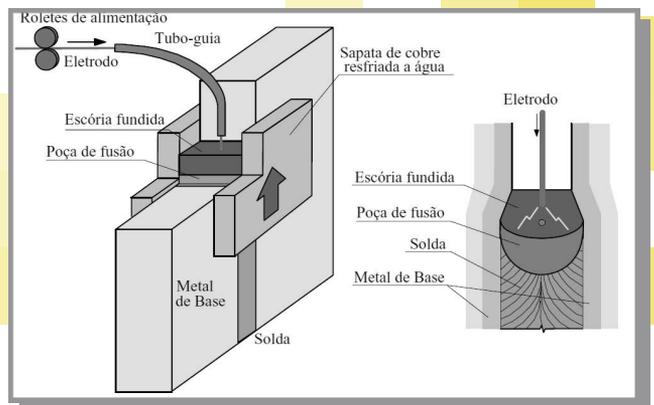
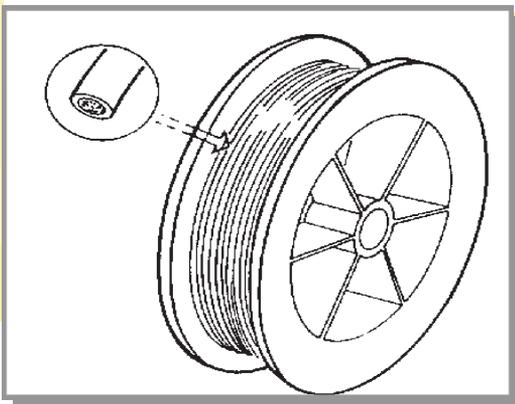
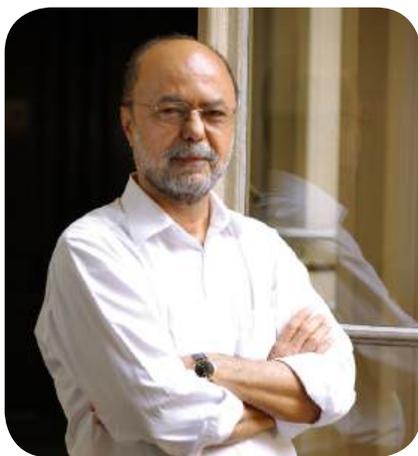


Soldagem

Prof. Manoel Messias Neris

Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais





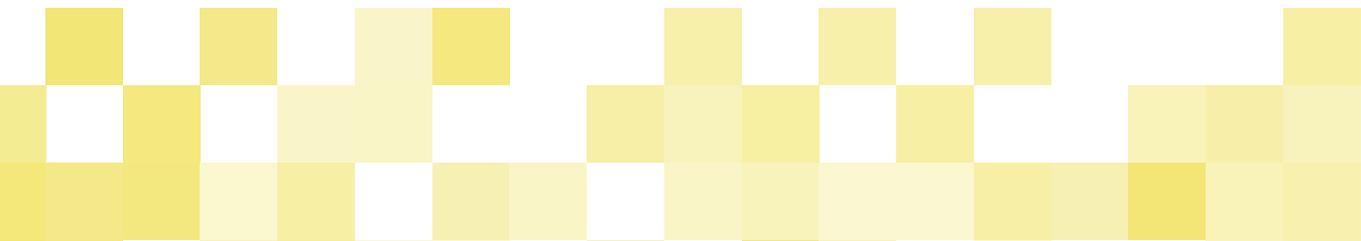
A expansão do Ensino Técnico no Brasil, fator importante para melhoria de nossos recursos humanos, é um dos pilares do desenvolvimento do país. Esse objetivo, dos governos estaduais e federal, visa à melhoria da competitividade de nossos produtos e serviços, vis-à-vis com os países com os quais mantemos relações comerciais.

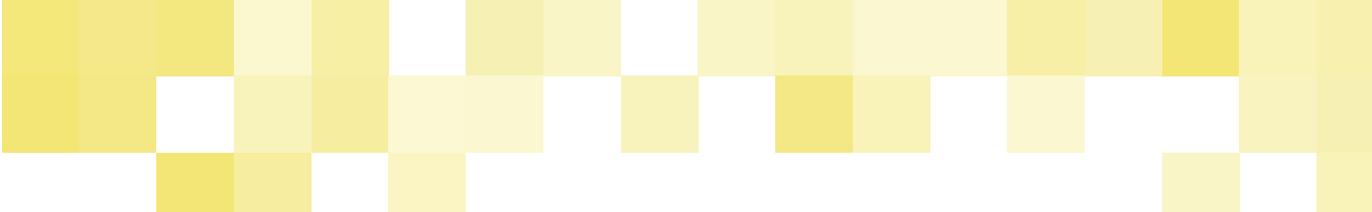
Em São Paulo, nos últimos anos, o governo estadual tem investido de forma contínua na ampliação e melhoria da sua rede de escolas técnicas - Etecs e Classes Descentralizadas (fruto de parcerias com a Secretaria Estadual de Educação e com Prefeituras). Esse esforço fez com que, de agosto de 2008 a 2011, as matrículas do Ensino Técnico (concomitante, subsequente e integrado, presencial e a distância) evoluíssem de 92.578 para 162.105.

