materiais espessos, o nível de distorções e/ou tensões residuais é elevado. Quanto maior o grau de restrição de uma peça a ser soldada, maiores serão as tensões residuais resultante e menores serão as distorções. Por outro lado, quanto menor o grau de restrição de uma peça a ser soldada, menores serão as tensões residuais resultante e maiores serão as distorções. Um material ao ser soldado ou vai apresentar distorções ou vai apresentar tensões residuais e isso se não apresentar os dois. A distorção em uma peça soldada é visível, porém tensão residual não é visível e nem se apresenta como uma descontinuidade, mas é um problema em soldagem. Na maioria dos casos, é mais difícil desempenar peças soldadas que fazer tratamentos de alívio de tensões. O uso de tratamentos térmicos tanto pré quanto pós soldagem são muito utilizados para minimizar as tensões residuais resultantes da soldagem. A sequência de soldagem, a ordem como tudo acontece, como os cordões serão executados, tem uma influência muito direta na geração das tensões térmica e consequentemente, nas tensões residuais.

Fratura dúctil: o material deforma substancialmente antes de fraturar; o processo se desenvolve de forma relativamente lenta.

Fratura frágil: o material deforma pouco antes de fraturar e a ruptura se propaga de forma instável por toda a seção da peça e de forma muito rápida.

ARCO ELÉTRICO NA SOLDAGEM

Fonte de calor mais utilizada na soldagem de materiais por fusão

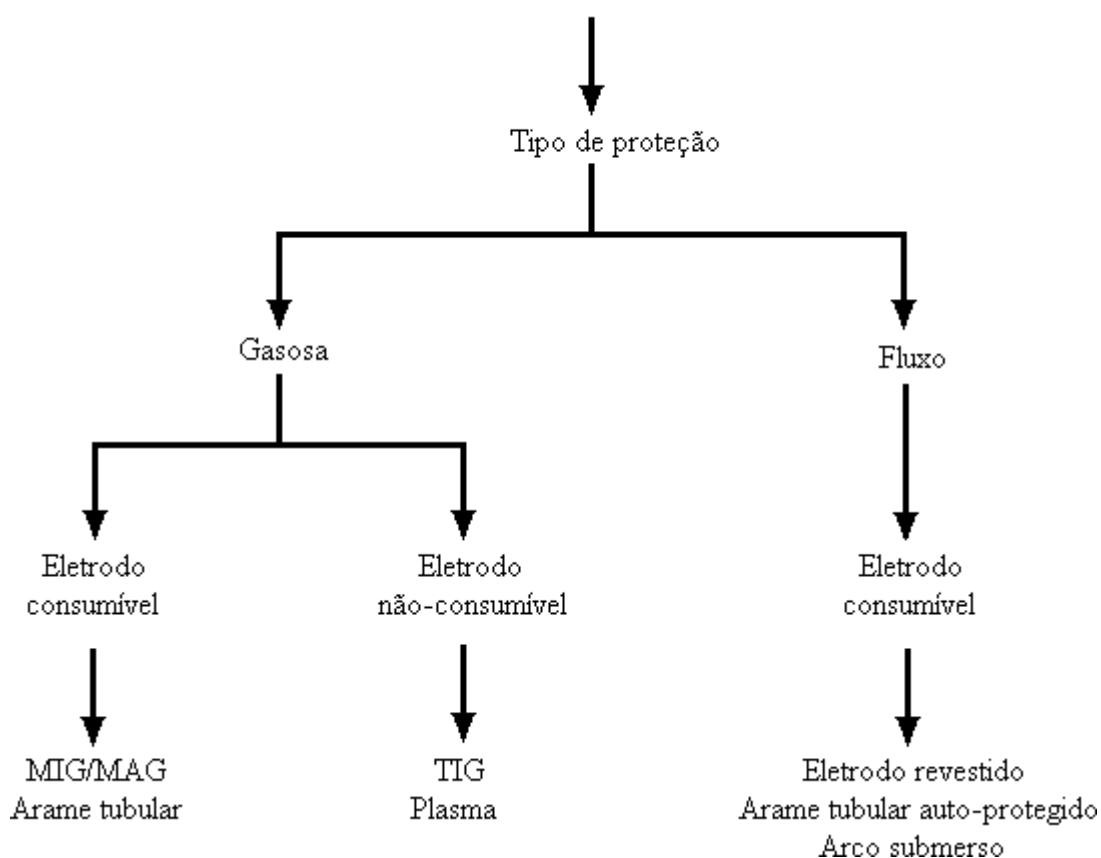
Concentração adequada de energia.

Facilidade de obtenção.

Baixo custo relativo ao equipamento.

Níveis aceitáveis de riscos a saúde.

PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO A ARCO ELÉTRICO



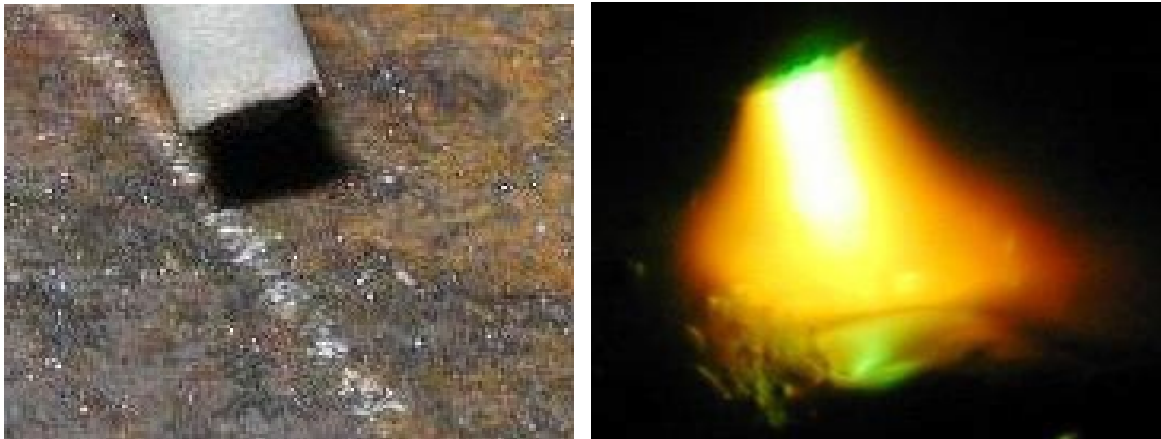
ARCO ELÉTRICO

As temperaturas no arco elétrico podem variar de 5.000 a 30.000 K.

Consequência: a matéria passa a existir no seu quarto estado denominado plasma, que é composto por um gás altamente ionizado e eletricamente neutro.

“Consiste de uma descarga elétrica controlada entre dois eletrodos, que é sustentada por um gás ionizado a alta temperatura chamado plasma, produzindo energia térmica suficiente para a fusão localizada do metal de base e de adição (se existir)”.

Eletrodo revestido sem e com a presença do arco elétrico

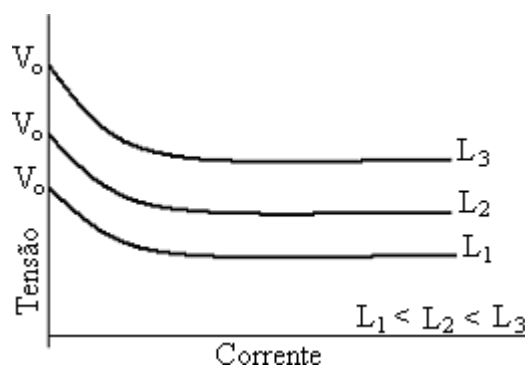


Para se obter um arco elétrico é preciso que o eletrodo e a peça a ser soldada estejam conectados a uma **fonte de energia elétrica**. Com isso, aparece um **diferencial de potencial** entre o eletrodo e a peça a soldar: esses ficam energizados. Isso significa que há uma tensão elétrica entre eles (na prática esta tensão varia de 15 a 90 volts), chamada de tensão em vazio (V_o): tensão sem corrente elétrica.

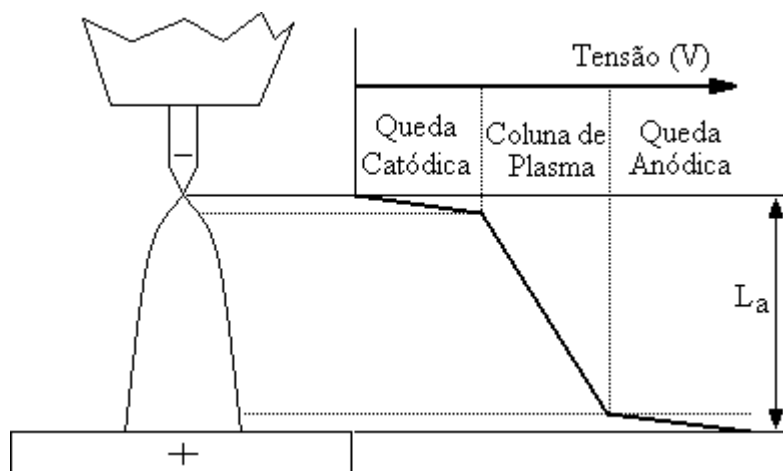
Enquanto houver um espaço entre o eletrodo e a peça não haverá corrente passando por eles, visto que o ar funciona como isolante elétrico. Para iniciar o arco, basta encostar o eletrodo na peça e isso ocasiona, imediatamente, uma **queda de tensão**.

A variação da tensão no arco elétrico com a corrente de soldagem é conhecida como **curva estática do arco elétrico**.

Curva característica do arco elétrico



PERFIL ELÉTRICO DO ARCO



Região Catódica

Região extremamente importante para a existência do arco.

É nessa região que é gerada a maioria dos elétrons responsáveis pela condução da corrente elétrica no arco.

A estabilidade do arco depende muito dessa região.

É a região mais problemática, sendo responsável por complicados mecanismos, nem todos completamente entendidos.

Caracterizada por um estado muito afastado do equilíbrio.

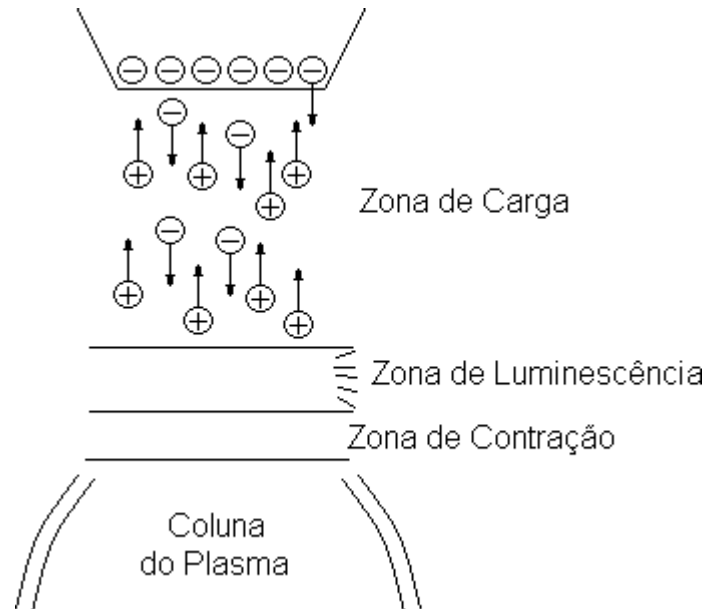
Subdividida em três regiões:

- Zona de Carga $\Rightarrow$ queda catódica;
- Zona de Luminescência;
- Zona de Contração.

Na zona de carga, ocorre um elevado gradiente de potencial o qual acelera os elétrons saindo do cátodo e, por outro lado, atrai os íons positivos para o cátodo. Apesar de ser uma zona com grande atividade de cargas, nessa praticamente não ocorrem colisões entre os diversos portadores de carga e entre átomos neutros. Pode-se supor, assim, que um elétron, deixando o cátodo, atravessa toda a zona de carga somente sofrendo colisões no limite exterior dessa zona, o mesmo ocorrendo, em sentido contrário, com íons positivos. Em função da ausência de choques, os elétrons, de menor massa, adquirem uma velocidade muito maior que os outros constituintes do arco, existindo um maior número de portadores de carga positiva na zona de carga, o que explica, em parte, a queda de potencial da região catódica.

Na Zona de luminescência ocorre uma desaceleração dos elétrons. A transformação da energia cinética dos elétrons em radiação eletromagnética é tão intensa que requer a utilização de equipamentos de segurança adequados pelos soldadores.

Na zona de contração, a qual serve de interface entre a região catódica e a coluna do arco, a densidade de corrente passa dos altos valores característicos da região catódica para os valores bem menores da coluna.



Região Anódica

Não é tão importante quanto a região catódica.

Não há emissão de íons positivos.

Existe uma concentração de elétrons (cargas negativas): queda anódica.

Coluna de Plasma

Compreende praticamente todo o volume do arco.

Constituída por partículas neutras, íons e elétrons livres, sendo estes responsáveis pela passagem da corrente elétrica entre os eletrodos.

Para que ocorra a ionização, o gás do arco é aquecido a alta temperatura. Como resultado de sua agitação térmica, choques entre os constituintes do gás o leva a uma ionização parcial do gás e à formação do plasma.

Ocorre a neutralidade elétrica: em cada unidade de volume o número de cargas positivas e negativas é praticamente igual.

Reações que ocorrem na coluna do plasma: dissociação e ionização.

Dissociação e Ionização

Para o arco elétrico se manter durante a soldagem, é preciso que estejam disponíveis partículas carregadas eletricamente. Existindo moléculas de qualquer gás no dielétrico, estas deverão ser dissociadas e, devido à alta energia de vibração obtida pelo aquecimento dos elétrons, as moléculas são levadas ao estado monoatômico. Após a dissociação, aumentando ainda mais a temperatura, ocorre a ionização dos átomos.

Dissociação $\Rightarrow$ ruptura das moléculas ($G_2 \Rightarrow 2G$) Ionização $\Rightarrow$ expulsão dos elétrons ($G \Rightarrow G^+ + e^-$)

Potencial de ionização de alguns gases utilizados na soldagem

Gás	Potencial (eV)
Argônio	15,76
Dióxido de carbono	13,77
Hidrogênio	15,43
Hélio	24,59
Monóxido de carbono	14,10
Nitrogênio	15,58
Oxigênio	12,07

CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DO ARCO

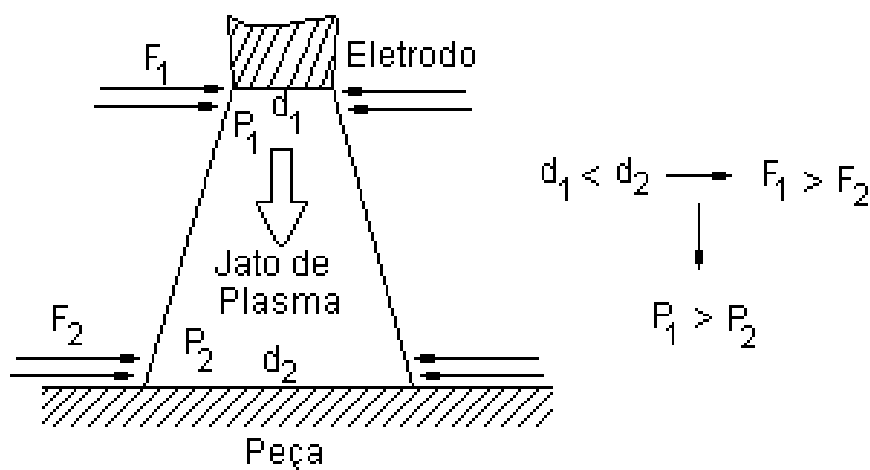
O arco de soldagem é um condutor de corrente elétrica: sofre interações da corrente elétrica transportada pelo arco com os campos magnéticos gerados pela corrente. Se um condutor de comprimento L , percorrido por uma corrente elétrica, I , é colocado numa região onde exista um campo magnético, B , ele experimenta uma força F , conhecida como “Força de Lorentz”, dada por:

$$F = B \cdot I \cdot L$$

Três importantes efeitos magnéticos podem ocorrer na soldagem a arco, devido às forças de Lorentz:

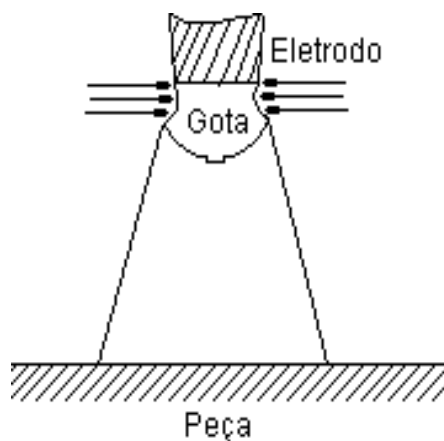
Jato de plasma

O arco de soldagem ao ser considerado como um condutor elétrico gasoso de forma cônica, quando a corrente elétrica passa por ele, induz um campo magnético de forma circular concêntrico com seu eixo, se comportando como um condutor colocado num campo magnético. A intensidade do campo magnético decai com o quadrado da distância ao eixo do condutor. Como o diâmetro do arco é sempre menor na região próxima ao eletrodo, as forças de Lorentz tendem a serem maiores nesta região do que na região próxima da peça. A pressão interna do arco na região próxima ao eletrodo é sempre maior que na região próxima a peça. Essa diferença de pressão causa um fluxo de gás sempre no sentido eletrodo-peça que é o jato de plasma. Este é um dos responsáveis pela penetração do cordão de solda e é responsável pela transferência de metal seja sempre no sentido eletrodo-peça, independente da polaridade utilizada.



Efeito Pinch

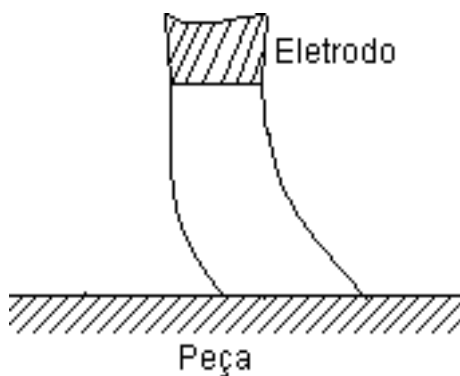
Em eletrodos consumíveis, as forças de Lorentz na extremidade fundida do eletrodo são capazes de deformá-los, tendendo a estrangular a parte líquida e separá-la do eletrodo sólido. Por outro lado, a tensão superficial tende a manter a gota presa ao eletrodo. O tempo de permanência da gota líquida na ponta do eletrodo depende, principalmente, da competição entre a tensão superficial, as forças de Lorentz e o volume da gota que tende a aumentar continuamente. Para baixas corrente de soldagem, as forças de Lorentz são pequenas e a gota pode aumentar bastante de volume antes de se destacar do eletrodo e se transferir para a peça, por ação do jato de plasma (transferência globular) ou por toque na poça fundida do metal de base (transferência por curto-circuito). Para altas correntes, as forças de Lorentz tendem a estrangular rapidamente a parte fundida, tão logo ela se forme, de modo que a transferência de metal para a peça se dá em finíssimas gotas de metal fundido (transferência "spray").



Sopro magnético

Consiste de um desvio do arco de sua posição normal de operação, como consequência de uma assimetria na distribuição das forças eletromagnéticas em função de variações bruscas na direção da corrente elétrica e/ou arranjo assimétrico de material ferromagnético em torno do arco. O sopro magnético é indesejável em soldagem, pois orienta o arco para direções que, em geral, prejudicam a penetração e a uniformidade do cordão de solda, além de causar a instabilidade do arco e dificultar a operação. O sopro magnético pode ser minimizado ou eliminado por algumas medidas simples, como:

- inclinar o eletrodo para o lado para o qual se dirige o arco;
- soldar com arco mais curto;
- usar mais de uma conexão terra;
- usar correntes mais baixas, quando possível e
- usar corrente alternada, pois o efeito do sopro é menor.



FLUXO DE CALOR DURANTE A SOLDAGEM

Eficiência da fonte de calor = rendimento térmico do processo de soldagem (η)

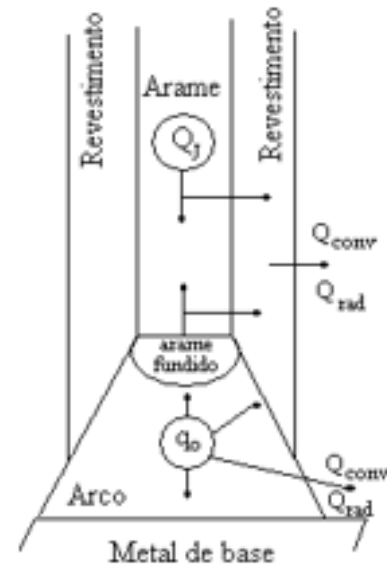
$$\eta = \frac{\text{calor transferido para a peça (Q)}}{\text{calor gerado no arco elétrico (q_o)}}$$

$$q_o = IV \text{ (W)}$$

$$Q = \eta q_o = \eta IV \text{ (W)}$$

$$Q = \eta \frac{q_o}{A} = \eta \frac{IV}{A} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

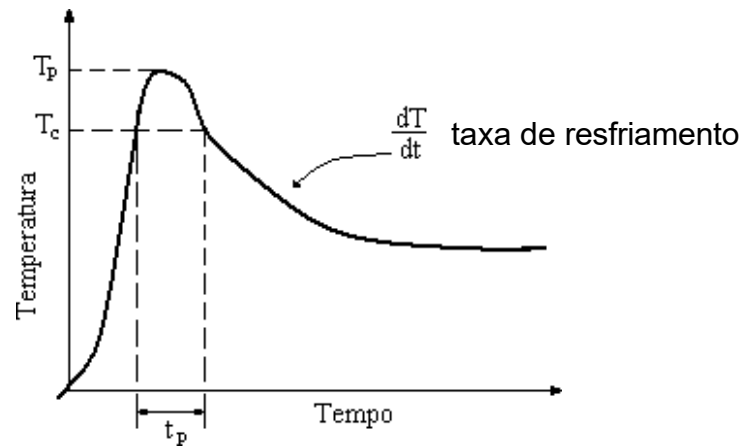
$$A_T = \eta \frac{q_o}{v} = \eta \frac{IV}{v} \text{ (J/m)} \rightarrow \begin{matrix} \text{Aporte térmico} \\ \text{Energia de soldagem} \end{matrix}$$



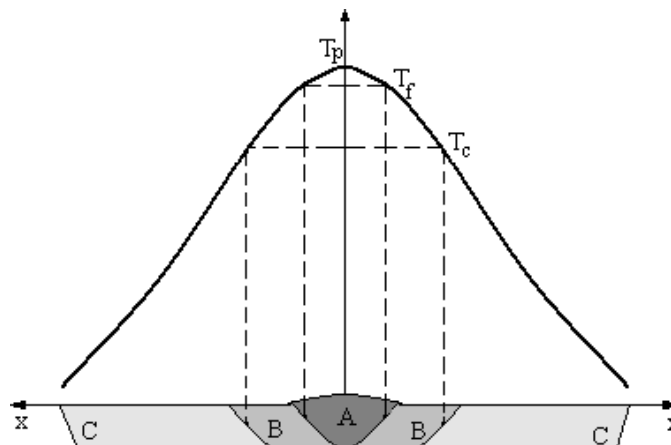
Rendimento térmico dos processos de soldagem a arco elétrico ($\eta\%$)

GTAW (TIG)	$\Rightarrow$	65 ± 15 (CC) 35 ± 15 (CA)
PAW (Plasma)	$\Rightarrow$	70 ± 15
SMAW (eletrodo revestido)	$\Rightarrow$	75 ± 15
GMAW (arame sólido)	$\Rightarrow$	75 ± 15
FCAW (arame tubular)	$\Rightarrow$	80 ± 15
SAW	$\Rightarrow$	90 ± 10

Ciclo térmico: variação da temperatura de um ponto em função do tempo.



Perfil térmico: variação da temperatura do material em função do comprimento.



A: zona fundida (ZF)
B: Zona Termicamente Afetada (ZTA)
C: Material de Base (MA)

Fatores que influenciam a taxa de resfriamento do material durante a soldagem:

- aporte térmico
- temperatura de pré-aquecimento
- condutividade térmica do material

FONTES DE POTÊNCIA PARA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

TIPOS DE FONTES/MÁQUINAS DE SOLDAGEM

Fontes Eletromagnéticas (convencionais)

Transformador: equipamento bastante simples, sendo constituído basicamente por dois enrolamentos chamados primário e secundário e um sistema de controle da corrente. O transformador é alimentado por CA e fornece CA. Transforma a alta tensão e baixa corrente da rede de fornecimento em baixa tensão e alta corrente necessária a soldagem em CA.

Conversor: constituído por um motor e um gerador acoplados em um eixo comum. O conversor é alimentado por CA e fornece CC.

Retificador: constituído por um transformador trifásico acoplado a um sistema eletrônico de retificação da corrente alternada. O retificador é alimentado por CA e fornece CC ou CA.

Fontes Eletrônicas

A característica que melhor define as fontes eletrônicas é o uso de dispositivos semicondutores para controle direto da tensão e/ou corrente de saída da máquina. Nas fontes convencionais, tal controle é essencialmente mecânico.

Fontes Universais

São fontes eletrônicas multiprocessos.

Fatores a serem considerados na seleção de uma fonte:

- processo em que a fonte será utilizada;
- necessidade de alterar o tipo da curva característica (tensão ou corrente constante);
- necessidade de variar a tensão de circuito aberto;
- tipo de corrente: CC, CA, ambas ou pulsada;
- intervalo entre a mínima e a máxima corrente de soldagem;
- ciclo de trabalho: tempo de arco aberto em relação ao tempo total de soldagem;
- tensão, frequência, potência e número de fases disponíveis na rede de alimentação;
- restrições econômicas: qual o capital disponível, por exemplo;
- robustez e confiabilidade;
- simplicidade de manutenção;
- atendimento às normas/código vigentes no país em que opera;
- necessidade de controle remoto ou automatização;
- ajustes simples das operações;
- lay out.

CICLO DE TRABALHO OU FATOR DE TRABALHO

É a porcentagem de tempo que uma fonte de soldagem poderá prover uma dada corrente (arco aberto) em um ciclo de 10 minutos (contínuo ou não), sem exceder um limite pré-determinado de temperatura.

@60% F.t. 300A = a máquina poderá trabalhar com corrente de 300A durante 6 minutos dentro de um intervalo de 10 minutos.

$$Ft_1 * I_1^2 = Ft_2 * I_2^2$$

GRAU DE PROTEÇÃO

Representa a proteção de um equipamento contra partículas sólidas e líquidas.

I - contra objetos sólidos

- = 3 diâmetro menor que 2,5 mm
- = 2 diâmetro menor que 12,5 e maior que 2,5 mm
- = 1 diâmetro menor que 50 e maior que 12,5 mm

P - contra líquidos

- = 1 gota de água que cai na vertical
- = 2 gota de água que cai na vertical com inclinação de 15 graus
- = 3 gota de água que cai na vertical com inclinação de 60 graus (chuva)

FUSÃO DE ELETRODOS CONSUMÍVEIS

Existem várias relações matemáticas para prever a taxa de fusão de eletrodos consumíveis. Porém, cada relação depende ou do tipo de processo ou do tipo de eletrodo ou do tipo de polaridade, etc. De uma forma simplificada, a taxa de fusão (TF) de um eletrodo consumível pode ser definida pela relação entre a massa consumida do eletrodo (m) e o tempo de soldagem (t), sendo expressa por:

$$TF = \frac{m}{t} = \frac{(m_i - m_f)}{t} \quad (\text{massa/tempo})$$

onde: m_i = massa inicial do eletrodo

m_f = massa final do eletrodo após a soldagem

Também é possível utilizar a relação entre o comprimento consumido do eletrodo (L_c) e o tempo de soldagem (t), sendo mais aceita como taxa de consumo (TC) e expressa por:

$$TC = \frac{L_c}{t} = \frac{(L_o - L_r)}{t} \quad (\text{comprimento/tempos})$$

onde: L_o = comprimento inicial do eletrodo

L_r = comprimento restante do eletrodo após fundido

A taxa de fusão, juntamente com a eficiência de deposição (η_d), determinam as características econômicas dos processos que utilizam eletrodos consumíveis. A eficiência de deposição ou rendimento de deposição real é a relação entre a taxa de deposição (TD) e a taxa de fusão (TF), expressa por:

$$\eta_d = \frac{TD}{TF} * 100 \quad (\%)$$

A taxa de deposição, por sua vez, é a quantidade de material depositado pelo eletrodo (M_s), a qual é efetivamente incorporada à solda, por unidade de tempo, expressa por:

Taxa de deposição de processos que utilizam eletrodos consumíveis:

SMAW = 0,5 a 8,0 Kg/h

GMAW = 1,0 a 15 Kg/h

SAW = 3,0 a 20,0 kg/h

FCAW = 2,0 a 16 kg/h

MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Modos de transferência metálica

- Transferência por curto-circuito
- Transferência globular
- Transferência spray

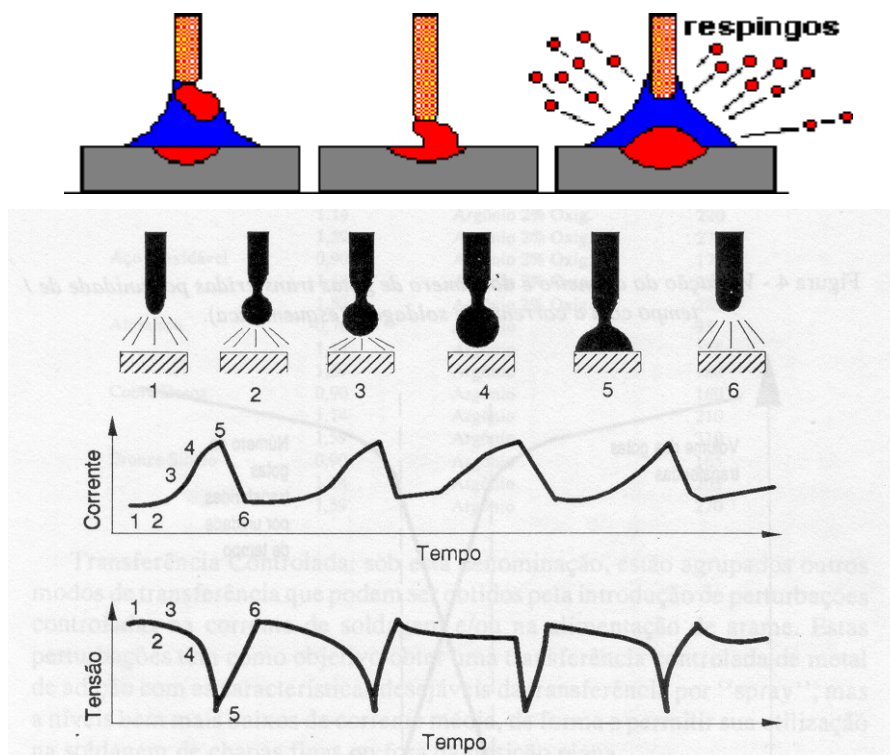
Fatores que mais influenciam o modo de transferência metálica

- Magnitude e tipo de corrente de soldagem
- Diâmetro do arame
- Composição do arame
- Tensão do arco
- Tipo de proteção (gás ou fluxo)

Transferência por curto-circuito

A transferência por curto-circuito ocorre na soldagem com **baixas tensões e correntes de soldagem** (pequenos diâmetros de arame).

Representação esquemática da transferência por curto-circuito



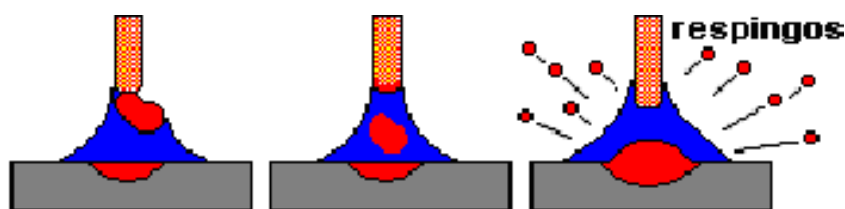
No curto, a corrente de soldagem é máxima e a tensão do arco elétrico é nula. O metal é

transferido do eletrodo para a peça somente durante o período quando o eletrodo está em contato com a poça de fusão. Nenhum metal é transferido através do arco. O arame toca a poça fundida numa faixa de 20 a 200 curtos-circuitos por segundo. Quando o arame toca a poça de fusão, a corrente de soldagem aumenta (ponto 5). A taxa em que a corrente aumenta deve ser alta o suficiente para aquecer o arame e promover a transferência metálica, contudo baixa o suficiente para minimizar respingos causados pela separação violenta da gota de metal. O nível de respingos é bastante elevado. Este modo de transferência produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento que é geralmente utilizada na soldagem de seções finas, na soldagem fora de posição e para fechar grandes aberturas de raiz.

Transferência globular

Este modo de transferência ocorre para **valores intermediários de tensão e corrente** de soldagem e resulta em um arco mais estável que no caso anterior.

Representação esquemática da transferência globular



Mesmo utilizando uma corrente elevada, se o comprimento do arco é muito pequeno, a gota em crescimento pode tocar a poça (**transferência por curto-circuito**), se superaquecer e desintegrar, produzindo muitos respingos. Portanto, **a combinação entre a corrente de soldagem e a tensão do arco é essencial para a definição do modo de transferência metálica.**

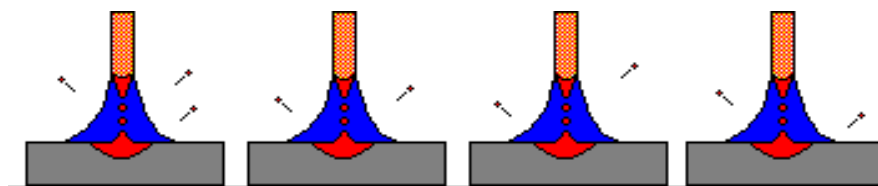
A transferência globular é caracterizada por uma gota de diâmetro maior que o do arame. Com o aumento do tamanho da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a gota de metal líquido se transfere para a poça de fusão pela ação da gravidade. Por este motivo, sua utilização é limitada à **posição plana em juntas de topo e plana e horizontal em juntas de filete.**

O nível de respingos na transferência globular é relativamente elevado, porém inferior ao caso anterior.

Transferência spray

À medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui, até que, acima de um certo nível de corrente (corrente de transição), há uma mudança brusca no modo de transferência, que passa de globular para spray.

Representação esquemática de transferência spray



o arco elétrico não extingue

O modo de transferência spray resulta em um fluxo altamente direcionado de gotas discretas que são aceleradas pelas forças do arco elétrico a velocidades que vencem a força da gravidade. Devido a isto, o processo, sob certas condições, pode ser utilizado em qualquer posição. Devido às gotas serem menores que o diâmetro do arame e que o comprimento do arco, curto circuito não ocorrer e respingos são mínimos, se não totalmente eliminados. A corrente de transição depende de inúmeros fatores, particularmente, da composição e temperatura de fusão do eletrodo/arame, do tipo de gás de proteção, é inversamente proporcional ao diâmetro do eletrodo/arame e depende em menor grau do comprimento do arco.

GASES DE PROTEÇÃO

Tipo e potencial de ionização de alguns gases utilizados na soldagem

Gás	Tipo	Potencial (eV)
Hélio	inerte	24,59
Argônio	inerte	15,76
Hidrogênio	ativo	15,43
Nitrogênio	ativo	15,58
Dióxido de carbono	ativo	13,77
Oxigênio	ativo	12,07

Fatores que influenciam na escolha do tipo de gás de proteção

- Metal de base
- Propriedades mecânicas requeridas pelo cordão de solda
- Condição e pureza do metal base
- Tipo de serviço e aplicações específicas requeridas
- Posição de soldagem
- Tipo de processo de soldagem (GTAW, PAW, GMAW e FCAW)
- Modo pretendido de transferência metálica

Principais funções dos gases de proteção

- Propiciar a ionização do arco elétrico
- Proteger o arco elétrico e a poça de fusão contra contaminações da atmosfera

Variáveis influenciadas pelo tipo e pela vazão do gás de proteção

- Características do arco
- Modo de transferência metálica
- Penetração e forma do cordão de solda
- Velocidade de soldagem
- Tendência ao trincamento
- Ação de limpeza
- Propriedades mecânicas do metal de solda

Gases de proteção inertes

Argônio e hélio são os gases inertes mais utilizados na soldagem.

Estes gases puros ou misturas desses gases são utilizados na soldagem de materiais não ferrosos, aços inoxidáveis, aços carbono e aços de baixa liga.

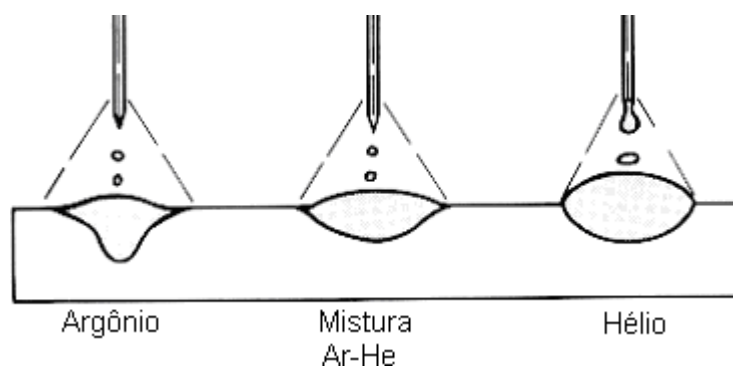
As principais diferenças entre o argônio e o hélio são a densidade, o potencial de ionização e a condutividade térmica.

O argônio é aproximadamente 1,4 vez mais denso que o ar, enquanto a densidade do hélio é aproximadamente 0,14 vez a do ar. O argônio, mais pesado, é mais efetivo na proteção do arco e da poça de fusão na posição plana que o hélio. O hélio requer aproximadamente 2 ou 3 vezes mais vazão que o argônio para fornecer proteção igual (maior custo de soldagem).

O hélio tem um potencial de ionização maior que o argônio, e conseqüentemente, uma tensão mais alta pode ser adotado durante a soldagem, quando outras variáveis são mantidas constantes. O hélio pode apresentar problemas na iniciação do arco. Arcos protegidos com hélio produzem maior quantidade de respingo e tem acabamento mais áspero que arcos protegidos com o argônio.

O hélio tem maior condutividade térmica que o argônio e produz um plasma com a energia mais uniformemente distribuída.

O plasma do argônio, por outro lado, é caracterizado como tendo uma alta energia no centro e uma baixa energia nas extremidades. Essa diferença afeta a forma do cordão de solda. Um arco de solda protegido por hélio produz um cordão de solda profundo, parabólico e largo. Um arco protegido por argônio produz um cordão de solda caracterizado por penetração tipo dedo.



As características desejáveis, durante a soldagem, que são encontradas utilizando hélio (profundidade, largura e formato do cordão de solda) podem ser aproveitadas utilizando uma mistura de Ar-He.

Na soldagem de materiais não ferrosos pode-se utilizar proteção com argônio puro.

O uso de hélio puro geralmente é restrito a áreas mais especializadas, devido à sua limitada estabilidade e custo elevado.

Gases de proteção ativos

O dióxido de carbono (CO_2) é o gás ativo mais utilizado para soldagem. É o único gás ativo utilizado, na sua forma pura, na soldagem.

Altas velocidades de soldagem, grandes penetrações e baixo custo são características gerais que tem encorajado o uso do CO_2 puro.

Em comparação com proteções ricas em argônio, a proteção com CO_2 produz um cordão com excelente penetração, com superfície áspera e menor “lavagem” nos contornos do cordão devido ao arco ser restrito (menor susceptibilidade para gerar mordedura).

Adições de O_2 e CO_2 ao argônio

A proteção do arco elétrico por argônio puro causa um arco irregular e uma tendência para ocorrer trinca na raiz da solda.

Adições de O_2 ou CO_2 ao argônio produzem notável melhora na estabilidade do arco e produzem soldas livres de trincas na raiz.

A quantidade ótima de O_2 ou CO_2 a ser acionada depende da condição da superfície, geometria da junta, posição de soldagem e da composição química do metal base.

Adições de O_2 ao argônio melhora a fluidez da poça de fusão, a penetração e a estabilidade do arco. A tendência à trinca na raiz é reduzida, apesar de considerável oxidação da solda ocorrer, com notável perda de sílica e manganês.

Adições de CO_2 ao argônio podem melhorar a aparência do cordão de solda.

Misturas de argônio com CO_2 são utilizadas em aços carbono e baixa liga e em menor extensão em aços inoxidáveis.

FLUXOS DE PROTEÇÃO

Processos de soldagem que utilizam fluxos

- SMAW
- FCAW
- SAW

O fluxo consiste de uma mistura de diferentes materiais combinados em proporções adequadas. Muitos dos ingredientes de um fluxo podem ter mais de uma função e diferentes ingredientes no mesmo fluxo podem contribuir para a mesma função.

Funções dos fluxos

- Fornecer elementos de liga para o refino da microestrutura (desoxidação e dessulfuração).
- Fornecer elementos de liga para o controle da composição química do metal de solda.
- A escória, proveniente da queima do fluxo, protege as gotas de metal fundido durante a sua transferência pelo arco e controla a velocidade de resfriamento do metal de solda.
- Fornecer agentes que facilitam a remoção da escória, a soldagem em diversas posições, possibilitar o uso de diferentes tipos de corrente e polaridade;
- A decomposição de ingredientes do fluxo pode ainda controlar a temperatura do arame/eletrodo durante a soldagem.
- Os gases, provenientes da decomposição do fluxo, propiciam a ionização do arco e produzem uma atmosfera protetora para o arco elétrico e para a poça de fusão contra contaminações da atmosfera, etc.

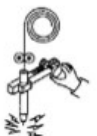
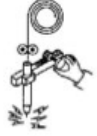
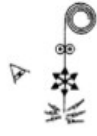
No processo FCAW, há diferentes tipos de arames tubulares:

- arame tubular (normal) com proteção gasosa;
- arame tubular auto-protegido;
- arame tubular do tipo metal cored com proteção gasosa.

OBS.: Apenas no processo FCAW com arame tubular **auto-protegido**, ingredientes do fluxo são responsáveis pela geração de gases para a ionização do arco e proteção do arco e da poça de fusão. Para os demais tipos de arames esta função é responsabilidade do gás de proteção.