A garantia da boa qualidade da educação profissional desses milhares de jovens e de trabalhadores requer investimentos em reformas, instalações/laboratórios, material didático e, principalmente, atualização técnica e pedagógica de professores e gestores escolares.

A parceria do Governo Federal com o Estado de São Paulo, firmada por intermédio do Programa Brasil Profissionalizado, é um apoio significativo para que a oferta pública de ensino técnico em São Paulo cresça com a qualidade atual e possa contribuir para o desenvolvimento econômico e social do estado e, conseqüentemente do país.

Almério Melquíades de Araújo
Coordenador de Ensino Médio e Técnico





GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Governador
Geraldo Alckmin

Vice-Governador
Guilherme Afif Domingos

Secretário de Desenvolvimento Econômico, Ciência e Tecnologia
Paulo Alexandre Barbosa

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

Diretora Superintendente
Laura Laganá

Vice-Diretor Superintendente
César Silva

Chefe de Gabinete da Superintendência
Elenice Belmonte R. de Castro

Coordenadora da Pós-Graduação,
Extensão e Pesquisa
Helena Gemignani Peterossi

Coordenador do Ensino Superior de Gra-
duação
Angelo Luiz Cortelazzo

Coordenador de Ensino Médio e Técnico
Almério Melquíades de Araújo

Coordenadora de Formação Inicial
e Educação Continuada
Clara Maria de Souza Magalhães

Coordenador de Infraestrutura
Rubens Goldman

Coordenador de Gestão Administrativa
e Financeira
Armando Natal Maurício

Coordenador de Recursos Humanos
Elio Lourenço Bolzani

Assessora de Comunicação
Gleise Santa Clara

Procurador Jurídico Chefe
Benedito Libério Bergamo

Sumário

Classificação dos Processos de Soldagem	5
Soldagem Oxigás.	10
Soldagem com Eletrodo Revestido.	17
Soldagem TIG	24
Soldagem MIG/MAG	30
Defeitos mais Frequentes nas Operações de Soldagem.	38
Guia Prático de Soldagem	47
Bibliografia	50

Classificação dos processos de soldagem

SOLDAGEM: É a operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas necessárias ao seu desempenho.

SOLDA: É a junta resultante da operação de soldagem.

HISTÓRICO

A história da soldagem mostra que desde as mais remotas épocas, muitos artefatos já eram confeccionados utilizando recursos de brasagem, tendo sido descobertos alguns com mais de 4000 anos; a soldagem por forjamento também tem sido utilizada há mais de 3000 anos.