MÉTODO DE APLICAÇÃO DA SOLDAGEM

Classificação de Acordo com a AWS

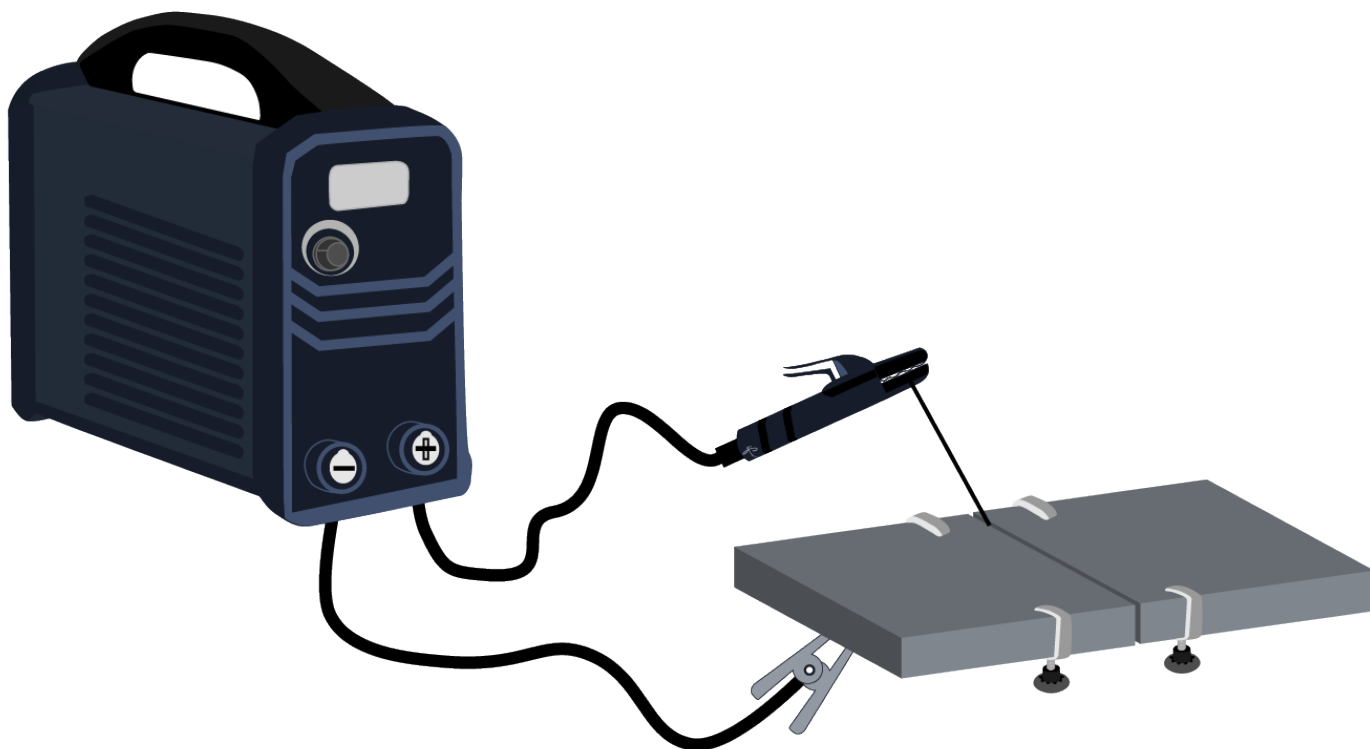
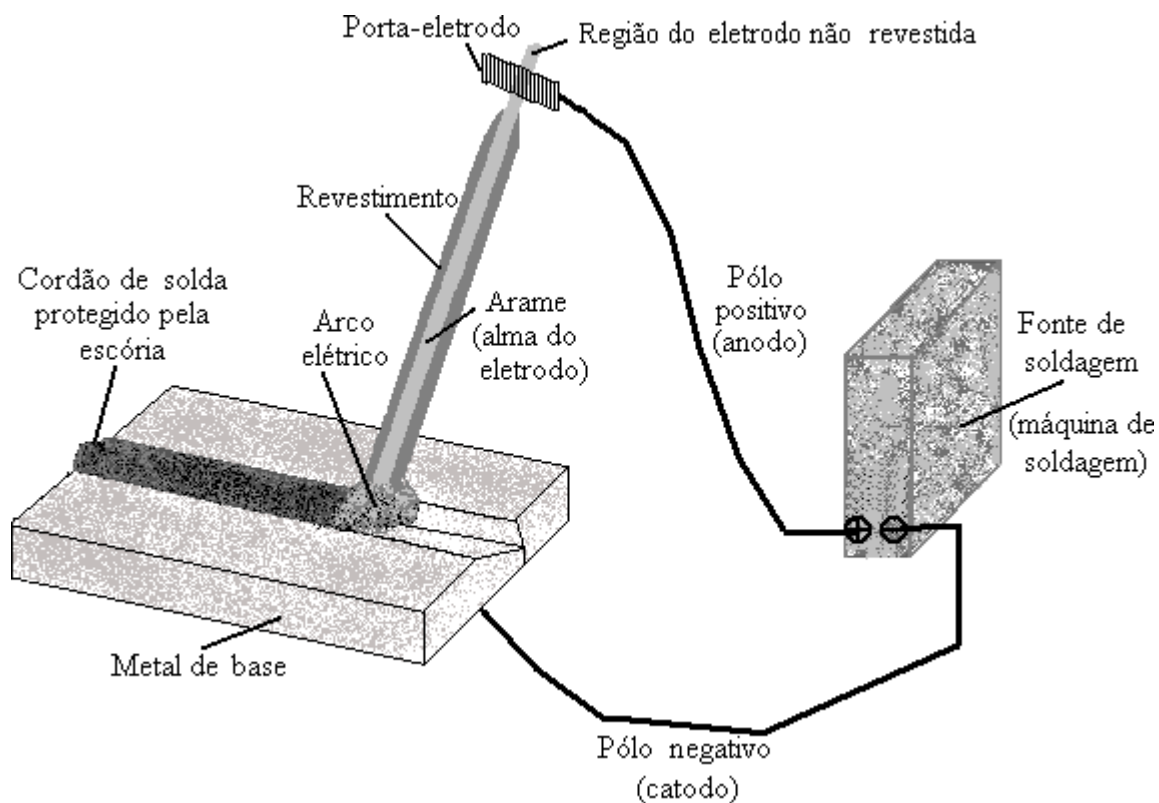
Método de Aplicação	Manual	Semi-automático	Mecanizado	Automático	Robotizado	Controle Adaptativo
Atividades						
Abertura e manutenção do arco	Humano	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô)
Alimentação do arame/eletrodo	Humano	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina
Controle do calor para obter penetração	Humano	Humano	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô) (só com sensor)
Movimento do arco ao longo da junta	Humano	Humano	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô)
Guiar o arco ao longo da junta	Humano	Humano	Humano	Máquina (via trilha pré programada)	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô) (só com sensor)
Manipular a tocha para direcionar o arco	Humano	Humano	Humano	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô)
Correções do arco para compensar desvios	Humano	Humano	Humano	Não ocorre	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô) (só com sensor)

Proposta de Reclassificação dos Métodos de Aplicação

Atividades	Método de Aplicação				
	Manual	Semi-mecanizado	Mecanizado	Automatizado	
				Fixo (sem robô)	Flexível (com robô)
Deslocamento da tocha porta-eletrodo	manual	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico
velocidade de soldagem	manual	manual ou gravidade	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico
Programação do ciclo de soldagem	não há	não há	não há	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico

Fonte: Método de Aplicação da Soldagem: Manual, Mecanizado ou Automatizado XXXII Consolda, 2006.
Ivanilza Felizardo, Alexandre Queiroz Bracarense

SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO – SMAW SHIELDED METAL ARC WELDING



Características do Processo

Processo extremamente simples.

Investimento em equipamento é relativamente baixo.

Eletrodos são facilmente encontrados no mercado.

A diversidade dos tipos de consumíveis existentes no mercado é imensa, devido à facilidade que se tem para alterar a composição química do revestimento.

Processo bastante utilizado na soldagem de aços baixo carbono, aços de baixa, média e alta liga, aço inoxidável, ferros fundidos, alumínio, cobre, níquel e ligas destes.

Diferentes combinações de metais dissimilares podem ser soldadas com eletrodo revestido.

É o processo mais utilizado na soldagem subaquática.

Pode ser usado em todas as posições (depende do tipo de revestimento).

É indicado para metal de base com espessura entre 3,0 mm a 40 mm e em áreas de acesso limitado. Para espessuras inferiores a 2 mm, o material é facilmente perfurado pelo calor do arco, antes da formação da poça de fusão.

Para espessuras muito grandes, a baixa produtividade do processo pode ser um fator limitante.

Metais de baixo ponto de fusão como o estanho, zinco, chumbo e suas ligas não são soldados pelo SMAW, pois a intensidade do calor do arco é muito alta. Também não é adequado para metais refratários ou muito reativos como o titânio, zircônio, molibdênio, nióbio e o tântalo, pois os elementos fornecidos pelo revestimento não evitam a contaminação do oxigênio na solda.

O modo de transferência metálica dos eletrodos revestidos é essencialmente uma função da composição do revestimento, visto que essa composição determina quais os parâmetros de soldagem a serem utilizados. De uma maneira geral, o modo de transferência para eletrodos ácidos ou oxidantes é basicamente spray; para eletrodos rútilicos é menos spray e para eletrodos básicos, a transferência de metal ocorre por gotas grandes. O tamanho das gotas de metal fundido transferido no decorrer do processo com eletrodo revestido aumenta devido ao aumento da temperatura do eletrodo durante a soldagem.

A grande limitação do processo é o fato de se tratar de um processo tipicamente manual, cujo nível de habilidade do soldador é fundamental para se obter uma solda de qualidade. O soldador é responsável pela abertura e fechamento do arco elétrico, pela troca do eletrodo e pela execução dos movimentos e controle das velocidades de avanço e de mergulho do eletrodo. Esses movimentos, consequentemente o controle dessas velocidades, devem ser realizados de forma que o comprimento do arco seja mantido constante durante o processo.

Uma característica peculiar do processo de soldagem com eletrodo revestido é o fato da corrente atravessar todo o comprimento do eletrodo, aquecendo-o por efeito Joule. O aumento da temperatura dos eletrodos revestidos durante a soldagem produz várias consequências, dentre elas, alterações na sua taxa de fusão: **velocidade de mergulho dos eletrodos revestidos não é constante durante a soldagem**. Esse fato é um dos mais importantes que dificulta a automação do processo.

Aquecimento do Eletrodo Revestido durante a Soldagem

O aquecimento do eletrodo revestido durante a soldagem deve-se ao calor transferido do arco elétrico, através da interface líquido/sólido na ponta do eletrodo, e ao calor gerado por efeito Joule, devido à resistência do arame à passagem de corrente elétrica. O calor gerado no arco elétrico, q_o , é definido por:

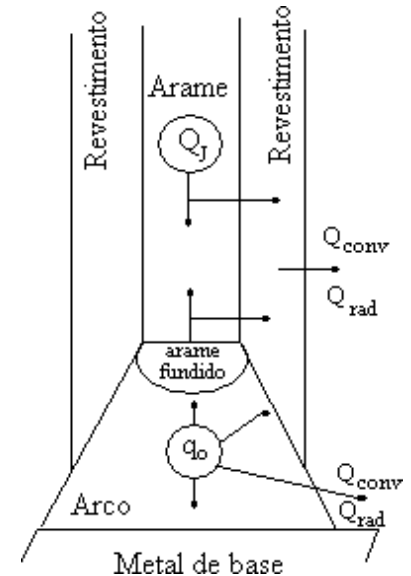
$$q_o = \eta \frac{IV}{A} \quad (\text{W/m}^2)$$

onde: η = rendimento térmico do processo (%)

I = corrente de soldagem (A)

V = tensão do arco elétrico (V)

A = área transversal do arame (m^2)



E o calor gerado por efeito Joule, Q_J , é representado pela seguinte equação:

$$Q_J = RI^2 = \frac{\rho_e L}{A} I^2 \quad (\text{W})$$

onde: R = resistência elétrica (Ω)

ρ_e = resistividade elétrica do arame (Ωm)

L = comprimento do eletrodo (m)

O calor gerado por efeito Joule, Q_J , ocorre apenas no arame, visto que no revestimento, não há fluxo de corrente passando por ele, portanto, não há geração de calor.

O revestimento é aquecido pelo fluxo de calor condutivo do arame.

O arco elétrico é estabelecido entre a ponta do arame e o metal de base.

Os efeitos do aquecimento do eletrodo revestido são vários e completamente diferentes no arame e no revestimento.

O aquecimento no arame altera as propriedades físicas e elétricas do aço, mas não altera sua composição química, enquanto que o revestimento tende a perder umidade quando calor é aplicado.

À medida que a temperatura do eletrodo aumenta, o teor de componentes orgânicos no revestimento, responsáveis pela proteção do metal fundido, diminui e, consequentemente, as características do metal depositado são piores no final do cordão de solda.

O aumento da temperatura do eletrodo revestido altera a taxa de fusão do eletrodo durante a soldagem, fazendo com que seja necessário alterar a velocidade de mergulho do eletrodo durante o processo.

Fatores que alteram a Temperatura do Eletrodo Revestido

O calor gerado por efeito Joule é o único responsável pelo aumento da temperatura do eletrodo em regiões afastadas da frente de fusão, enquanto que o calor transferido do arco elétrico aumenta a temperatura do eletrodo apenas em regiões extremamente próximas à frente de fusão.

Nessa região existe um somatório do calor gerado por efeito Joule e do calor transferido pelo arco elétrico;

Para um mesmo diâmetro de arame, quando maior a corrente de soldagem, maior a temperatura do eletrodo;

Mantendo a corrente de soldagem constante, quando maior o diâmetro do arame, menor a temperatura do eletrodo;

Para um mesmo diâmetro de arame e mantendo a corrente de soldagem constante, quando maior a espessura do revestimento menor a temperatura do eletrodo;

A tensão do arco elétrico praticamente não afeta a temperatura do eletrodo, que não sofre nenhum efeito do ângulo do eletrodo com o plano horizontal;

A temperatura do eletrodo aumenta com a adição de fluxos exotérmicos e diminui com a adição de fluxos endotérmicos no revestimento;

A polaridade influencia de forma complexa na temperatura do eletrodo em regiões extremamente próximas à frente de fusão (podendo dizer que a polaridade influencia a temperatura do arco elétrico), porém não altera a temperatura do eletrodo em regiões afastadas da frente de fusão.

“Qualquer parâmetro que causa uma variação na temperatura do eletrodo revestido causa, consequentemente, uma variação na sua taxa de fusão. A taxa de fusão do eletrodo revestido varia com o tempo, porque a temperatura do eletrodo varia”.

Fabricação dos Eletrodos Revestidos

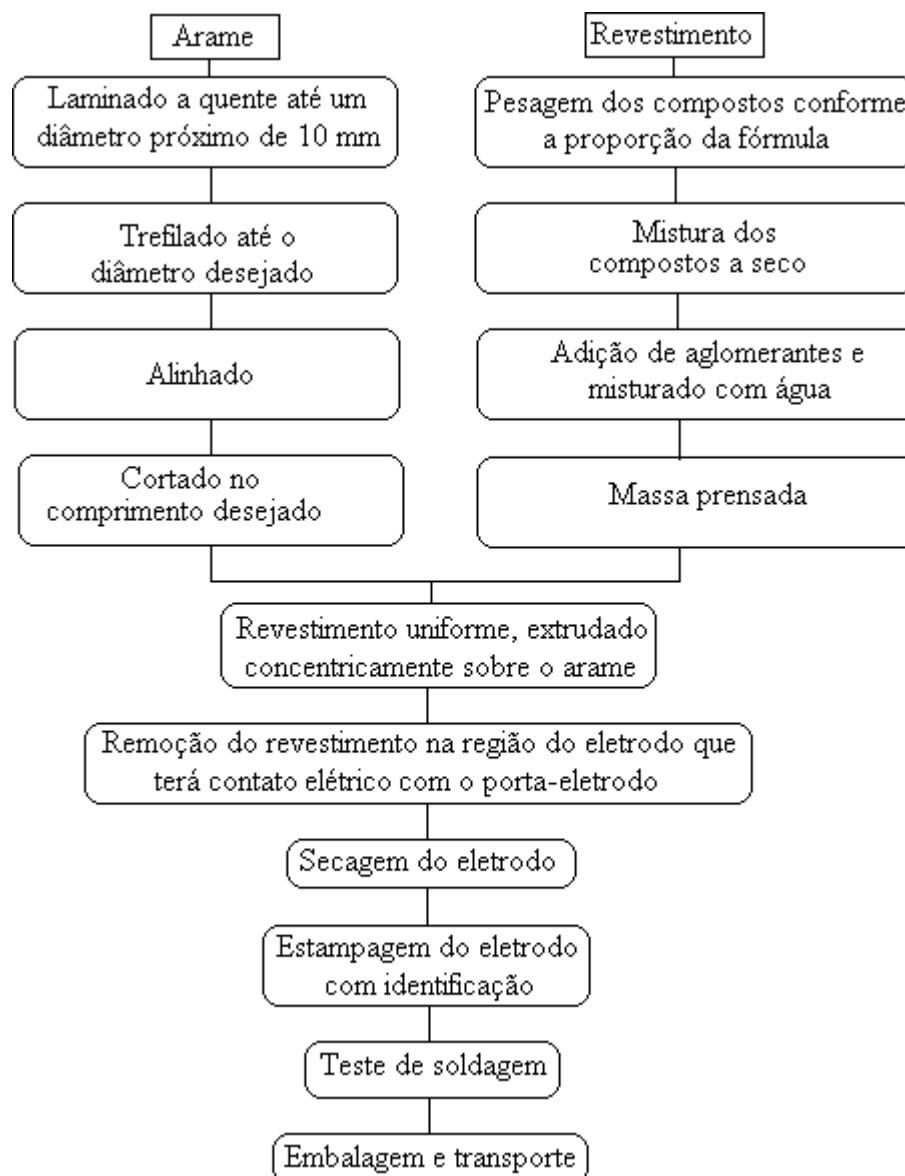
A fabricação dos eletrodos revestidos não é simples, devido à grande diversidade dos tipos e das aplicações em soldagem, cada um exigindo considerações especiais.

A camada de revestimento ao redor do arame é geralmente extrudada e não deve deteriorar ou separar com o calor durante a sua preparação ou durante a soldagem.

Também precisa ter considerável resistência mecânica aos impactos ou às vibrações durante o armazenamento e o transporte.

Ao longo da produção, inspeções e ajustes são executados para assegurar um revestimento uniforme e concêntrico, visto que um dos mais importantes índices de qualidade do revestimento é a sua concentricidade.

Fluxograma das Etapas de Fabricação dos Eletrodos Revestidos

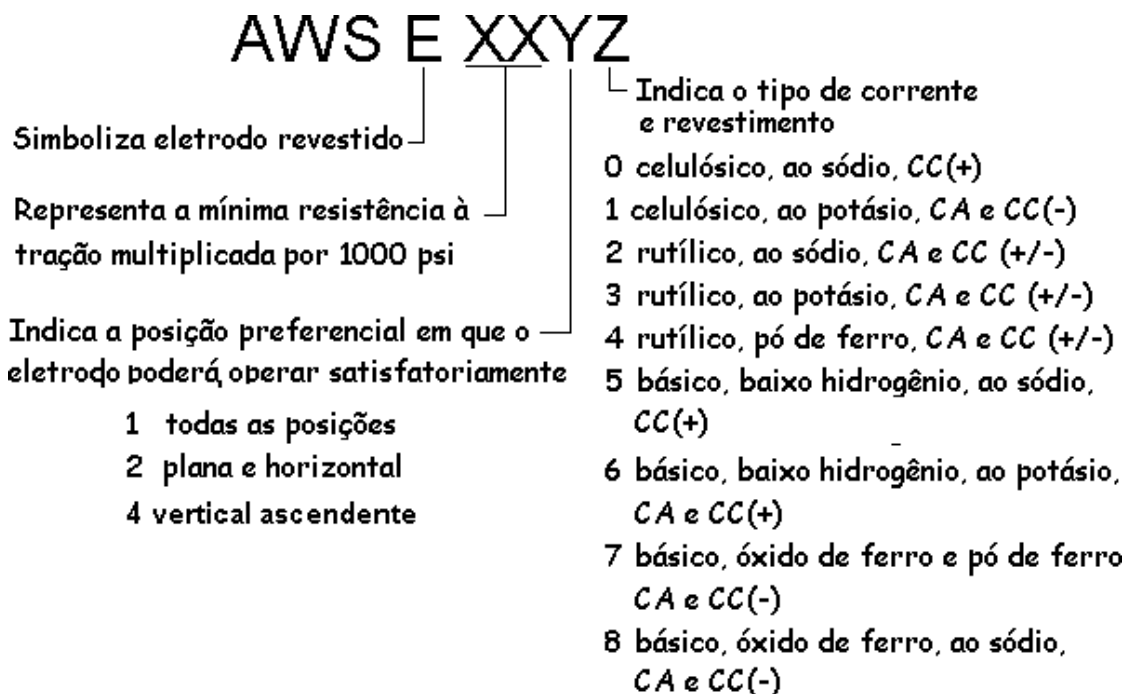


Principais Elementos presentes no Revestimento

Elementos	Fórmula	Funções primárias e secundárias
Alumina	Al_2O_3	Formar escória; estabilizar o arco
Argila	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ajudar na extrusão; formar escória
Cal	CaO	Agente fluxante; controlar a viscosidade da escória
Calcita	CaCO_3	Controlar a basicidade da escória; gerar gases de proteção
Fluorita	CaF_2	Controlar a basicidade da escória; reduzir a viscosidade da escória
Celulose	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_x$	Gerar gases de proteção; ajudar na extrusão
Ferro-Manganês	Fe-Mn	Controlar a composição química; promover a desoxidação
Ferro-Silício	Fe-Si	Promover a desoxidação; controlar a composição química.
Hematita	Fe_2O_3	Promover a oxidação; formar escória
Magnetita	Fe_3O_4	Promover a oxidação; formar escória
Silicato de Lítio	Li_2SiO_3	Atuar como agente aglomerante
Silicato de Potássio	K_2SiO_3	Estabilizar o arco; agente aglomerante
Titanato de Potássio	$2\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{TiO}_2$	Estabilizar arco; formar escória
Feldspar	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	Formar escória; agente fluxante
Mica	$\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ajudar na extrusão; estabilizar o arco
Dolomita	$\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot 2(\text{CO}_2)$	Gerar gases; agente fluxante
Silicato de Sódio	Na_2SiO_3	Agente aglomerante; estabilizar o arco
Sílica	SiO_2	Formar escória; controlar a viscosidade
Rutila	TiO_2	Reduzir a viscosidade da escória; estabilizar o arco
Pó de Ferro	-	Aumentar a taxa de deposição e o rendimento do eletrodo; estabilizar o arco
Zircônio	ZrO_2	Estabilizar o arco; facilitar a destacabilidade da escória

Classificação AWS de Eletrodos para Aço Carbono

AWS - American Welding Society



Tipos de Revestimento

Revestimento Oxidante

Constituído principalmente de óxido de Ferro e Manganês.

Produce uma escória oxidante, abundante e de fácil remoção.

Apresenta baixa penetração.

Não é adequado para aplicações de risco elevado.

Bastante utilizado na soldagem subaquática.

Revestimento Ácido

Constituído principalmente de óxido de Ferro, Manganês e sílica.

Produce uma escória ácida, abundante, porosa e de fácil remoção.

Apresenta penetração média e alta taxa de fusão.

Propriedades da solda são consideradas boas para diversas aplicações, embora sua resistência à formação de trincas de solidificação seja baixa.

Apresenta uma aparência de cordão muito boa.

Revestimento Rutílico

Contém grandes quantidades de rutila (TiO_2 - óxido de Titânio).

Produz uma escória abundante, densa e de fácil destacabilidade.

É de fácil manipulação.

Pode ser utilizado em qualquer posição, exceto nos casos em que o revestimento possui um grande teor de pó de Ferro.

Cordão de bom aspecto, porém com penetração média ou baixa.

A resistência à fissuração a quente é relativamente baixa.

Grande versatilidade e de uso geral. Exemplo: E6013.

Revestimento Básico

Contém grandes quantidades de carbonatos de Cálcio (CaCO_3).

Escória básica exerce uma ação benéfica sobre a solda; dessulfurando-a e reduzindo o risco de trincas de solidificação.

Produz soldas com baixos teores de hidrogênio.

Penetração é média.

Cordão apresenta boas propriedades mecânicas, particularmente em relação a tenacidade.

Indicados para aplicações de alta responsabilidade, para soldagens de grandes espessuras e de elevado grau de travamento.

Recomendado para a soldagem de aços de baixa soldabilidade.

Revestimento é mais higroscópico.

Requerer cuidados especiais com o armazenamento e manuseio. Exemplo: E7018.

Revestimento Celulósico

Contém grandes quantidades de material orgânico (celulose).

Gera grandes quantidades de gases que protegem o metal líquido.

Quantidade de escória produzida é pequena.

Produz grande volume de respingos.

Penetração é alta.

Aspecto do cordão é de escamas irregulares.

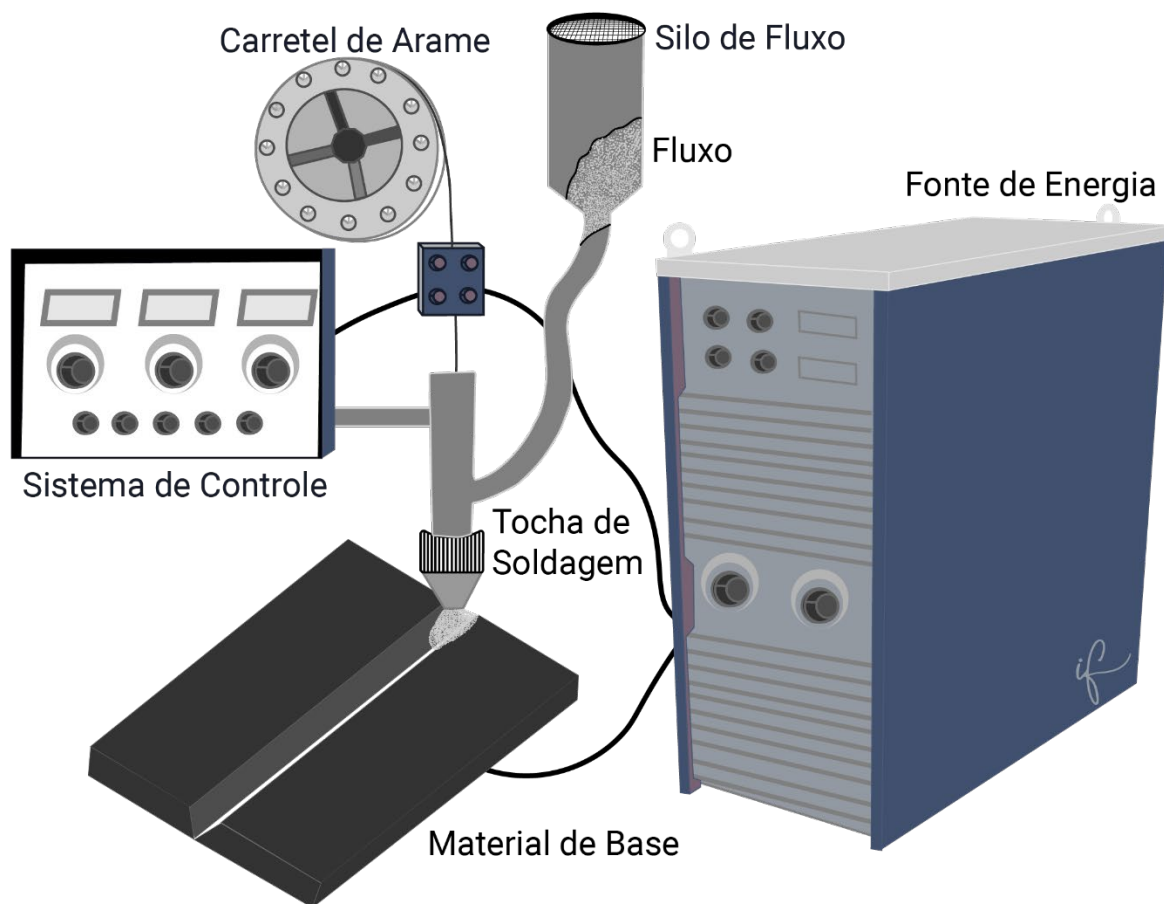
Características mecânicas da solda são consideradas boas, com exceção da possibilidade de fragilização pelo hidrogênio.

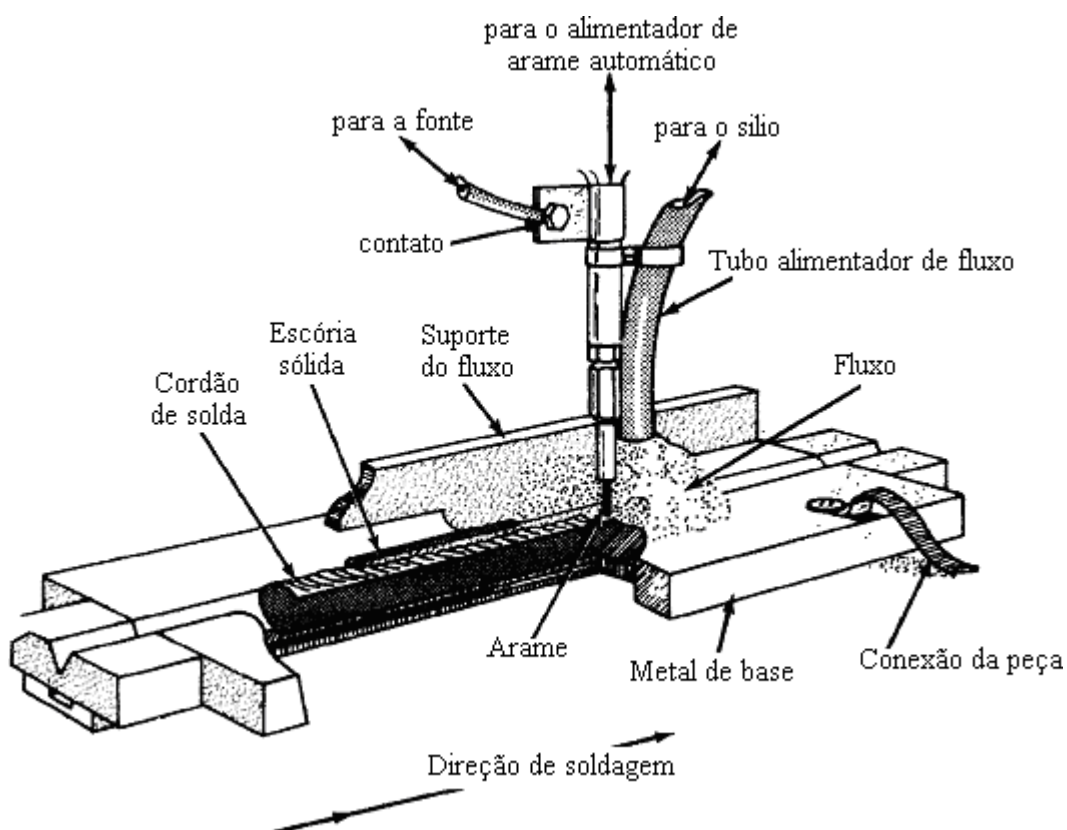
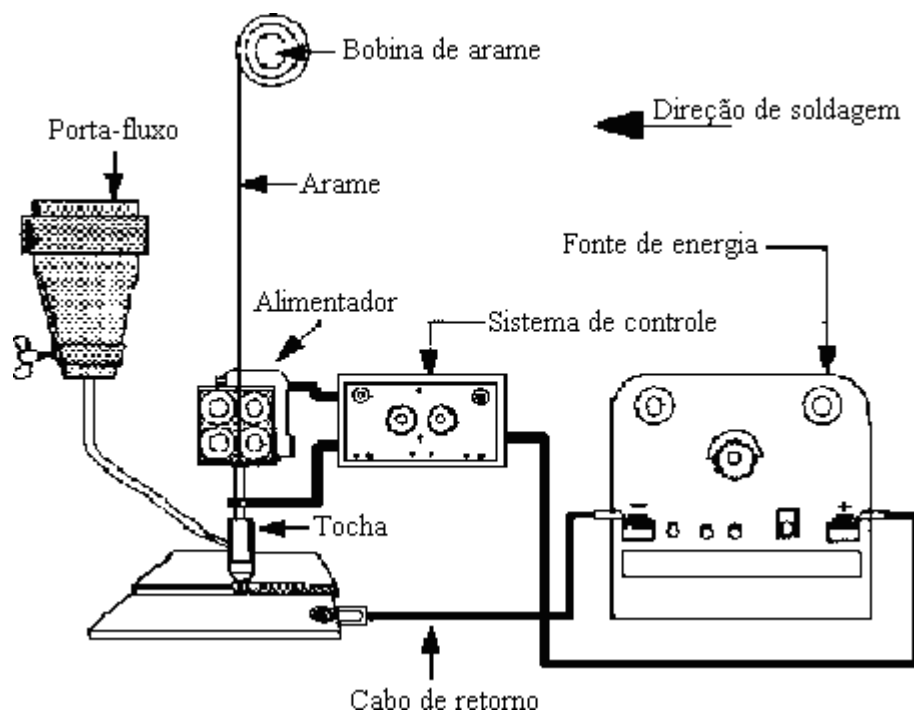
Recomendados para soldagem fora de posição, tendo grande aplicação na soldagem orbital de tubos e na execução de passes de raiz em geral.

Não são recomendados para o enchimento de chanfros.

Exemplo: E6010.

SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO – SAW SHIELDED ARC WELDING





Características do Processo

O nome do processo deve-se ao fato do arco elétrico e do metal fundido estarem submersos numa cobertura de fluxo granular fusível que os protegem de contaminação pela atmosfera.

É possível ocorrer a soldagem com correntes acima de 1500 A.

É possível ocorrer a soldagem utilizando um ou mais arames para enchimento da junta;

Existem arames para a soldagem de aços de baixo carbono, aços de baixa liga, aço inoxidável, aços cromo-molibdênio e aços ligados com níquel.

Caracteriza-se por ser um processo que possibilita a utilização de altas velocidades de soldagem, apresenta altas taxas de deposição, proporcionando alta produtividade.

Produz soldas de alta qualidade e penetração profunda.

Não produz respingos e fumos durante a soldagem.

A composição química e espessura do metal base, a acessibilidade da junta, a **posição da soldagem** e a frequência ou volume de solda são fatores que definem o uso do processo SAW.

Soldagens em juntas de topo são realizadas somente na posição plana.

Soldagens em juntas de filete podem ser realizadas nas posições plana ou horizontal.

Apresenta um custo elevado do equipamento comparado a outros processos.

O grande porte do equipamento restringe a realização de soldagens em campo.

A ótima penetração inerente ao processo permite a realização de juntas de topo com chanfro reto em materiais de 12 mm ou mais de espessura, soldando somente de um lado, desde que alguma forma de apoio (*mata-junta*) seja usada para suportar o metal fundido.

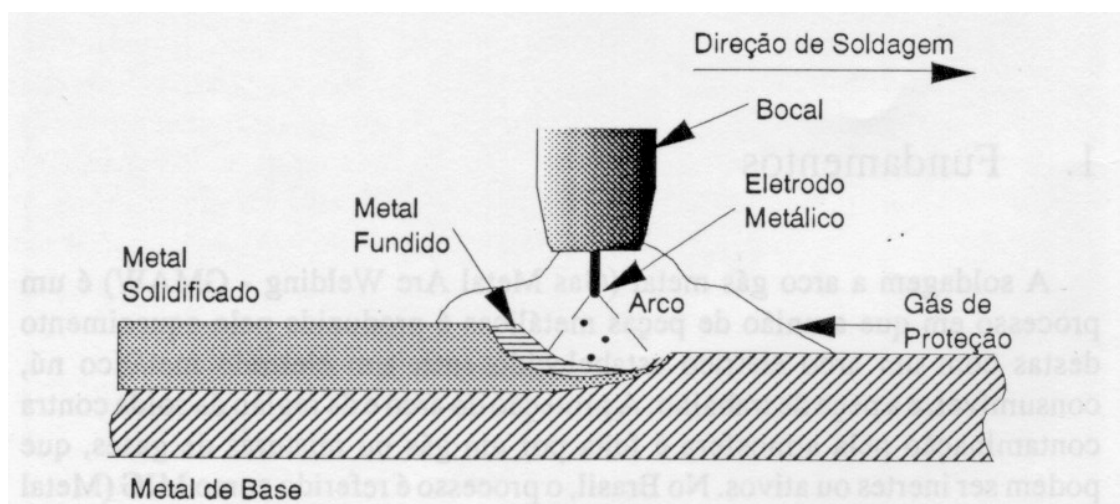
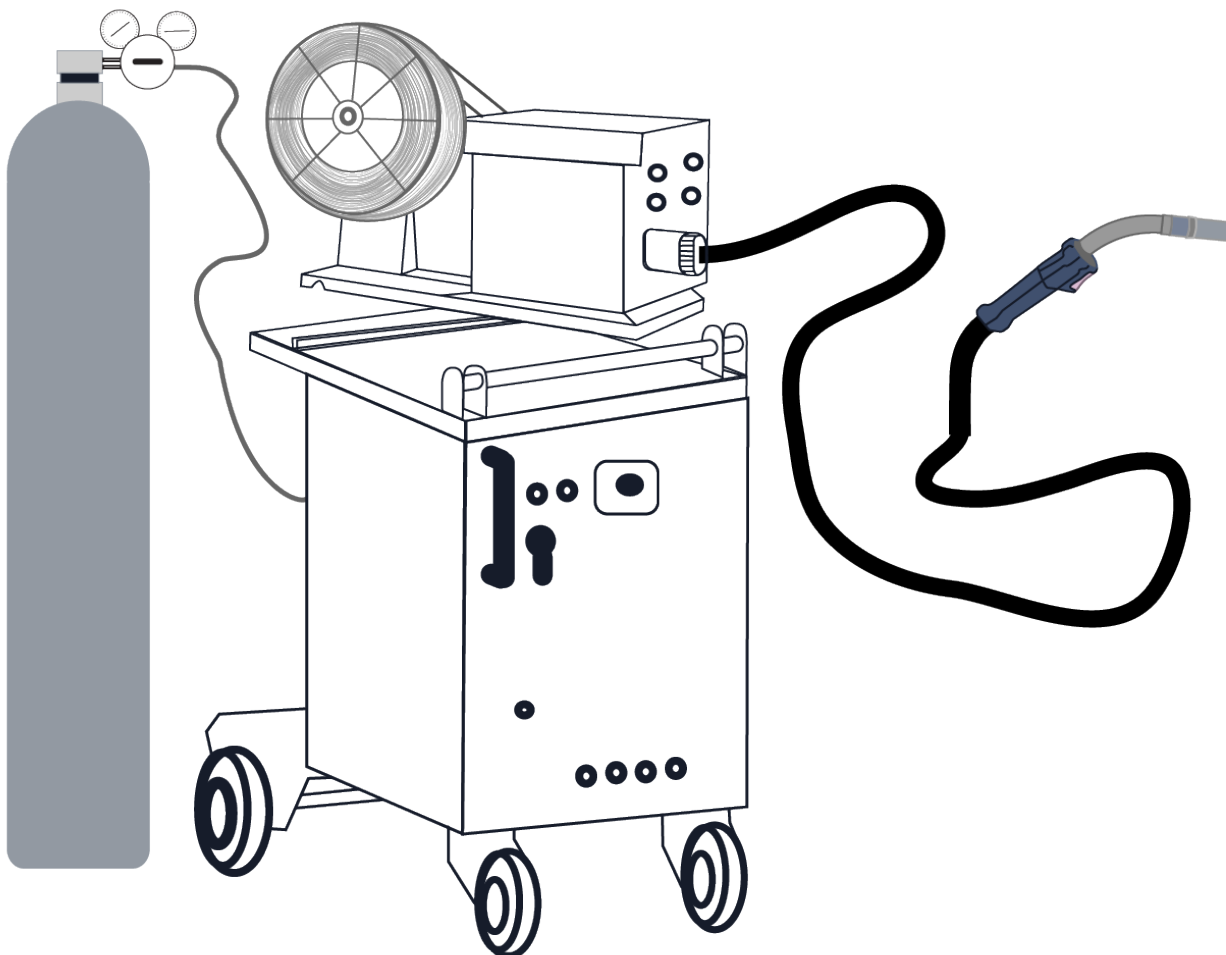
Soldas de um passe com até 8 mm de espessura e dois passes com até 16 mm de espessura são feitas em aço com uma junta de topo com chanfro reto e um apoio.

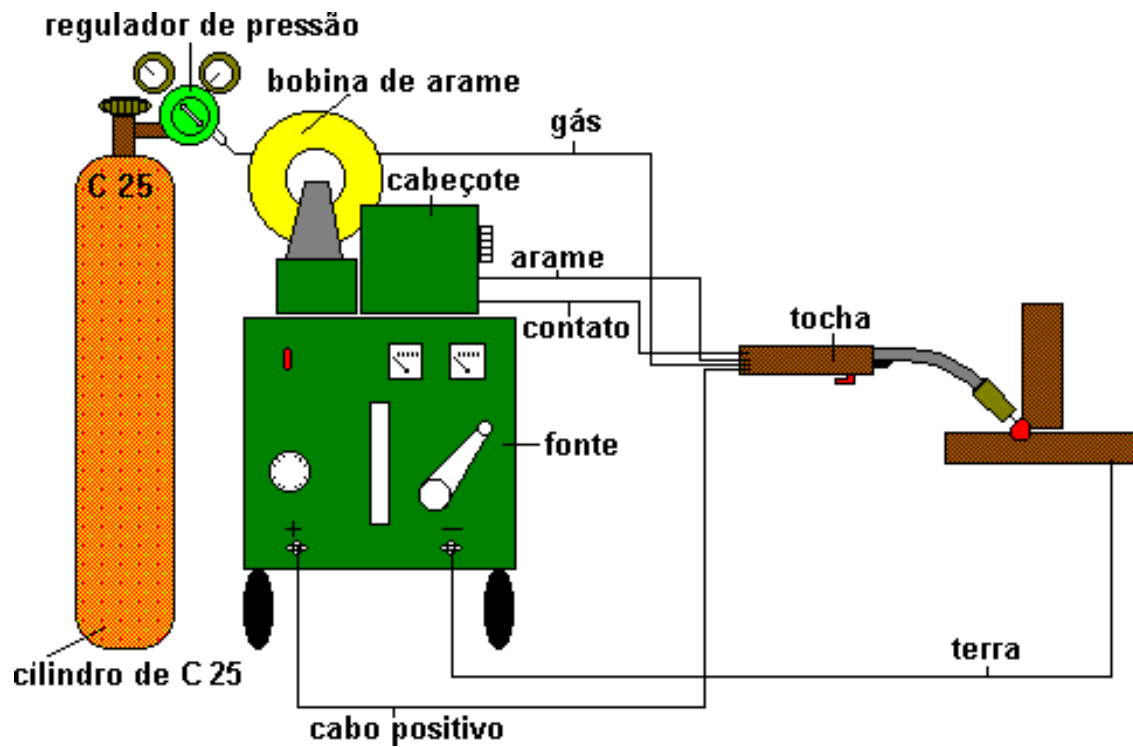
Com vários passes, usando um ou múltiplos arames, qualquer espessura de placa pode ser soldada.

Usando um único arame, soldas de filete até 9 mm de garganta podem ser feitas na posição horizontal com um passe.

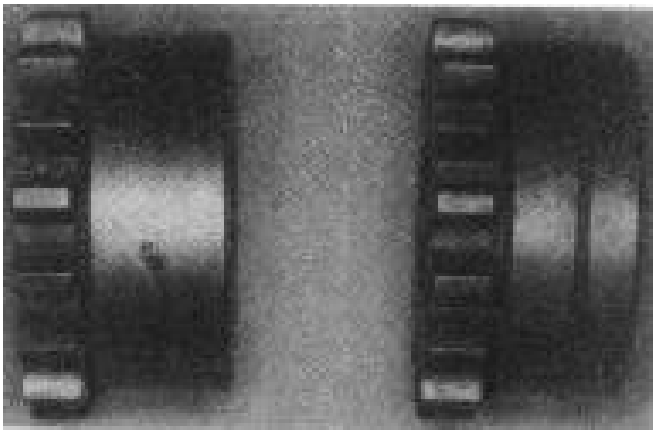
Soldas de filete maiores que 8 mm são feitas normalmente na posição plana ou por vários passes na posição horizontal.

SOLDAGEM COM ARAME SÓLIDO – GMAW GAS METAL ARC WELDING



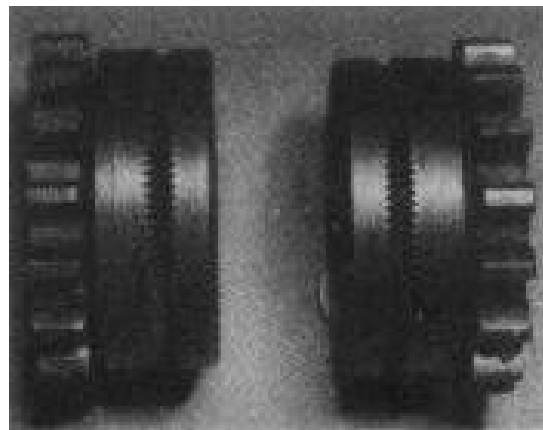


Roletes lisos



Utilizado no GMAW – arame maciço

Roletes serrilhados



Utilizado no FCAW – arame tubular (evitar o risco de amassar o arame e prejudicar a utilização do fluxo por unidade de comprimento da solda)

Características do Processo

A concepção básica do GMAW iniciou-se no ano de 1920, entretanto somente se tornou comercial após o ano de 1948.

Inicialmente, era considerado para ser, fundamentalmente, um processo de alta densidade de corrente (corrente dividido pela área transversal do arame) onde se utiliza um gás inerte para proteção e sua primeira aplicação foi na soldagem de alumínio. Por causa dessa característica, o processo era conhecido como MIG – Metal Inert Gas, denominação ainda utilizada para o processo.

Evolução subsequente do processo incluiu a soldagem com baixas densidades de corrente e a utilização de corrente pulsada com aplicação em uma vasta faixa de materiais e emprego de gás ativo, processo conhecido como MAG – Metal Active Gás.

O último desenvolvimento do processo foi a utilização de misturas de gases levando à aceitação formal do termo GMAW – Gas Metal Arc Welding para denominação do processo, devido à utilização de gases inertes, ativos e misturas.

Todos os metais comercialmente importantes, tais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados com o processo GMAW, em todas as posições de soldagem pela escolha apropriada do gás de proteção, do arame e das variáveis de soldagem.

Processo não produz escória.

O arco deve estar protegido de correntes de ar que possam dispersar o gás de proteção. Isto pode limitar a soldagem em campo.

Uma característica típica do processo GMAW é que dependendo dos parâmetros de soldagem, em especial corrente, diâmetro do arame, tensão e tipo de gás de proteção, consegue-se distinguir facilmente os três modos de transferência metálica: curto- circuito, globular e spray.