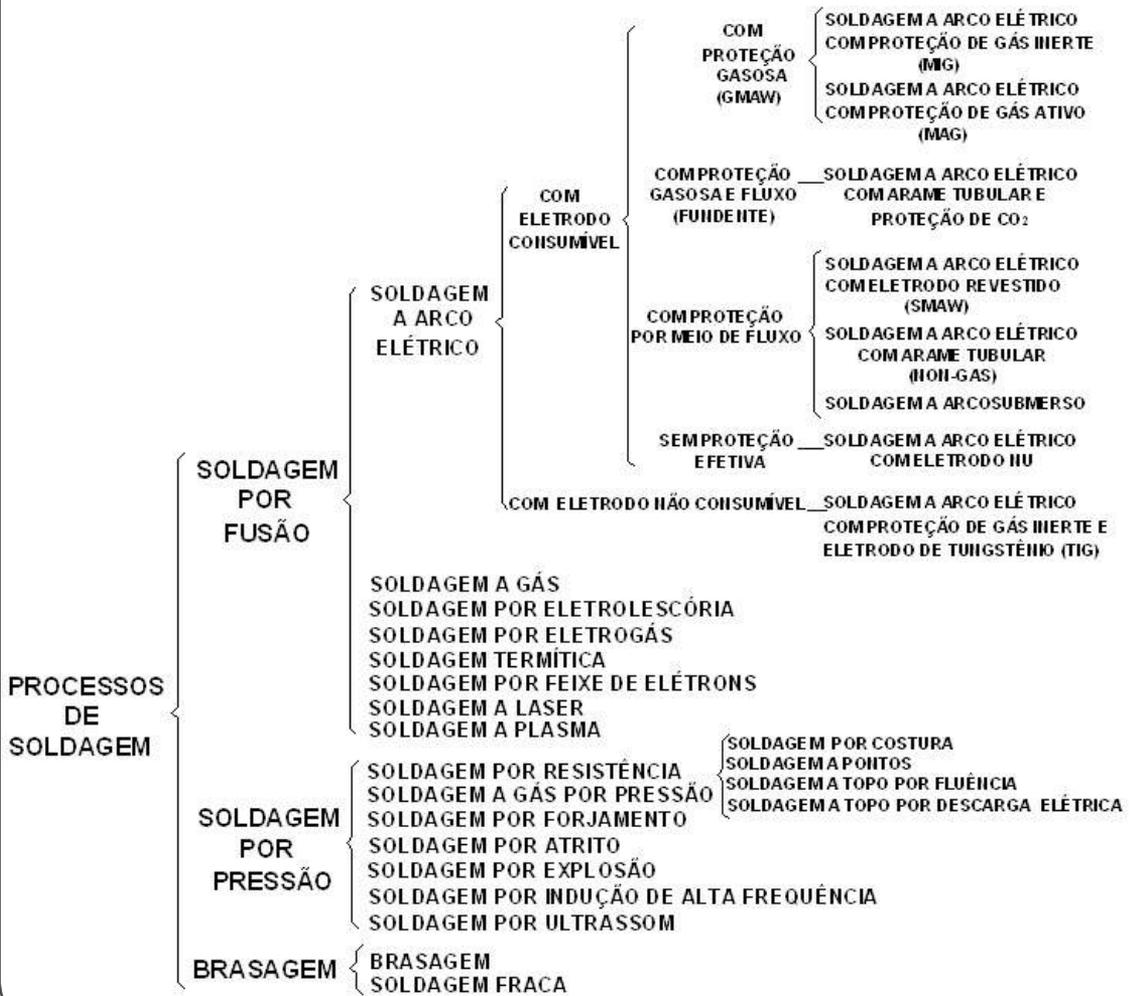
A técnica da moderna soldagem começou a ser moldada a partir da descoberta do arco elétrico, bem como também a sintetização do gás Acetileno no século passado, o que permitiu que se iniciassem alguns processos de fabricação de peças, utilizando estes novos recursos.

Com o advento da Primeira Guerra Mundial, a técnica da soldagem começou a ser mais utilizada nos processos de fabricação; a Segunda Guerra Mundial imprimiu grande impulso na tecnologia de soldagem, desenvolvendo novos processos e aperfeiçoando os já existentes.

Abaixo, um resumo cronológico da história da soldagem:

- 1801 Sir Humphrey Davis descobre o fenômeno do arco elétrico
- 1836 Edmund Davy descobre o Acetileno
- 1885 N. Bernardos e S. Olsewski depositam patente do processo de soldagem por arco elétrico
- 1889 N.G. Slavianoff e C. Coffin substituem o eletrodo de grafite por arame metálico
- 1901 Fouché e Picard desenvolvem o primeiro maçarico industrial para soldagem oxiacetilênica
- 1903 Goldschmidt descobre a solda aluminotérmica
- 1907 O. Kjellberg deposita a patente do primeiro eletrodo revestido
- 1919 C. J. Halsag introduz a corrente alternada nos processos de soldagem
- 1926 H.M. Hobart e P.K. Denver utilizam gás inerte como proteção do arco elétrico
- 1930 Primeiras normas para eletrodo revestido nos EUA
- 1935 Desenvolvimento dos processos de soldagem TIG e Arco Submerso
- 1948 H.F. Kennedy desenvolve o processo de soldagem MIG
- 1950 França e Alemanha desenvolvem o processo de soldagem por feixe de elétrons
- 1953 Surgimento do processo MAG
- 1953 Primeiras aplicações do processo PLASMA convencional
- 1957 Desenvolvimento do processo de soldagem com arame tubular e proteção gasosa
- 1958 Desenvolvimento do processo de soldagem por eletro-escória, na Rússia
- 1960 Desenvolvimento de processo de soldagem a laser, nos EUA
- 1970 Aplicados os primeiros robôs nos processos de soldagem

CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM



Estima-se que hoje em dia estão sendo utilizados mais de 70 processos de soldagem mundialmente, sendo este um número dinâmico, pois vários outros processos estão em desenvolvimento em nível de pesquisa e projetando para breve novas alterações no mercado de soldagem.