Influência do Gás de Proteção no Modo de Transferência Metálica

A composição do gás de proteção tem efeito importante na tensão superficial do metal fundido.

Mudanças na composição do gás podem afetar o tamanho da gota e, conseqüentemente, o modo de transferência metálica, para uma mesma condição de soldagem no processo GMAW.

Numa transferência por curto circuito, o gás CO_2 produz mais respingos em relação à utilização de gases inertes, por outro lado, produz maior penetração.

Para encontrar uma boa combinação entre respingos e penetração, misturas de CO_2 e argônio são frequentemente utilizadas na soldagem de aços carbono e baixa liga.

A mistura mais utilizada é a adição de 25% de CO_2 ao argônio (gás comercialmente conhecido por C25).

Adições de hélio ao argônio aumentam a penetração em metais não ferrosos com transferência por curto circuito.

Utilizando gases inertes, com valor de corrente levemente maior que a utilizada na transferência por curto circuito, à transferência globular pode ser alcançada mais facilmente que utilizando o CO_2 .

Proteção gasosa por CO_2 resulta em uma transferência globular somente quando a corrente de soldagem e a tensão do arco estão significativamente acima da faixa de curto circuito.

Arcos protegidos somente com hélio ou com CO_2 não formam transferência spray em nenhum nível de corrente.

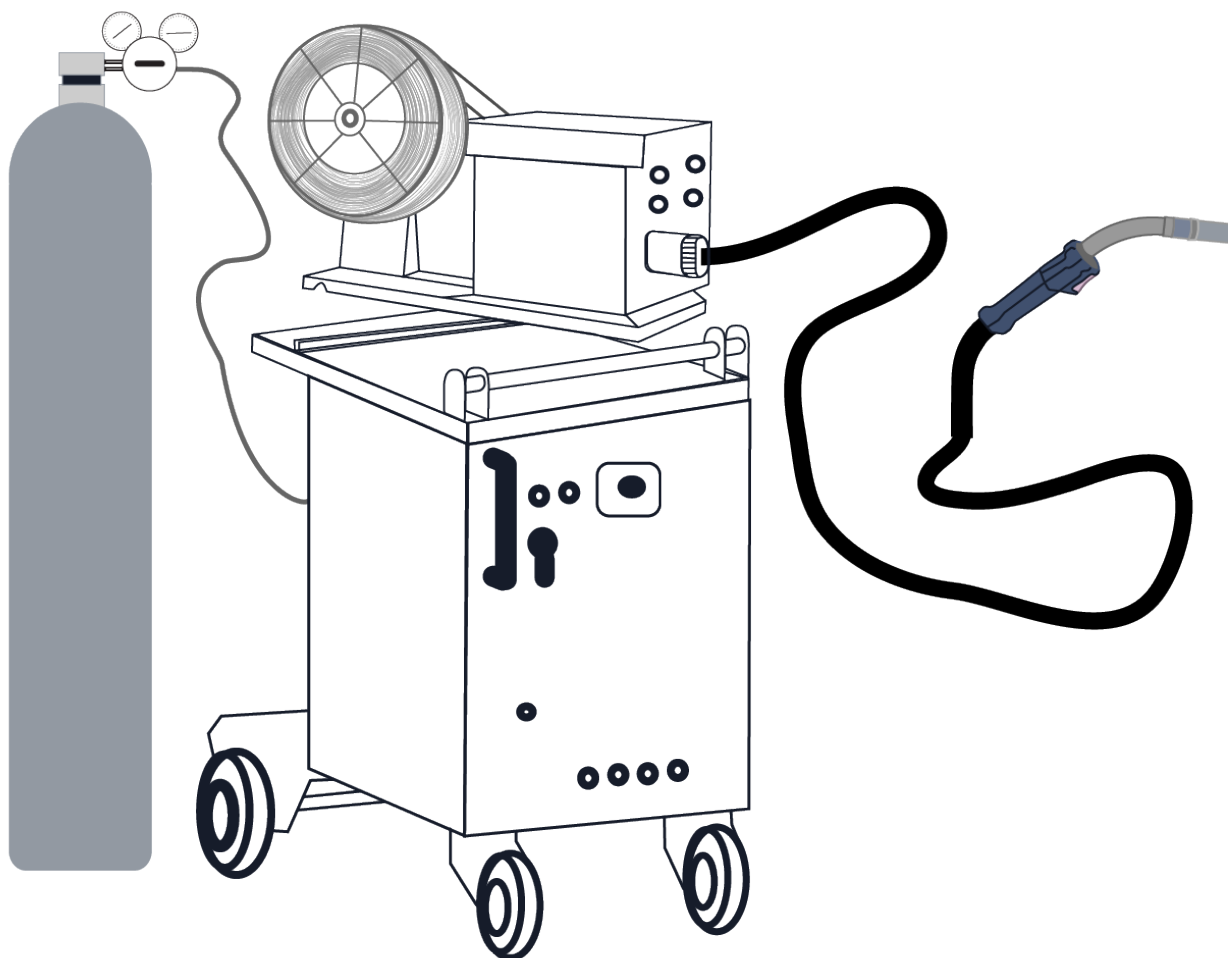
Com proteção por argônio, a transferência spray pode ser utilizada em qualquer tipo de metal e liga devido às características inertes do gás. Entretanto, atenção especial deve ser dada na soldagem de chapas finas devido às altas correntes necessárias para produzir um arco spray.

A adição de oxigênio ao argônio diminui a corrente de transição.

SOLDAGEM COM ARCO TUBULAR – FCAW FLUX CORED ARC WELDING

Características do Processo

Equipamento utilizado nesse processo é o mesmo utilizado no processo GMAW.



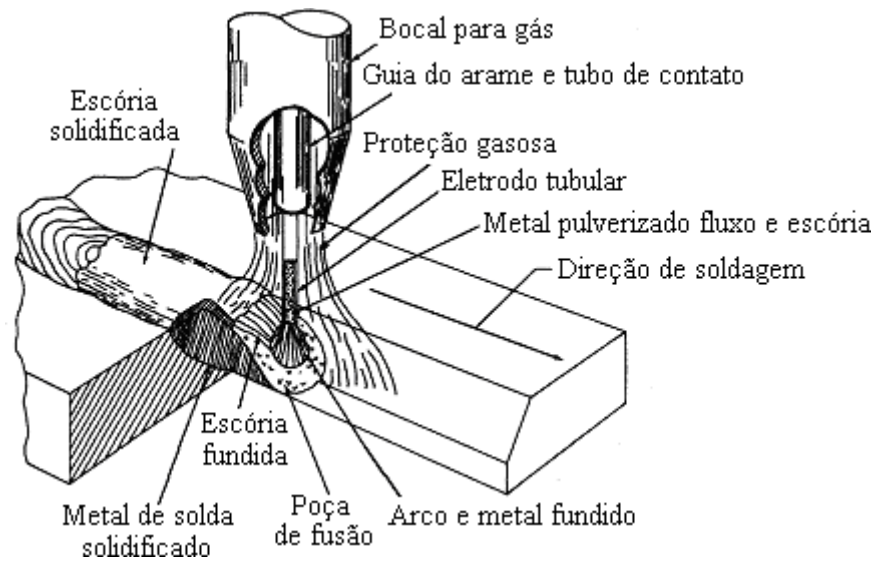
Existem três tipos de arames tubulares disponíveis para o processo:

- arames tubulares com proteção gasosa
- arames tubulares autoprotégido
- arames tubulares do tipo metal cored com proteção gasosa.

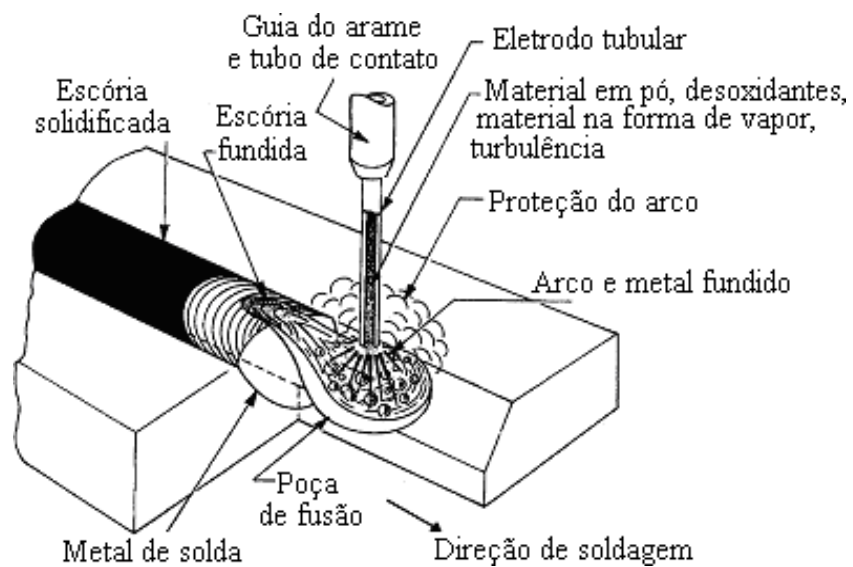
Soldagem com proteção gasosa: utiliza-se um cilindro de gás.

Soldagem com arame autoprotégido: **não** utiliza-se um cilindro de gás.

Soldagem com Proteção Gasosa

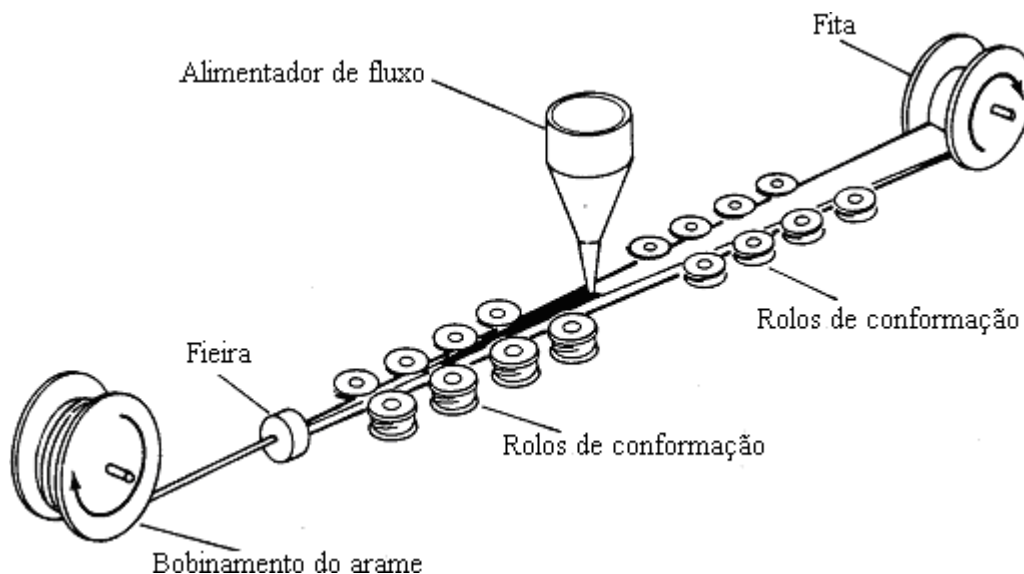


Soldagem com Arame Tubular Autoprottegido

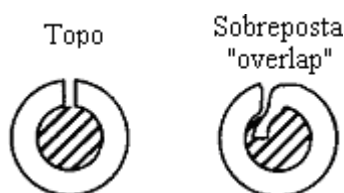


Fabricação dos Arames Tubulares

No processo de fabricação de arames tubulares, uma fita ou fio máquina passa por um conjunto de rolos de conformação até sua seção transversal possuir o perfil "U". A seguir, o fluxo interno é alimentado e outro conjunto de rolos de conformação fecha sua seção. Posteriormente, o arame tem seu diâmetro reduzido até atingir a dimensão desejada. Essa redução pode ser feita pela trefilação utilizando rolos e fieiras.



Os arames tubulares podem ter diferentes tipos de seção. As mais usuais são com fechamento de topo e sobreposto (overlap).



O percentual de fluxo no interior do arame pode variar de 15 a 50% do seu peso. Esse percentual vai depender, entre outros fatores, das funções a serem desempenhadas pelo fluxo.

Arames tubulares auto-protegidos possuem percentuais de fluxo consideravelmente superiores aos que utilizam proteção gasosa.

Com relação à composição do fluxo interno os arames tubulares com proteção gasosa e

auto-protegidos podem ser básicos ou rutilícos.

Os básicos produzem soldas com excelentes propriedades mecânicas e baixos teores de hidrogênio e os rutilícos proporcionam uma soldagem "suave" e um cordão com excelente aspecto visual.

Têm-se ainda os arames tubulares do tipo "metal cored", que possuem alto percentual de pó de ferro em sua composição, proporcionam altas taxas de deposição.

O processo FCAW se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual.

Entre os materiais soldáveis pelo processo FCAW pode-se citar aço carbono e baixa liga, aço cromo-molibdênio; aço ligado ao níquel, aço inoxidável e ligas de níquel.

Em relação ao tipo de gás de proteção utilizado no processo FCAW, os mais usados são o dióxido de carbono e misturas deste com o argônio.

O gás CO_2 é usualmente usado na transferência globular, porém algumas formulações de fluxo produzem transferência spray com o uso desse gás.

Quando o CO_2 é aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico, dissocia-se formando monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O_2).

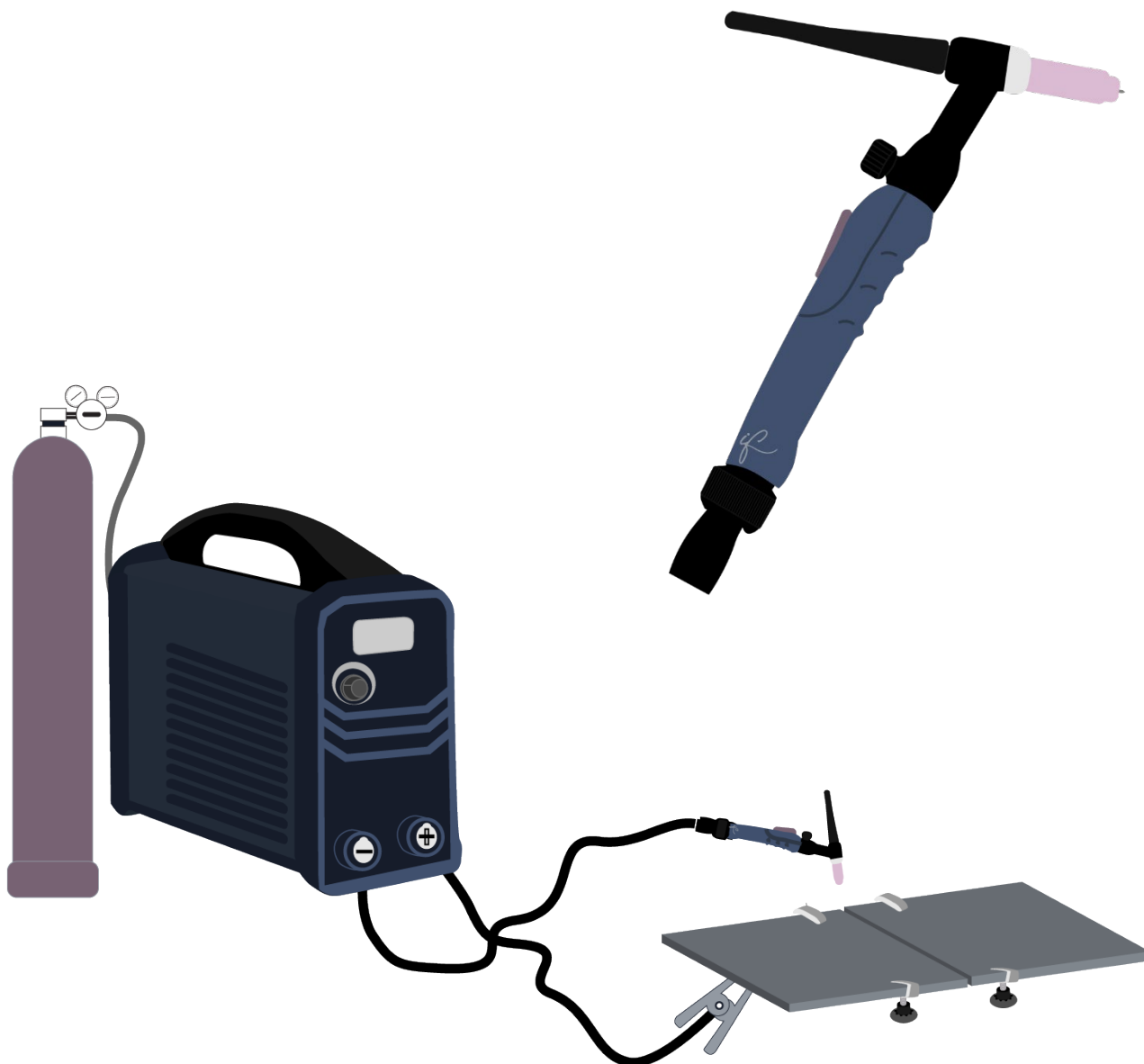
O oxigênio proveniente dessa dissociação reage com os elementos do metal de base formando óxidos.

Normalmente, a temperatura de fusão dos óxidos formados é maior que a temperatura de fusão do metal de base, necessitando de mais energia para fundí-los e esse fato impede o tipo de transferência spray. Entretanto, materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo dos arames tubulares para compensar os efeitos oxidantes do CO_2 , propiciando a transferência spray.

Uma das misturas mais usada no processo FCAW é 75% de Argônio e 25% de CO_2 (C25).

O metal de solda depositado com essa mistura tem alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com o metal depositado com 100% de proteção com CO_2 .

SOLDAGEM COM ELETRODO DE TUNGSTÊNIO – GTAW GAS METAL ARC WELDING



Características do Processo

Trata-se de um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio (W) e a poça de soldagem.

A proteção, tanto do arco quanto da poça e do eletrodo, se faz por gás inerte, argônio ou hélio.

A tocha de soldagem TIG é refrigerada a gás ou a água (mais utilizada).

O eletrodo utilizado no processo TIG pode ser de tungstênio puro ou ligado.

O mais utilizado é o eletrodo de tungstênio com adição de óxido de tório.

O nível e tipo de corrente utilizada no processo é função direta do diâmetro e composição química do eletrodo.

Os eletrodos de tungstênio puro possuem, no mínimo, 99,5 % de tungstênio e são extremamente utilizados na soldagem com corrente alternada, pois mantém a extremidade da ponta do eletrodo limpa e arredondada, resultando em boa estabilidade do arco elétrico.

Os eletrodos de tungstênio com óxido de tório, permitindo a operação em correntes mais elevadas (aproximadamente 20 %) que os eletrodos de tungstênio puro. A tória aumenta a emissividade termiônica do tungstênio. Por outro lado, na soldagem CA tornam-se deficientes, pois tem dificuldade de manter a extremidade arredondada.

O processo pode ser utilizando com ou sem material de adição (autógeno).

Permite um controle independente da fonte de calor e do material de adição.

Pode ser usado em quase todos os metais, inclusive em metais dissimilares.

Permite um controle preciso das variáveis da soldagem.

Pode produzir excelentes soldas autógenas (sem adição) a altas velocidades.

Está livre dos respingos que ocorrem em outros processos a arco com eletrodo consumível.

Permite excelente controle na penetração de passes de raiz.

Utiliza-se de fontes de energia de baixo custo.

Apresenta baixa taxa de deposição e baixo rendimento térmico.

Há necessidade de maior destreza e coordenação do operador em relação ao SMAW e GMAW.

É menos econômico que os processos de eletrodos consumíveis para espessuras acima de 10 mm.

Há dificuldade de manter a proteção em certos ambientes.

Pode haver inclusões de Tungstênio.

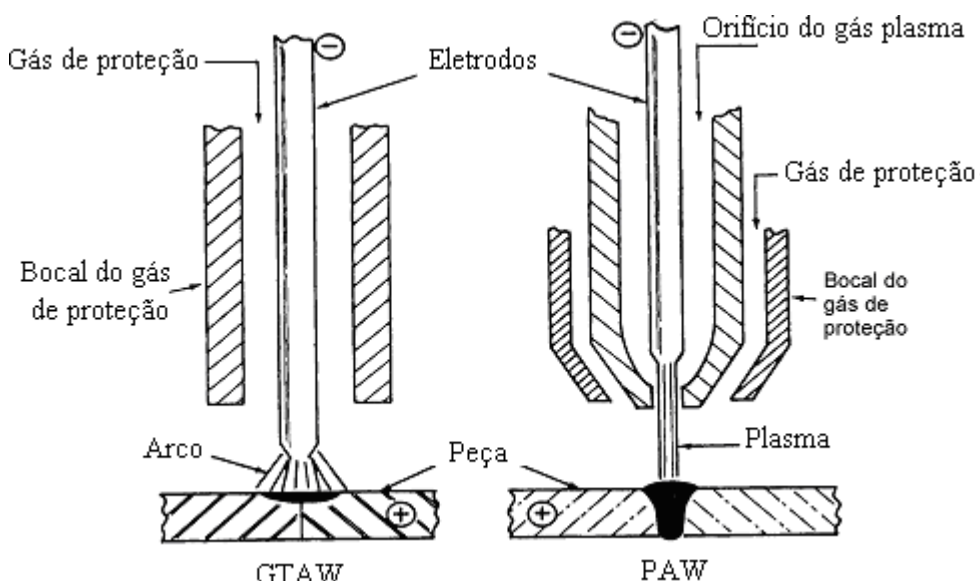
Pode haver contaminação da solda se o metal de adição não for adequadamente protegido.

Há baixa tolerância a contaminantes no material de base ou adição.

SOLDAGEM A ARCO PLASMA – PAW

PLASMA ARC WELDING

O processo PAW é basicamente uma extensão do processo GTAW. Entretanto, possui uma densidade de energia muito mais alta e a velocidade do gás é também bem mais alta, em virtude do plasma ser forçado a passar por um bocal de constrição.



A constrição do arco produz altas densidades de energia. O arco elétrico é bastante estável. O calor aplicado ao material de base é bastante concentrado. O cordão de solda é pouco afetado pela distância da tocha de soldagem em relação à peça.

A tocha PAW tem uma câmara de gás ao redor do eletrodo (gás de orifício). O arco aquece o gás na câmara até uma temperatura em que se torna ionizado e conduz eletricidade. Esse gás ionizado é definido como o Plasma, que sai do orifício do bocal a uma temperatura próxima de 17.000°C.

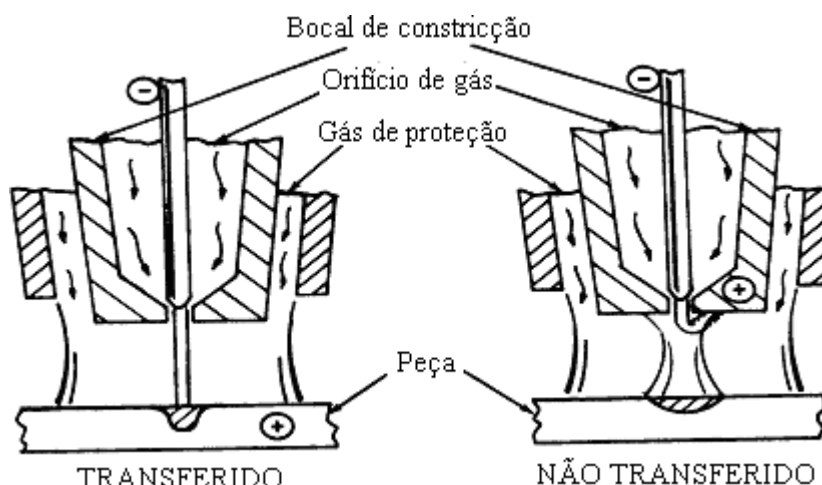
Na maioria das aplicações, um gás auxiliar de proteção é fornecido no bocal externo, semelhante ao GTAW. O objetivo do gás de proteção é isolar a área do arco na peça de trabalho e evitar a contaminação da poça de fusão.

O gás de proteção e o gás de orifício podem ser o mesmo. Pode-se utilizar um gás inerte puro ou uma mistura de gases inertes. Os mais utilizados são argônio, hélio, mistura de argônio/hélio e mistura de argônio/hidrogênio.

Como o jato de gás é muito potente, pode causar turbulência na poça de fusão, as taxas de escoamento de gás de orifício variam de 0,25 até 5 L/min. Os gases de proteção escoam a taxas variando de 10 a 30 L/min.

O processo PAW pode ser empregado na maioria dos metais e em todas as posições. Ele fornece um melhor controle direcional do arco e menores zonas termicamente afetadas, se

comparado com o processo GTAW. O maior problema é o custo relativamente alto dos equipamentos e um treinamento mais consistente do operador.



Para realização da solda com o processo PAW são utilizadas duas formas de arco: o transferido e o não transferido.

Arco Transferido: o arco elétrico é estabelecido entre o eletrodo e material de base. O arco transferido produz um aquecimento entre o ânodo e o fluxo de plasma. Esse modo é utilizado para a soldagem propriamente dita, devido à maior energia transferida para a peça.

Arco não Transferido: o arco elétrico é estabelecido e mantido entre o eletrodo e o bocal de constrição. Esse modo é mais utilizado nos processos de corte e na união de peças de material não condutor ou para aplicações onde se deseja baixa concentração de energia.

Os principais parâmetros do processo PAW são corrente do plasma, diâmetro e forma do orifício, tipo de gás de orifício, taxa de escoamento do gás de orifício e tipo de gás de proteção.

A diferença entre o processo de soldagem e corte com plasma depende das combinações dos 5 fatores citados acima, que podem ser ajustados para obter energias termicamente muito altas ou muito pequenas.

Para o processo de corte, serão necessários: altas concentrações de energia e velocidade do jato de plasma, conseqüentemente serão preciso, alta corrente, diâmetro de orifício pequeno e alta taxa de escoamento de gás de orifício. Já para o processo de soldagem, é preciso um jato de plasma de baixa velocidade, ou seja, orifício maior, baixas correntes do arco e taxas de escoamento dos gases menores.

SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

“O princípio básico dos processos de soldagem por resistência elétrica consiste na passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos (não consumíveis) que comprimem peças distintas (topo a topo ou sobrepostas)”.



Fusão + Pressão

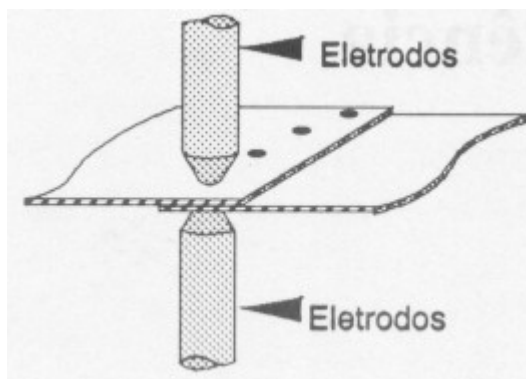
Para soldar uma peça com esse processo, é necessário verificar 3 fatores:

- aquecimento (Efeito Joule);
- tempo;
- força (pressão).

As peças a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra, por meio de eletrodos não consumíveis, fazendo passar através dos eletrodos uma alta corrente. Essa ocasiona, segundo a Lei de Joule ($Q_J = R I^2$), uma quantidade de calor proporcional à resistência elétrica, à intensidade de corrente e ao tempo, que deverá ser suficiente para permitir que a região de contato entre as peças a serem soldadas atinja o ponto de fusão (circuito percorrido pela corrente de soldagem).

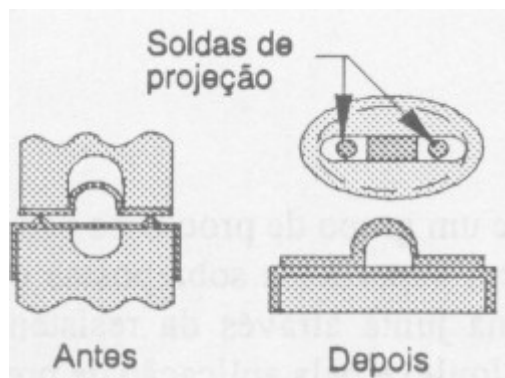
Processos de Soldagem por Resistência Elétrica

Soldagem por pontos: a solda é obtida na região das peças que é colocada entre um par de eletrodos e vários pontos de solda podem ser obtidos simultaneamente pela utilização de vários pares de eletrodos.

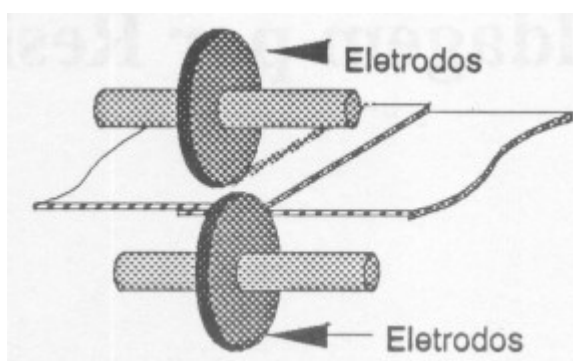


Soldagem por projeção: processo similar ao anterior, sendo que a soldagem ocorre em um

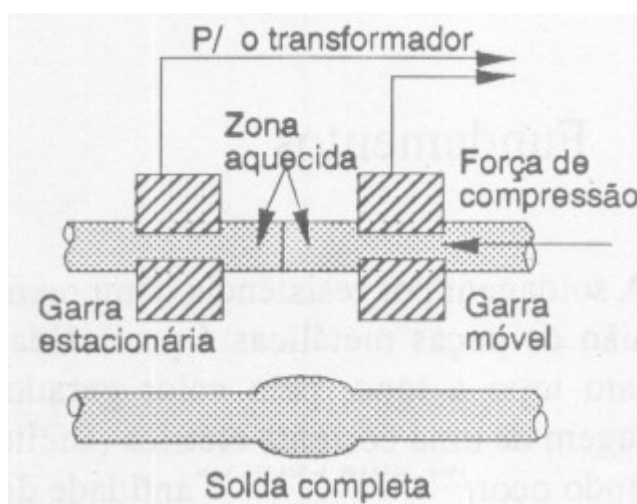
local determinado por uma projeção ou saliência em uma das peças. Duas ou mais pontos de solda podem ser obtidas com um único par de eletrodos.



Soldagem por costura: uma série de pontos de solda consecutivos é realizada de modo a produzir uma solda contínua, por sobreposição parcial dos diversos pontos. Normalmente, um ou ambos os eletrodos são discos ou rodas, que giram enquanto as peças a serem unidas passam entre eles.

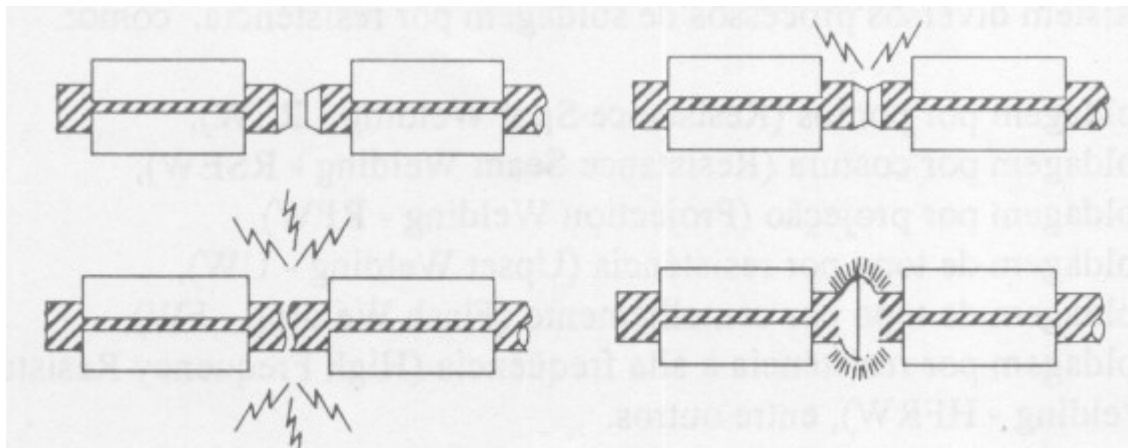


Soldagem de topo por resistência: a corrente elétrica passa através das peças que são pressionadas frente a frente.

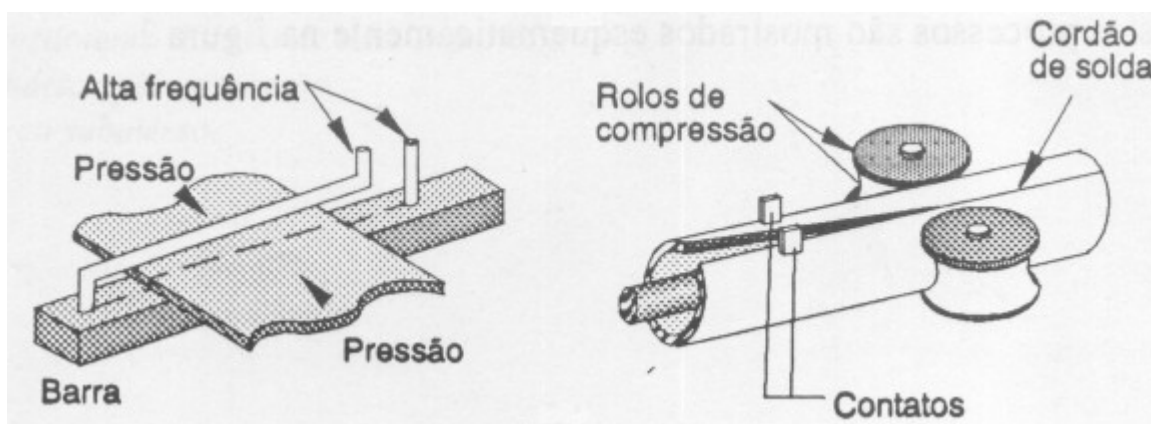


Soldagem por centelhamento: as peças são energizadas antes de entrarem em contato e

suas faces são aproximadas até que o contato ocorra em pontos discretos da superfície da junta, gerando centelhamento. Tanto nesse processo quanto no anterior, existe um estágio final, quando as faces suficientemente aquecidas são fortemente pressionadas uma contra a outra, sofrendo uma considerável deformação plástica que consolida a união.

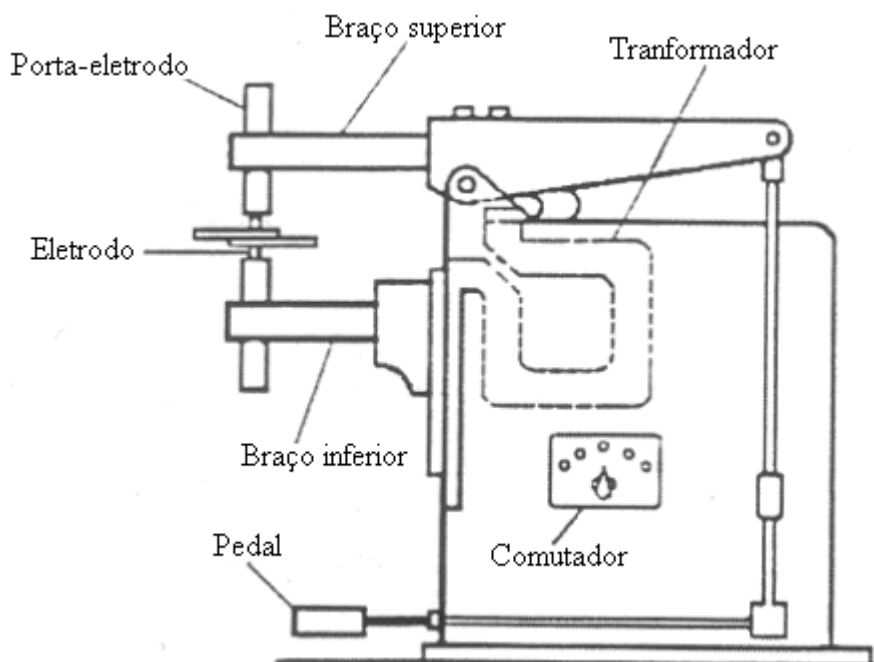


Soldagem por alta frequência: a solda é obtida pelo calor gerado pela resistência à passagem de uma corrente elétrica alternada de alta frequência e pela aplicação rápida de pressão.



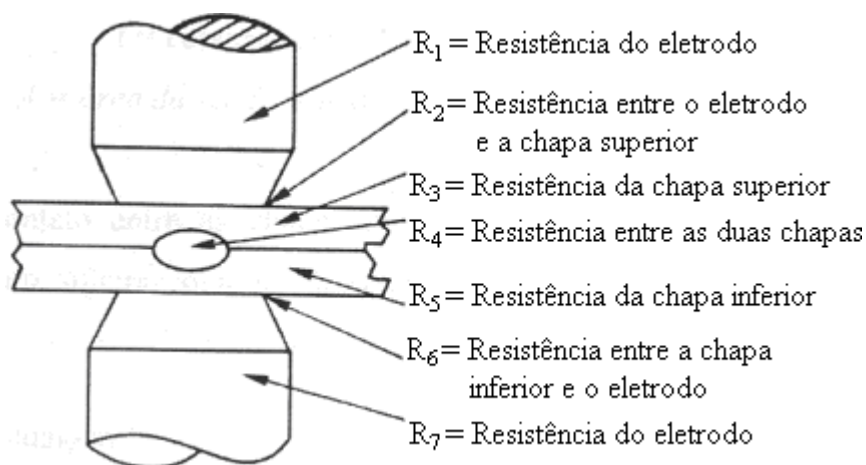
Em todos os processos de soldagem por resistência elétrica envolvem a aplicação coordenada de pressão mecânica e passagem de corrente elétrica, com intensidade e duração controlada.

SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR PONTOS



Para efetuar uma boa solda é necessário que as peças façam um bom contato metal - metal. Todos os elementos (peças e eletrodos) devem ser concebidos de tal maneira que permitam a corrente de soldagem chegar ao ponto desejado pelo caminho mais curto.

Resistências equivalentes ao circuito de solda a ponto



$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7$$

As resistências elétricas dos eletrodos (R_1 e R_7) são as mais baixas, pois esses eletrodos são fabricados com ligas metálicas de alta condutividade elétrica e térmica, portanto, pode ser desprezada para efeito de cálculo da resistência equivalente.

As resistências de contato entre eletrodos/peças (R_2 e R_6) têm uma influência considerável

e devem ser minimizadas ao máximo: limpeza adequada das superfícies e um perfeito contato entre eletrodo/peça.

As resistências dos metais de base (R_3 e R_5) são função de suas resistividades elétricas, podendo ser calculadas por:

$$R_{2-6} = \rho \frac{L}{A}$$

- R: resistência do metal base (Ω);
 ρ : resistividade elétrica do metal base ($\Omega.m$);
L: comprimento do condutor (m);
A: área da seção transversal do metal base (m^2).

A resistência de contato entre as chapas do metal base (R_4) é devido à aspereza das superfícies em contato, sujeiras, óleos, graxas e outros.

ELETRODOS

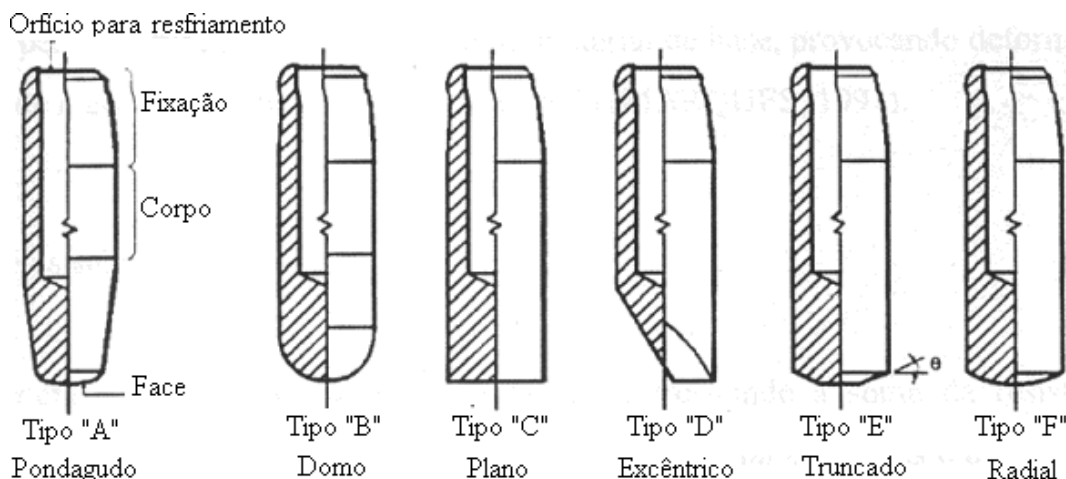
Na soldagem por resistência elétrica por ponto, os eletrodos têm a função de conduzir a corrente de soldagem até o ponto que será soldado, aplicar a força necessária para unir as peças e dissipar parte do calor gerado durante o processo. Por esses motivos, os eletrodos devem ser projetados para resistir às altas densidades de corrente e alta pressão, sem alterar suas propriedades físicas, metalúrgicas, elétricas e mecânicas. Portanto, devem possuir:

- condutibilidade elétrica e térmica elevadas;
- resistência de contato baixa;
- resistência mecânica elevada a altas temperaturas: alto ponto de amolecimento - temperatura na qual há um período de tempo determinado, o material perde grande parte de sua dureza;
- fraca tendência para formar ligas com o material de base;
- resfriamento absolutamente seguro das pontas dos eletrodos;
- grande resistência à compressão e boa resistência ao atrito.

Materiais dos eletrodos

- Cobre – Cromo
- Cobre - Cromo – Zircônio
- Cobre – Cádmio
- Cobre – Berílio

A geometria dos eletrodos também tem grande influência na qualidade da solda e deve ser otimizada em função do tipo de material a ser soldado e em qual posição a soldagem será realizada.



PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Os parâmetros mais importantes na soldagem por resistência elétrica por ponto são a corrente de soldagem, a resistência elétrica do circuito, o tempo e a força aplicada pelos eletrodos juntamente com sua geometria, preparação e tipo de material. Também devem ser consideradas as propriedades do material de base.

Corrente de soldagem

É a variável de maior efeito na geração do calor, visto que está elevada ao quadrado na equação de Joule. Pode ser alternada ou contínua.

Resistência elétrica do circuito

Corresponde à soma de todas as resistências envolvidas no circuito de soldagem.

Dentre as resistências envolvidas, a que tem grande relevância é a resistência de contato entre as peças, pois é onde se formará o ponto. Essa resistência pode e deve ser controlada pela condição superficial das peças a serem unidas e pela força aplicada pelos eletrodos.

Tempo de soldagem

A quantidade de calor gerado na junta é diretamente proporcional ao tempo de passagem da corrente elétrica. Portanto, esse tempo deve ser otimizado em função dos demais parâmetros de soldagem.

Força

A força aplicada pelos eletrodos não influencia diretamente na quantidade de calor gerada no processo, mas indiretamente, devido ao seu efeito na resistência de contato entre as peças.

Geometria dos eletrodos

Os eletrodos na soldagem por resistência elétrica por ponto estão sujeitos a grandes tensões mecânicas e elevadas temperaturas. Por isso, o desgaste na ponta do eletrodo é inevitável alterando sua geometria. Como a área da ponta do eletrodo influi na densidade de corrente, a geometria dos eletrodos deve ser controlada para evitar alterações no fluxo de corrente.

Metal de base

O metal de base influencia na soldagem por resistência elétrica por pontos por sua espessura, condição superficial, encruamento, condutividade térmica e elétrica e composição química.

A espessura do material influencia na formação do ponto de solda, tanto na geração como na dissipação de calor. Quanto maior a espessura, mais elevado deve ser o nível da corrente e do tempo de soldagem e menor será a influência dos eletrodos na taxa de resfriamento da solda. Na soldagem de chapas finas, deve-se utilizar um menor nível de corrente e um baixo tempo de soldagem e é forte a influência dos eletrodos na taxa de resfriamento da solda.

A condição superficial das peças tem influência na geração de calor porque a resistência de contato é afetada pela irregularidade das superfícies, presença de óxidos, sujeiras, óleo e outros materiais estranhos.

O material com taxa de encruamento elevado, em geral, apresenta alta resistividade, portanto, maior aquecimento.

A condutividade térmica e elétrica do material devem ser baixa.

A composição química do metal de base influencia na geração de calor, devido ao aumento dos elementos de liga, pois, normalmente, quanto maior o número de elementos de liga, maior a resistividade e conseqüentemente maior o aquecimento por efeito Joule.

QUALIDADE DA SOLDA

Uma solda a ponto de boa qualidade deve apresentar as seguintes características:

- boa aparência superficial;
- dimensões apropriadas;
- boa resistência mecânica;
- boa ductilidade;
- ausência de descontinuidade.