Isto implica em grandes controvérsias na classificação dos processos, não havendo uma classificação universalmente aceita para os mesmos. A classificação mostrada na página anterior utiliza o critério de divisão em famílias, envolvendo o fenômeno físico e utilizando para as subdivisões a forma de energia empregada no processo.

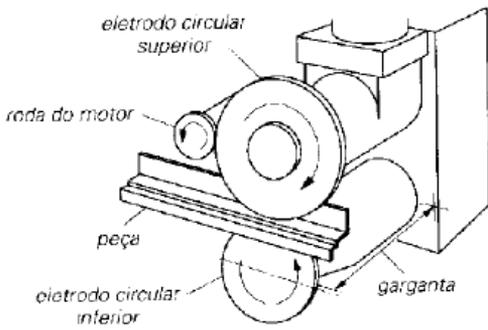
A divisão dos processos portanto será realizada em três grandes famílias:

- a) Soldagem por fusão (fases líquida-líquida)
- b) Soldagem por pressão (fases sólida-sólida)
- c) Brasagem (fases sólida-líquida)

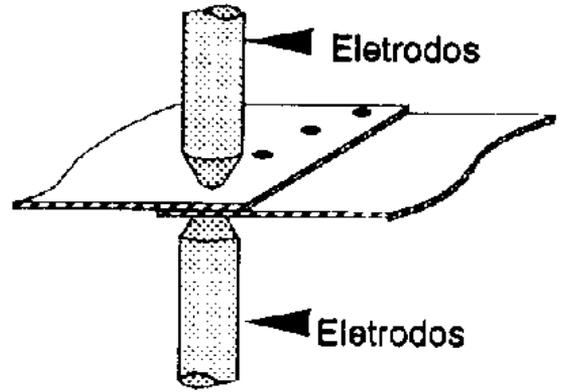
A título de curiosidade apresentamos abaixo a classificação abordada pela AWS – American Welding Society, a qual apresenta contradições em relação a que será adotada nesta apostila.

ARCO ELÉTRICO	BRASAGEM	ESTADO SÓLIDO
<ul style="list-style-type: none"> . com eletrodo nu . com eletrodo de carvão . com eletrodo revestido . com arame sólido e gás de proteção (MIG/MAG) . com arame tubular com ou sem gás de proteção . com arame sólido e fluxo (arco submerso) . com eletrodo de tungstênio não consumível . a plasma . de pinos . com hidrogênio atômico 	<p>FORTE</p> <ul style="list-style-type: none"> . a ar . por difusão . em forno . por indução . por infravermelho . por resistência . por tocha . a arco com eletrodo de carvão <p>FRACA</p> <ul style="list-style-type: none"> . em forno . por indução . por resistência . por tocha . com ferro de solda . por infravermelho 	<ul style="list-style-type: none"> . por difusão . por forjamento . por fricção . por pressão a quente . por laminação . por ultrassom . por explosão
RESISTÊNCIA	OUTROS	GAS COMBUSTIVEL
<ul style="list-style-type: none"> . por centelhamento . por alta frequência . por projeção . por costura . por pontos . topo a topo 	<ul style="list-style-type: none"> . por feixe de elétrons . por eletroescória . por indução . a laser . aluminotérmica 	<ul style="list-style-type: none"> . oxiacetilênica . oxihídrica . ar-acetilênica . a gás sob pressão

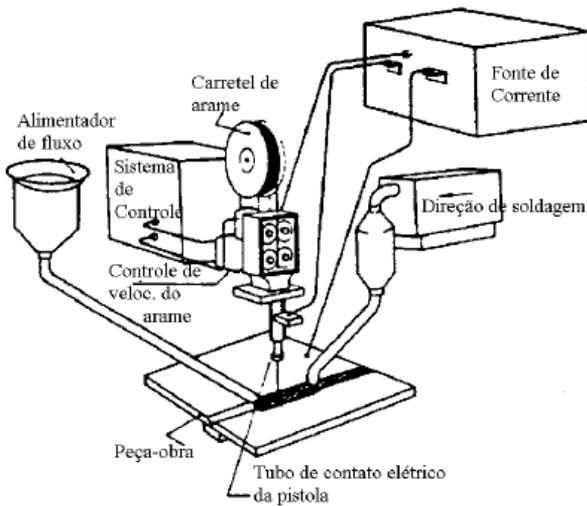
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS



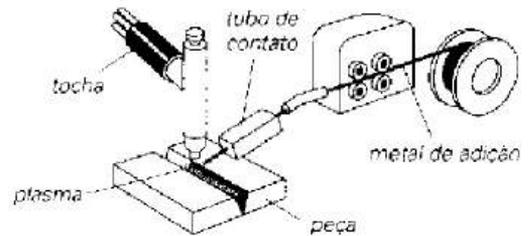
SOLDAGEM POR COSTURA



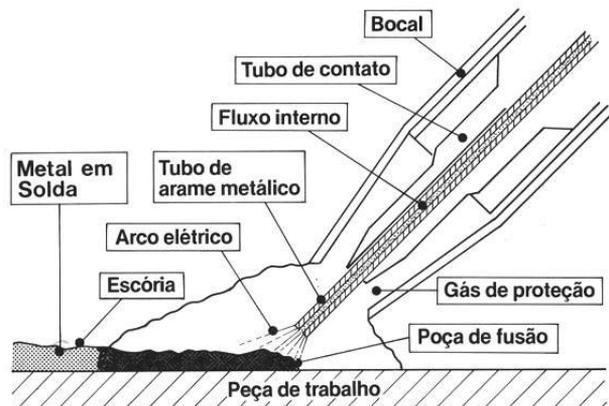
SOLDAGEM POR PONTOS



SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

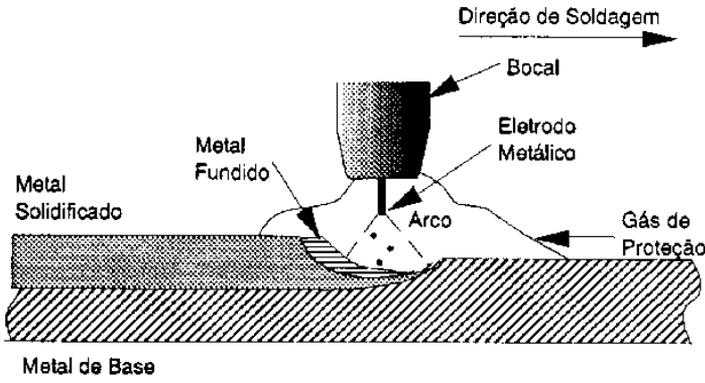


SOLDAGEM A PLASMA

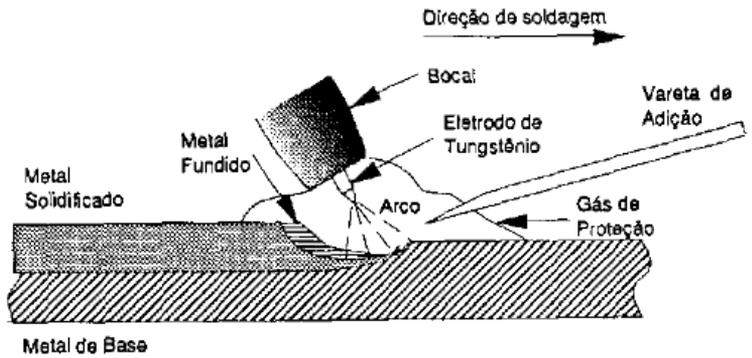


SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

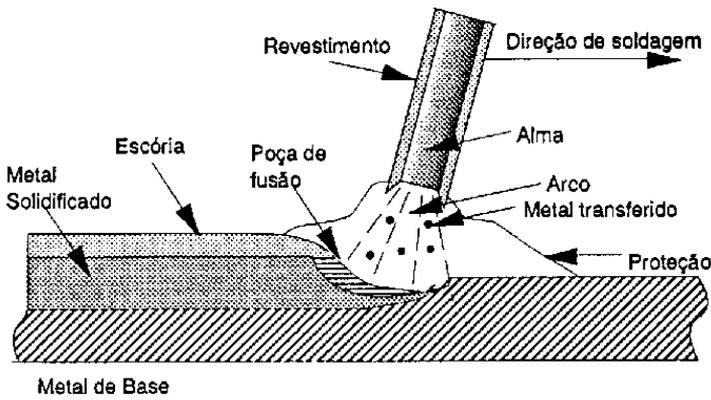
PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDA



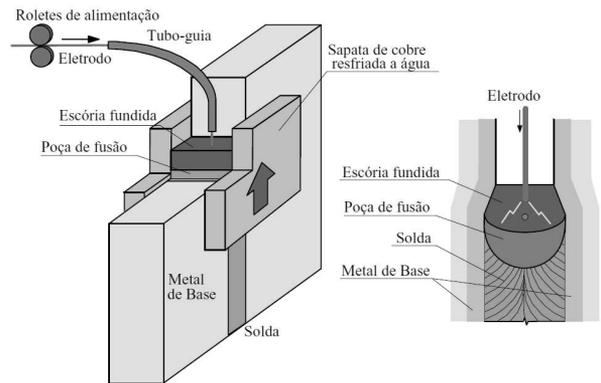
SOLDAGEM MIG/MAG



SOLDAGEM TIG



SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO



SOLDAGEM POR ELETROESCÓRIA

Soldagem por Oxigás

SOLDAGEM POR OXIGÁS (SOLDA A GÁS)