Os fatores que influenciam diretamente na qualidade da solda são:

- espaçamento entre eletrodos;
- condições dos materiais;
- uniformidade dos pontos de solda;
- rebarbas e ondulações;

- aquecimento;
- tempo;
- pressão;
- resistência mecânica.

Ensaios para qualificar pontos de solda

Os ensaios podem ser metalográficos ou mecânicos.

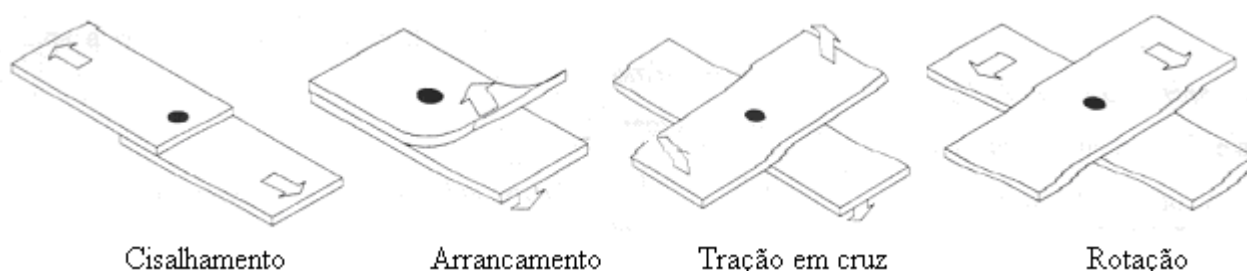
Os exames metalográficos fornecem dados qualitativos e quantitativos sobre a estrutura e a microestrutura do material.

Os exames mecânicos são classificados como destrutivos e não destrutivos.

A inspeção visual é um dos ensaios não-destrutivo mais utilizados na prática. Além desse, existe o teste por inspeção ultra-sônico e o teste da resistividade.

Os testes mecânicos destrutivos são extremamente utilizados e consistem em submeter o ponto de solda a um esforço mecânico até romper ou destruir a junta soldada por cisalhamento, arrancamento, tração em cruz e rotação.

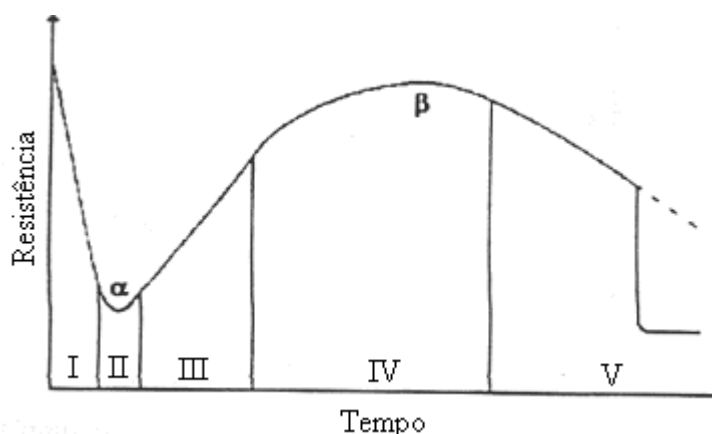
Tipos de ensaios destrutivos para verificar a qualidade da solda a ponto



Dos testes apresentados acima, no meio industrial, a qualidade do ponto de solda é normalmente avaliada em função do teste de arrancamento, o qual fornece o diâmetro do ponto de solda e o tipo de fratura. Se no resultado ocorrer ruptura do tipo botão (rompimento fora do ponto de solda), a solda é aprovada. Por outro lado, se a ruptura for do tipo interfacial (rompimento parcial ou total no ponto de solda), a solda é rejeitada.

Outro método utilizado para avaliar a qualidade da solda a ponto consiste na monitoração da resistência dinâmica desenvolvida durante o processo. Conhecendo a variação instantânea da tensão e da corrente de soldagem (que podem ser monitoradas por um sistema de aquisição de dados) e dividindo um valor pelo outro, encontra-se a curva da resistência dinâmica do processo.

Representação da curva de resistência dinâmica



A variação dessa curva no tempo apresenta características que podem ser relacionadas com a formação do ponto.

Trecho I - Representa uma queda de resistência dinâmica. A resistência inicial é alta, devido à presença de impurezas na superfície dos metais como óxidos, graxas e óleos que são maus condutores de corrente e devido ao pequeno contato entre as partes por causa das micro-irregularidades superficiais. Com o passar do tempo, a temperatura aumenta, provocando a fusão dos óxidos e queima das graxas e óleos e, ao mesmo tempo, o amolecimento das rugosidades, aumentando a área de contato, facilitando o fluxo de corrente e diminuindo a resistência dinâmica.

Trecho II - Caracterizado por dois momentos distintos. No primeiro, diminuição da resistência dinâmica devido à diminuição da resistência de contato entre as peças, causada pelo amolecimento das últimas rugosidades e aumento da área de fluxo de corrente. No segundo, aumento da resistência dinâmica do material, devido ao aumento da temperatura, que por sua vez, causa um aumento da resistividade e diminuição da condutividade. Este trecho apresenta um ponto de inflexão (ponto α), onde no primeiro momento é dominante a curva decrescente e num segundo, a curva crescente.

Trecho III - Aumento da resistência dinâmica do material, pois a resistividade do material aumenta com o aumento da temperatura. No final desta fase dá-se o início da formação do ponto de solda.

Trecho IV - Caracterizado por dois momentos: no primeiro, o aumento da resistência com o aumento da resistividade elétrica do material, devido ao aumento da temperatura; e no segundo momento, diminuição da resistência pelo encurtamento da distância entre os eletrodos, causada pela deformação do material de base com a penetração do eletrodo na superfície do metal e pelo gradativo desaparecimento da interface peça/peça com o crescimento do ponto de solda. Este trecho apresenta um ponto de deflexão (ponto β).

Trecho V - Diminuição da resistência dinâmica devido ao desaparecimento por completo da interface peça/peça, no local do ponto de solda, e crescimento do ponto até atingir seu diâmetro máximo, onde o material fundido fica retido dentro de uma região conhecida como coroa, formando um "selo".

VANTAGENS DA SOLDA A PONTO

- Adaptabilidade para automação em montagens de chapas em linhas de fabricação (robotização)
- Alta velocidade
- Econômico
- Precisão dimensional

LIMITAÇÕES DA SOLDA A PONTO

- Dificuldade para manutenção e reparo
- Geralmente o equipamento é mais caro que o para soldagem a arco
- Demanda mais energia da rede elétrica
- Baixa resistência à tração e a fadiga
- Cada ponto é um ponto!

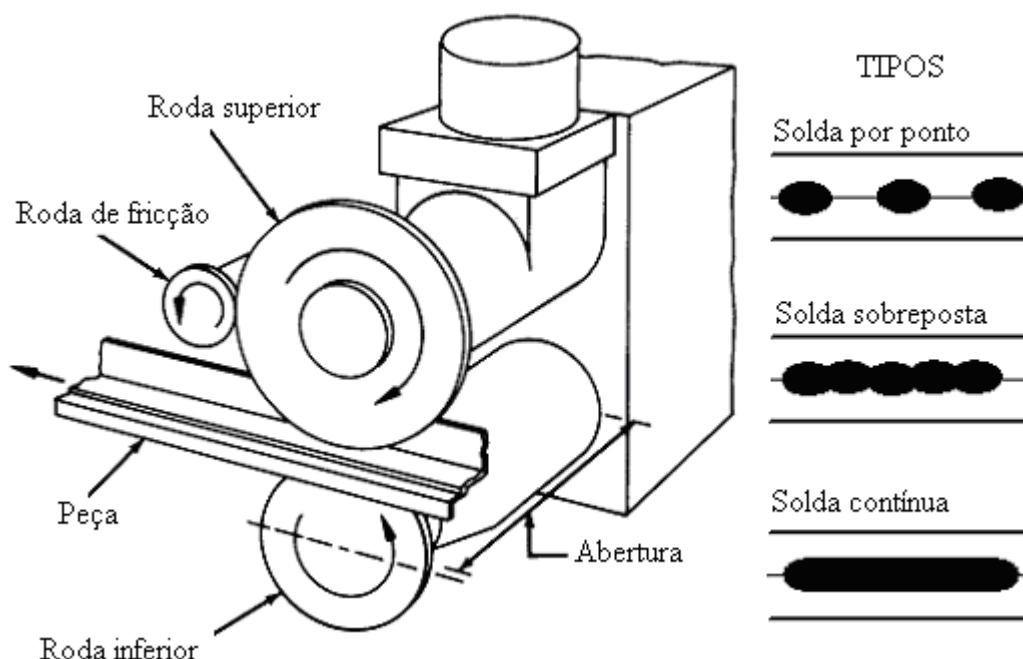
APLICAÇÕES DA SOLDA A PONTO

- Aço, incluindo aço galvanizado
- Ligas de zinco
- Ligas de cobre
- Ligas de alumínio

Só é possível soldar materiais dissimilares desde que sejam susceptíveis a formar uma liga ou quando se introduz entre eles um material intermediário que pode ligar-se aos metais base.

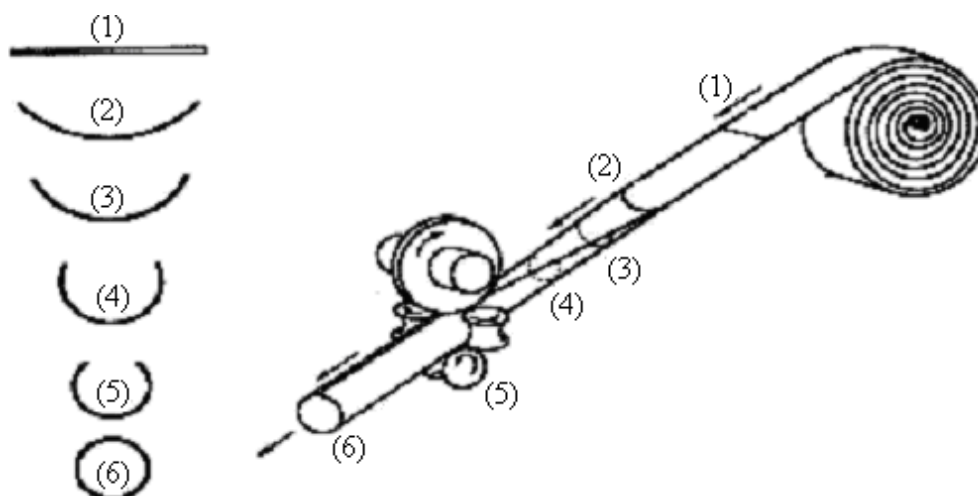
Ferrugem, verniz, óleo, graxa e gordura prejudicam a qualidade da soldagem a ponto.

SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR COSTURA



Neste método, eletrodos em forma de discos (não-consumíveis) transmitem corrente e pressionam as peças a serem soldadas. Os discos giram enquanto as peças a serem soldadas passam entre eles. Geralmente são realizadas juntas contínuas, através da sobreposição parcial de diversos pontos das soldas, mas a mesma também pode ser realizada por pontos isolados. Apesar de ser possível produzir soldas contínuas pelo método de soldagem por pontos (sobrepondo-os), a operação não é prática.

Soldagem de tubos com costura



SOLDAGEM E CORTE A GÁS

PROCESSO DE SOLDAGEM COM CHAMA OXÍ-GÁS OXI-FUEL WELDING - OFW



Trata-se de um processo de soldagem por fusão



Difusão ocorre na fase líquida



A energia (calor) é aplicada com o objetivo de fundir os materiais envolvidos



Trata-se de uma soldagem termoquímica



O calor responsável pela fusão dos materiais é gerado por reações químicas

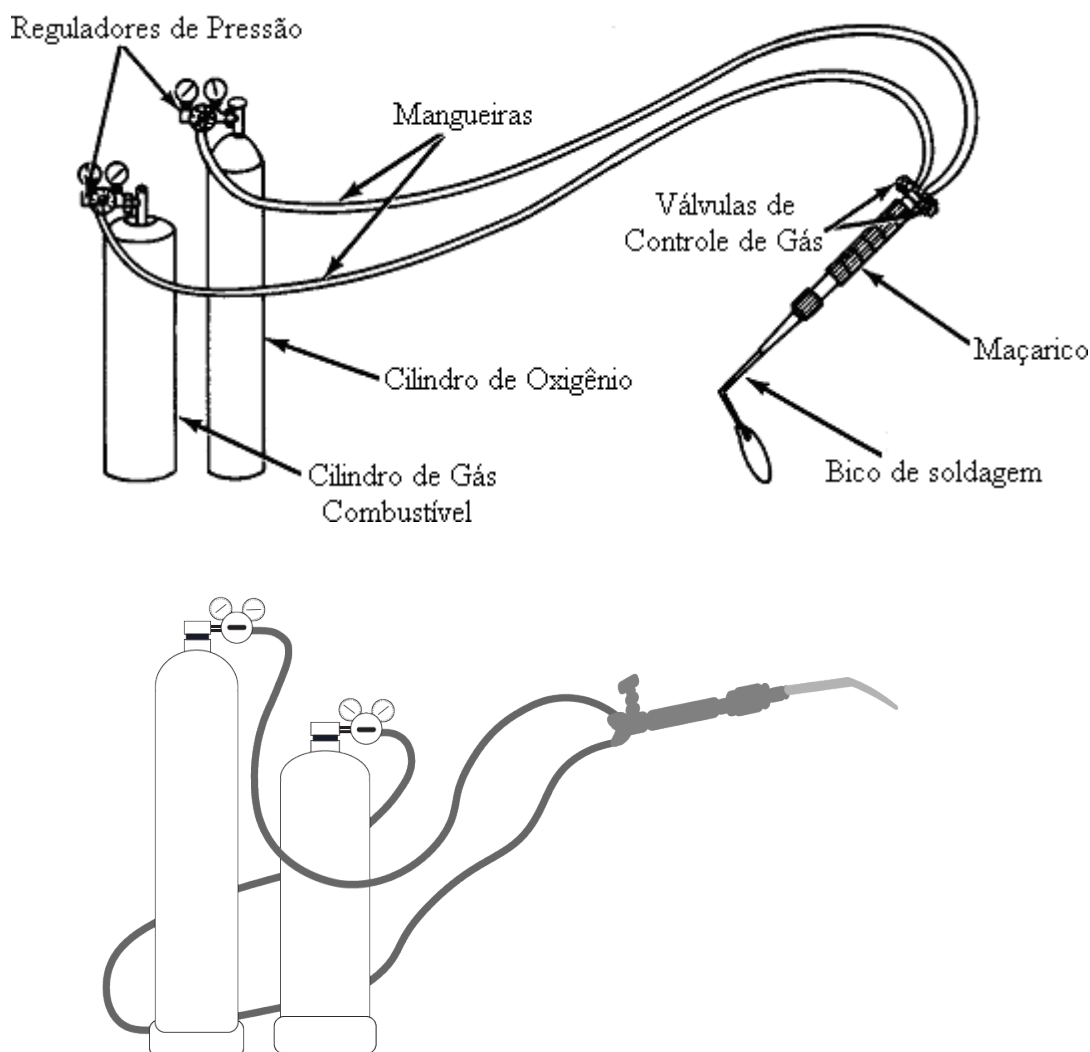


“A soldagem oxi-gás inclui qualquer operação que usa
a combustão do oxigênio com um gás combustível
como meio de calor para fundir os materiais envolvidos”

Vantagens do processo: equipamento de baixo custo, portátil e bastante versátil, apresenta uma variedade de acessórios para aplicações especiais que aumenta a versatilidade do processo.

Desvantagens do processo: a operação de soldagem é inteiramente dependente da habilidade do soldador; o processo é normalmente limitado às operações leves; utiliza-se gases a altas pressões que, sob certas condições, podem causar explosões dos cilindros.

EQUIPAMENTO PARA A SOLDAGEM OXI-GÁS



Reguladores de pressão

Aparelhos mecânicos que tem como função manter a pressão de saída do gás constante e baixa independente de mudanças na pressão da linha.

Podem ser de um ou dois estágios, dependendo se a pressão é reduzida em um ou dois passos.

Equipados com dois manômetros, um indicando a pressão de admissão ou do cilindro e outro indicando a pressão de descarga ou do maçarico.

Existe um regulador para cada cilindro.

As conexões de admissão e descarga dos reguladores são de diferentes tamanhos e formas para impedir que um regulador seja conectado no cilindro errado.

Mangueiras

São flexíveis.

Resistem a altas pressões e moderadas temperaturas.

Mangueiras de oxigênio são verdes e as conexões têm porcas planas com rosca direita.

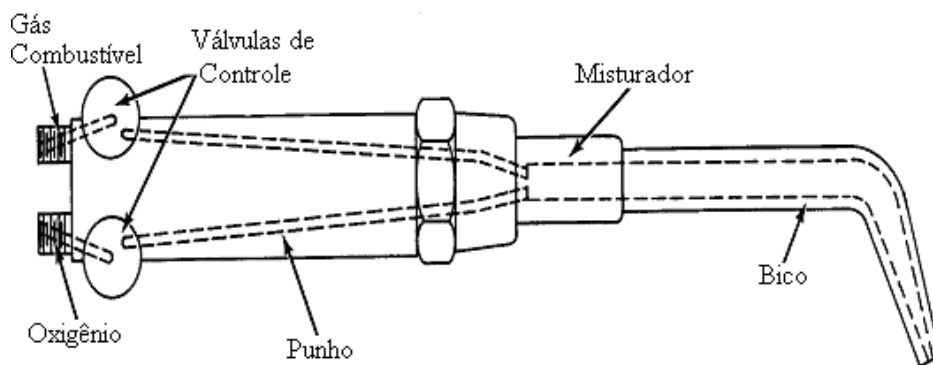
Mangueiras de gás combustível são vermelhas e as conexões têm porcas chanfradas com rosca esquerda.

Maçarico

Consistem de um punho, um misturador e um bico.

Apresenta um controle independente do fluxo de cada gás.

Ao maçarico é possível conectar uma variedade de bicos.



Punho e bicos (acessórios)

Bico de Soldagem



Bico de Aquecimento



Acessório de Corte



Punho



Misturadores de pressão positiva (ou média pressão)

Como o próprio nome indica trabalha com pressões médias.

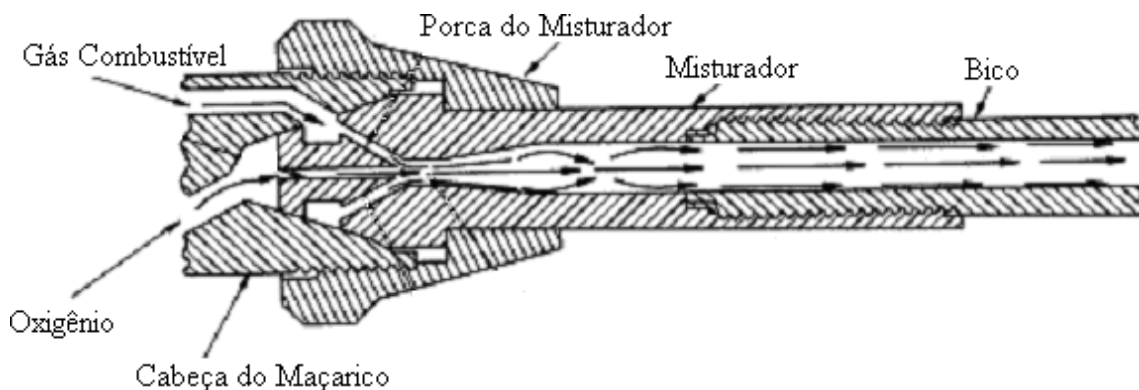
O oxigênio entra por um canal central e o gás combustível por canais angulares.
A mistura se processa no interior do misturador.



Misturadores injetores

Função: aumentar a pressão efetiva dos gases.

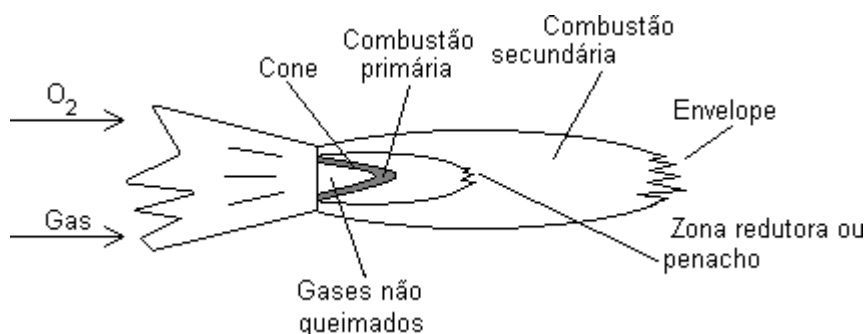
O oxigênio a alta pressão passa através de um pequeno canal central criando um jato de alta velocidade. Essa ação produz uma queda de pressão nas aberturas do gás combustível, fazendo com que a baixa pressão do fluxo do gás aumente com a passagem dos gases pela porção mais larga do venturi.



Gases Combustíveis

Requer sempre oxigênio para sustentar a combustão.

Características dos gases combustão



Razão de combustão: indica o volume de oxigênio necessário para causar a combustão (valor teórico, pois parte da chama produzida utiliza o oxigênio do ar).

Calor de combustão: quantidade total de calor gerada pela reação de combustão (soma dos calores gerados nas reações primárias e secundárias).

Temperatura da chama: depende da proporção oxigênio na mistura e refere-se normalmente a temperatura da chama primária.

Velocidade de combustão: velocidade com que a chama se desloca através do gás adjacente não queimado (taxa de propagação da chama).

Intensidade de combustão: é o produto entre a velocidade de combustão da chama e o calor de combustão da mistura.

Propriedades de um gás combustível para ser conveniente à soldagem

- Alta temperatura de chama
- Alta taxa de propagação de chama
- Conteúdo de calor suficiente
- Mínimo de reação química da chama com os metais base e de adição

Critério para avaliar a efetividade de um gás combustível para a soldagem



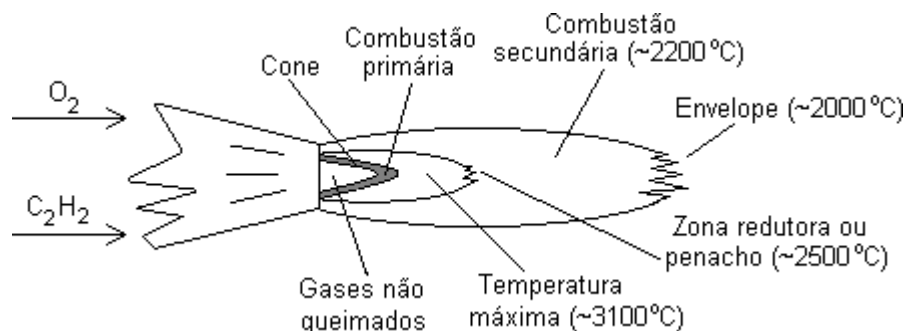
Temperatura da chama + Intensidade de combustão

- Velocidade de combustão da chama
- Calor de combustão do gás

Características dos gases mais utilizados

Gás	Fórmula	Tchama (°C)	Calor de Combustão		
			1 ^a	2 ^a	total
			MJ/m ³	MJ/m ³	MJ/ m ³
Acetileno	C ₂ H ₂	3087	19	36	55
Propano	C ₃ H ₈	2526	10	94	104
Metil Acetileno Propadieno (MPS)	C ₃ H ₄	2927	21	70	91
Propileno	C ₃ H ₆	2900	16	73	89
Metano	CH ₄	2538	0,4	37	37
Hidrogênio	H ₂	2660	-	-	12

CHAMA OXIACETILÊNICA NEUTRA

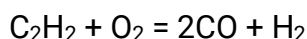


Cone

- Base da chama.
- Gases são aquecidos até a temperatura de inflamação (300 a 380 °C).
- Região de cor azul claro.
- Não há combustão da mistura.

Combustão primária

- Ocorre numa fina camada que envolve o cone.
- *Reação primária*: um volume de acetileno e um volume de oxigênio reagem para formar dois volumes de monóxido de carbono e um volume de hidrogênio.



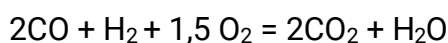
- Essa chama, relativamente pequena, gera a intensidade de combustão necessária para a soldagem.

Zona redutora ou região redutora

- Onde os produtos da combustão primária se aglomeram.
- Região de cor verde claro.
- Essa parte da chama mantém o mais íntimo contato com o metal de solda e determina, sob o ponto de vista metalúrgico suas características.

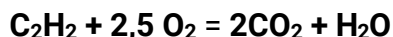
Combustão secundária e envelope

- *Reação secundária*: o monóxido de carbono e o hidrogênio, produzidos na reação primária, queimam com o oxigênio do ar da vizinhança, formando dióxido de carbono e vapor d'água.



- O calor de combustão da chama externa é maior que da chama interna, porém, a intensidade de combustão e a temperatura da chama são mais baixas (área da chama externa é maior).
-

COMBUSTÃO COMPLETA DO ACETILENO



CLASSIFICAÇÃO DAS CHAMAS OXIACETILÊNICAS EM FUNÇÃO DA RAZÃO OXIGÊNIO/ACETILENO

Acetilênica: combustão do acetileno puro reagindo com ar, sem interesse para a soldagem; chama amarela perto do bico, tendendo para o laranja avermelhado, conforme se afasta do mesmo; produz grande volume de picumã.

Carburizante: combustão do acetileno com pouca quantidade de oxigênio; o penacho se contrai em direção ao bico (região brilhante) e permanece distinta no interior de um envelope azul; possui baixa temperatura; grande aplicação na soldagem de chumbo, na brasagem e na solda branda da prata.

Redutora: combustão do acetileno com uma quantidade maior de oxigênio que a anterior; possui um cone interno brilhante e o penacho verde clara; apresenta temperatura em torno de 3000°C.

Neutra: a razão entre acetileno e oxigênio se aproxima da unidade; penacho sem cor (tende a desaparecer) sendo mantido o cone brilhante e o envelope de azulado à laranja; possui temperaturas superiores à chama redutora.

Oxidante: quantidade de acetileno menor que de oxigênio; cone branco envolvido por uma região laranja tendendo à púrpura; a solda produz fagulhas características, além de óxidos frágeis se formarem na superfície da poça de fusão.

ATENÇÃO “PERIGO”

Reversão de fluxo

Ocorre quando a pressão do acetileno fica maior que a do oxigênio – Cilindro de oxigênio quase vazio.

Resultado: o acetileno entra pela linha de oxigênio, mistura-se com este na mangueira, no regulador ou no cilindro e ao acender o maçarico, sem purgar as mangueiras irá acontecer uma rápida queima da mistura, explodindo tudo, desde o maçarico até o cilindro.

Com o cilindro de oxigênio cheio também pode acontecer reversão de fluxo: válvula aberta e gás residual no regulador

O calor gerado pela alta pressão do oxigênio entra no regulador podendo causar fogo e explosão.

“Purgar o gás das mangueiras antes de acender o maçarico, previne a ocorrência de reversão de fluxo!”

Engolimento de chama

Uma explosão normalmente confinada na cabeça do maçarico e normalmente com som estampido.

Causas:

- bico muito perto da poça;
- conexões frouxas;
- mangueiras vazando;
- pressões incorretas;
- qualquer coisa que cause falta de gás no bico da tocha.

Flashback

Uma explosão que propaga através do maçarico, mangueiras, reguladores, etc.

Tanto a reversão de fluxo quanto o engolimento de chama, quando não controlados podem causar flashback!

O som do flashback é de um assovio.

Para parar o flashback, deve-se fechar o oxigênio. Caso contrário.... CORRA!!!!

Válvulas controladoras de flashback

Essas válvulas eliminam o risco de explosão no regulador e no cilindro. Elas fundem a 104°C e bloqueiam a passagem dos gases.



Acetileno (vermelhas)



Oxigênio (verdes)

CURIOSIDADE

Pesquisa com 620 operadores com 13 anos de experiência:

- 18% oxigênio pode ser utilizado para respirar;
- 16% não sabem que óleo e oxigênio são perigosos;
- 37% não sabem o que são Flashbacks ou engolimento de chama;
- 15% não entendem o porque de purgar as mangueiras;
- 53% não sabem o que é reversão de fluxo;
- 89% não sabem o procedimento correto para acender e interromper a chama;
- 53% não sabem a pressão exata dos gases;
- 75% não sabem o que fazer quando ocorre FLASHBACK.

DICAS DE COMO ACENDER E DESLIGAR O MAÇARICO

Como acender o maçarico:

- verificar se as válvulas dos reguladores de pressão estão fechadas;
- purgar o gás residual das mangueiras abrindo a válvula de controle de gás;
- fechar a válvula de controle de gás;
- abrir a válvula dos reguladores de pressão;
- abrir um “pouquinho” a válvula do gás-oxigênio;
- abrir um “pouco” a válvula do gás-acetileno;
- acender o maçarico;
- regular a chama.

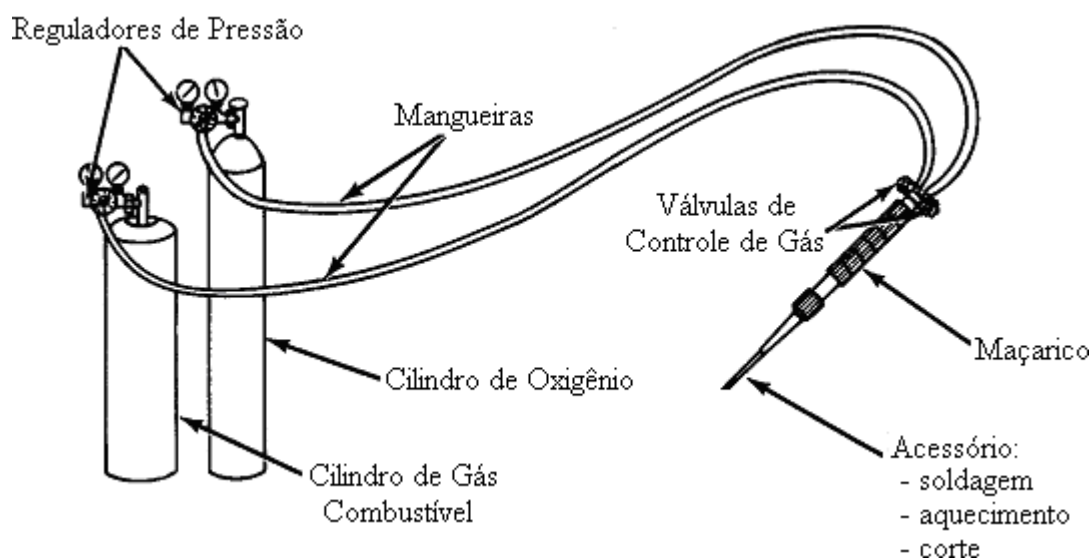
Como desligar o maçarico:

- fechar a válvula do gás-acetileno;
- fechar a válvula do gás-oxigênio;
- fechar a válvula dos reguladores de pressão;
- purgar o gás residual das mangueiras abrindo a válvula de controle de gás;
- fechar a válvula de controle de gás.

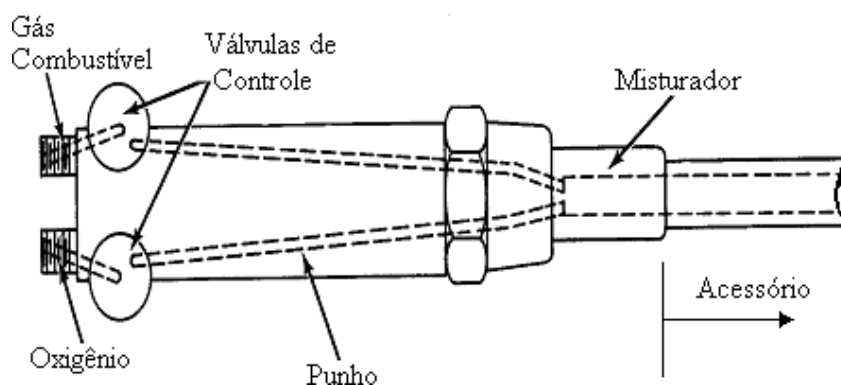
PROCESSO DE CORTE COM CHAMA OXÍ-GÁS - OXICORTE

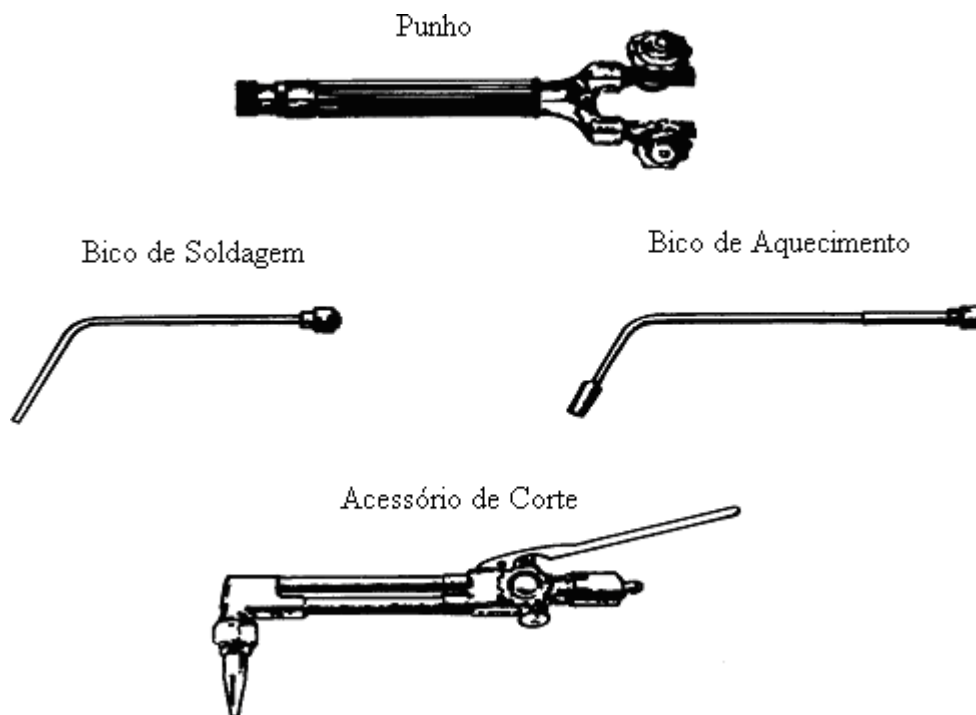
“Processo de corte de metais por meio da ação localizada e contínua de um jato de oxigênio, de elevada pureza, agindo sobre um ponto do metal previamente aquecido à sua temperatura de queima (ou de ignição) por uma chama oxicomustível”.

EQUIPAMENTO PARA O PROCESSO OXICORTE

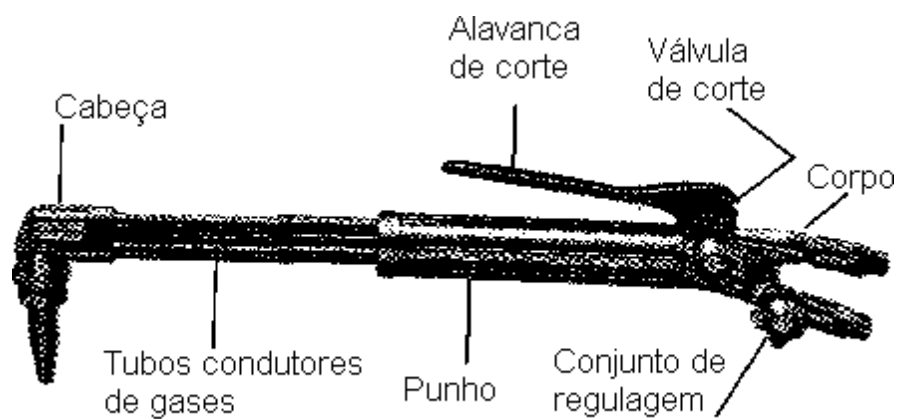


Maçarico



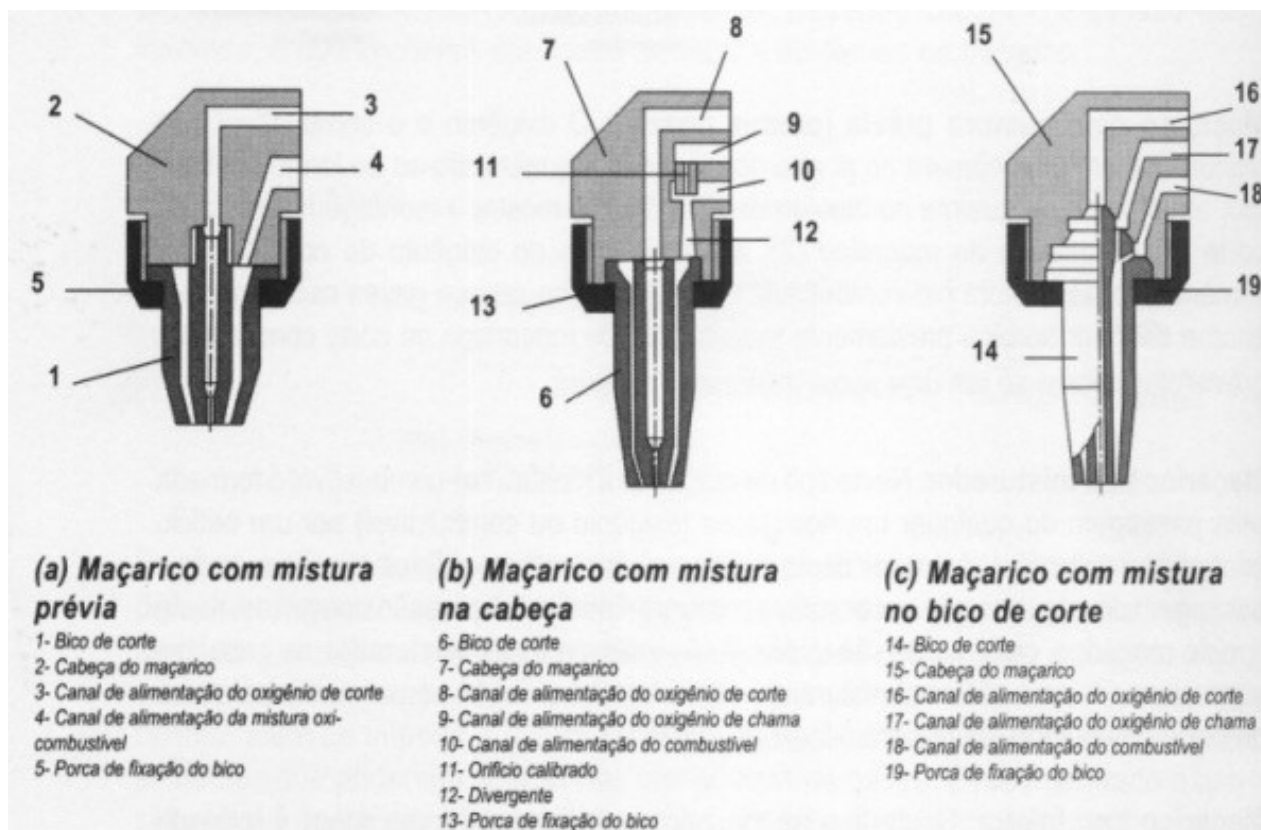


Maçarico de corte



Tipos de maçarico de corte:

- maçarico com mistura prévia;
- maçarico com mistura na cabeça;
- maçarico com mistura no bico de corte.



CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA O OXICORTE

A temperatura de queima do metal deve ser inferior à temperatura de fusão do mesmo. Caso contrário o metal se funde antes do corte ser realizado;

A temperatura de fusão dos óxidos formados deve ser menor que a temperatura de fusão do metal e menor que a temperatura alcançada no corte. Essa condição é necessária para que os óxidos formados na superfície não impeçam a combustão das camadas inferiores e a remoção do metal. Caso contrário, o metal funde-se antes do corte ser realizado;

A reação de combustão deve ser suficientemente exotérmica para manter a temperatura de início de oxidação, tornando o corte auto sustentável;

Os óxidos formados devem ter alta fluidez quando fundidos, para que possam ser expulsos com facilidade pela pressão do jato de oxigênio de corte e propagar a reação. Se não for obtida esta condição haverá dificuldade para a oxidação do metal pelo oxigênio, e conseqüentemente, uma baixa velocidade de corte;

O metal deve apresentar baixa condutividade térmica. Quando há grande dissipação de calor por condução o processo ou não se inicia ou é interrompido com frequência.

Referência Bibliográfica

- AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS., 1983. "Welding and Brazing – Resistance Welding". 9ed., vol.6, p.448-493, 1983 apud DAMASCO, A., 1994, "Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Juntas de Chapa/Chapa e Chapa/Tubo de Aço Carbono com Diferentes Composições Químicas, Espessuras e Revestimentos". Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP. 262p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS., 1998. Welding Handbook. Vol. 2: Welding Process, 8º ed. International Standard Book Number: 0-87171-354-3. American Welding Society. 1998. 550 N. W. LeJeune Rd., P.O. Box 351040, Miami, FL 33135.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS A4.3: Standard Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen Content of Martensitic, Bainitic, and Ferritic Steel Weld Metal Produced by Arc Welding, 2006.
- AWS A3.0:2001, Committee on Definitions, Standard Welding Terms and Definitions, American Welding Society (AWS), Miami, USA, 2001, pp. 11-67.
- AWS/SAE D8.9M., 2002. "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials". International Standard Book Number: 0-87171-672-0. 2002. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A.
- BRACARENSE, A.Q., Liu, S., Chemical Composition Variations in Shielded Metal Arc Welds, Welding Journal, v. 72, n. 12, p. 549-536, 1993.
- BRACARENSE, A.Q., Liu, S., Chemical Composition and Hardness Control by Endothermic Reactions in the Coating of Covered Electrodes, Welding Journal, v.76, n. 12, p. 509-516, 1997.
- FELIZARDO, I, Estudo Experimental e Numérico do Aquecimento do Eletrodo Revestido durante a Soldagem, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, Tese, 2003.
- FELIZARDO, I, BRACARENSE, A.Q., Método de Aplicação da Soldagem: Manual, Mecanizado ou Automatizado XXXII Consolda, 2006.
- FICHEL, I., DALLA, A., ROS, D.A., FELIZARDO, I, TURANI, C., GONZÁLEZ, L.P., PÉREZ, M.R., PUCHOL, R.Q., PESSOA, E.C.P., BRACARENSE, A.Q. Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos Impermeáveis. In: XXXV Congresso Nacional de Soldagem, Piracicaba, SP, 2009.
- GOULD, J. E.; KHURANA, S. P.; Li, T., 2006. "Prediction of Microstructures When Welding Automotive Advanced High Strength Steels". Welding Journal, v. 85, n.3, pp. 111s-116s, Mar. 2006.
- HANZ, Z., BHAT, S., et al., 1993, "Weld Nugget Development and Integrity in Resistance Spot Welding of High-Strength Cold-Rolled Sheet Steels" Welding Journal. pp. 209s-216s apud DAMASCO, A., FERREIRA, I., NATAL, Y. D., et al., 1993, "Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas de Aço Zincadas com Diferentes Composições, Espessuras e Revestimentos", XIX ENTS, p.381-402, Out.
- INTERMACHINERY., 2002. "Manual de Soldagem por Resistência a Ponto". 41p.
- MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q., 2017. "Soldagem: Fundamentos e Tecnologia". 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017. 370p.
- METALS HANDBOOK., 1983. Vol. 6: "Welding, Brazing and Soldering". Ninth Edition. AMS: American Society for Metal. Metal Park, Ohio 44073, U.S.A.
- MODENESI, P.J. e MARQUES, P.V., 2006. "Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem". Apostila, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Belo Horizonte, Fevereiro.
- VAZ, CLAUDIO TURANI; BRACARENSE, ALEXANDRE QUEIROZ; BERNARDINA, AURECYL DALLA; PESSOA, EZEQUIEL C. P.; FELIZARDO, IVANILZA. Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos do Tipo Baixo Hidrogênio Impermeáveis. In: XXXVI CONSOLDA, 2010, Recife. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2010.
- WAINER, E., A., BRANDI, S. D., DE MELO, F. D. H., 1992. "Soldagem, processos e metalurgia", Editora Edgar Blucher Ltda. pp 217 – 243.
- WELDING HANDBOOK, Welding Science & Technology, Volume 1, 9o Edition, American Welding Society (AWS), Miami, USA, 2001, pp 452-482.
- WILLIAMS, N. T., 1980. "Metallurgical Aspects of Resistance Spot Welding of Steel" British Steel Corporation, IIW DOC.III-656-80 apud DAMASCO, A., 1994, "Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica de Juntas de Chapa/Chapa e Chapa/Tubo de Aço Carbono com Diferentes Composições Químicas, Espessuras e Revestimentos". Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP. 262p.