A soldagem por oxi-gás é um processo de soldagem por fusão, no qual a união entre os metais é conseguida através da aplicação do calor gerado por uma ou mais chamas, resultantes da combustão de um gás, com ou sem o auxílio de pressão, podendo ou não haver metal de adição. As superfícies dos chanfros dos metais de base e o material de adição quando presente, fundirão em conjunto formando uma poça de fusão única, que após o resfriamento se comportará como um único material.

O sistema é simples, consistindo dos cilindros dos gases comprimidos, reguladores de pressão, manômetros, mangueiras, válvulas de retenção e uma tocha de soldagem, com bico adequado; podem ser conseguidas diferentes atmosferas pela variação da quantidade relativa de comburente e combustível.

Há uma grande variedade de gases disponíveis para a soldagem a gás, sendo que normalmente o Acetileno é o preferido, tanto pelo custo, como pela temperatura de chama; entretanto outros gases combustíveis são também utilizados, tais como o Butano, Propano, Metano, Etileno, gás de rua, Hidrogênio e ainda as misturas produzidas pelas indústrias de gases.

O metal de adição é uma vareta, normalmente especificada para cada caso de soldagem e de um modo geral, para a soldagem de ferros fundidos e metais não ferrosos utiliza-se um fluxo de soldagem, também chamados de

fundente, que tem a finalidade de manter a limpeza do metal base na área da solda, bem com ajudar na remoção de filmes de óxidos que se formam na superfície.

A soldagem pelo processo oxi-gás oferece várias vantagens: o equipamento é barato e versátil, é ótima para chapas finas, é realizada com pequenos ciclos térmicos, não usa energia elétrica e solda em todas as posições. Em compensação o processo apresenta inúmeras desvantagens tais como: chamas pouco concentradas, o que acarreta grandes zonas termicamente afetadas pelo calor, é necessária grande habilidade do soldador, não é econômica para chapas espessas, tem baixa taxa de deposição, manuseia gases perigosos e o uso de fluxo acaba gerando produtos corrosivos no metal.

No processo por oxi-gás, a chama oxiacetilênica é a mais utilizada, portanto vamos conhecer os seus gases:

OXIGÊNIO

É o gás comburente, apresentando-se inodoro, insípido e incolor e encontrando-se em abundância na natureza. Industrialmente pode ser obtido por liquefação e destilação do ar, reação química ou eletrólise da água. O processo mais usado é o primeiro, sendo o ar inicialmente purificado e em seguida, após várias compressões, expansões e resfriamentos sucessivos, o mesmo é liqüefeito. Em uma coluna

de destilação e retificação realiza-se a separação dos vários componentes do ar, obtendo-se assim no final oxigênio de alta pureza. A distribuição do Oxigênio para soldagem normalmente é realizada através de cilindros de aço sem costura, sob pressão de 150 kgf/cm² (147,1 bar) ou seja 7000 litros de gás comprimido, em cilindros de 46 litros aproximadamente. Em instalações de consumo elevado de Oxigênio pode-se optar por trabalhar com tanques criogênicos, os quais recebem o Oxigênio líquido; conforme o mesmo for sendo consumido, será vaporizado em evaporadores instalados na saída dos tanques. Outra maneira de fornecimento de Oxigênio que vem sendo adotada por alguns fabricantes baseia-se no fornecimento de uma pequena usina geradora de Oxigênio ao consumidor do gás, o qual passa a ter a responsabilidade da operação e fornecimento de energia à mesma; este processo utiliza a tecnologia de geração de Oxigênio pela passagem do ar através de leito de zircônia e não produz o gás com pureza suficiente para uso medicinal.

ACETILENO

O Acetileno é obtido da reação da água sobre o Carbureto de Cálcio, que por sua vez é produzido em fornos apropriados pela reação entre o Carbono (C) e o Cal (CaO).

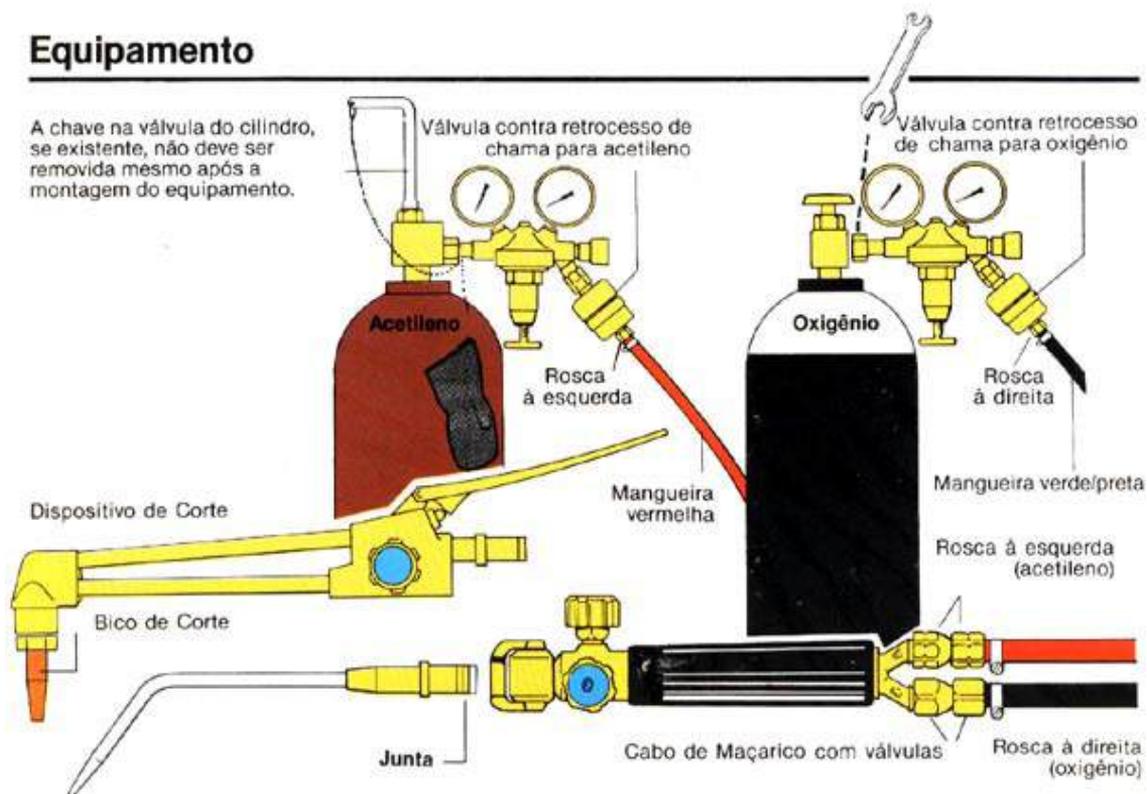


A formação do Acetileno propriamente dito é resultante de uma reação endotérmica reversível, que melhora o rendimento calorífico da chama, mas ao mesmo tempo contribui para aumentar o perigo no manuseio do gás em caso de uma dissociação.



A produção do Acetileno pode ser realizada no próprio local por meio de geradores (geralmente em pequenas oficinas) ou ser armazenada em cilindros onde o mesmo se encontra dissolvido sob pressão em Acetona líquida, a qual é retida no interior do cilindro em uma massa porosa (carvão vegetal, cimento, amianto e terra infusória). Nestas condições consegue-se armazenar até 11 kg de gás em pressões da ordem de até 18 kgf/cm² (17,6 bar) com bastante segurança, pois a Acetona consegue dissolver 575 vezes seu próprio volume para cada unidade atmosférica. O Acetileno é um gás que apresenta certa instabilidade sob pressões elevadas e corre o risco de se dissociar, gerando uma grande liberação de calor e podendo explodir; desta forma deve-se tomar todo o cuidado para que a pressão do mesmo na rede de distribuição não ultrapasse 1,5 bar.

Equipamento



ESTAÇÃO TÍPICA DE SOLDAGEM OXIACETILÊNICA

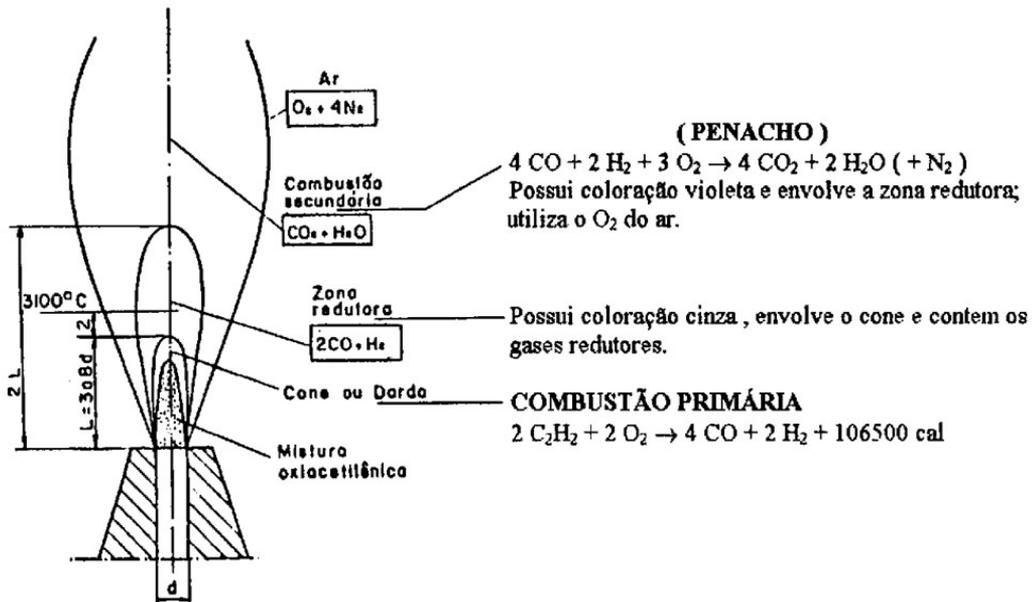
CUIDADOS NO MANUSEIO DOS CILINDROS DE GASES

OXIGÊNIO

1. O oxigênio não pode entrar em contato com graxa, óleo ou matéria gordurosa.
2. O cilindro não deve sofrer impactos violentos.
3. O transporte do cilindro deve ser realizado com seu capacete de proteção.
4. Não eleve ou transporte cilindros utilizando cabos de aço ou eletroimã.
5. Não use o cilindro deitado.
6. Não utilizar o oxigênio para aeração, limpeza de máquinas, roupa, pele, etc.
7. Utilizar mangueira verde ou preta para distribuição e conexões com rosca à direita.

ACETILENO

1. Não transportar o cilindro deitado (aguardar de 36 a 48 hs para estabilização).
2. A pressão máxima da rede não pode ultrapassar 1,5 bar.
3. O transporte do cilindro deve ser realizado com seu capacete de proteção.
4. Não eleve ou transporte cilindros utilizando cabos de aço ou eletroimã.
5. Não use o cilindro deitado.
6. Não utilizar canalização de Cobre (formação de Acetileto de Cobre, explosivo).
7. Consumo máximo de Acetileno: 1000 litros/hora.
8. Não usar até a pressão zero.
9. Utilizar mangueira vermelha para distribuição e conexões com rosca à esquerda.



ESQUEMA DA CHAMA OXIACETILÊNICA NORMAL

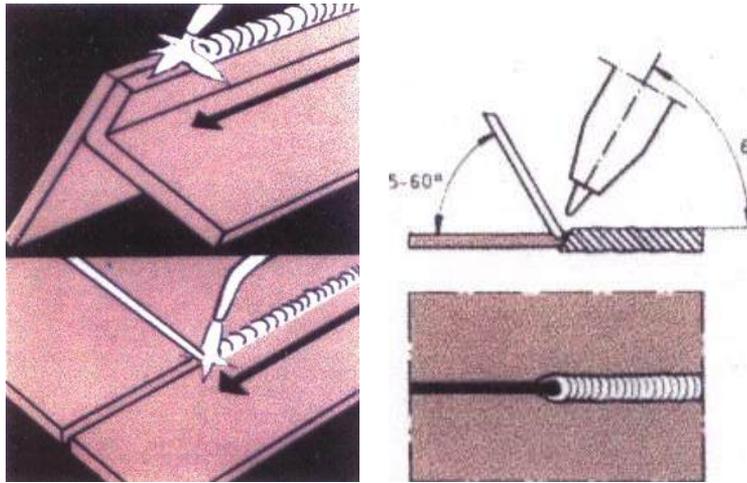
CHAMA NEUTRA OU NORMAL ($r=1$): Corresponde a uma alimentação do maçarico em volumes iguais de Oxigênio e Acetileno. O cone é branco, brilhante e somente visível através dos óculos de soldador. É a chama utilizada na maior parte dos casos de soldagem, soldabrasagem e aquecimento.

CHAMA REDUTORA ($r<1$): Utilizada para revestimento na soldagem dos aços com o intuito de elevar o percentual de Carbono na zona de soldagem, e isto faz com que abaixe a temperatura de fusão. Esta chama ocorre quando a proporção de Acetileno é aumentada, surgindo assim um cone brilhante que se sobrepõe ao cone normal, e que cresce com o aumento da proporção de Acetileno. Esta chama contém um elevado teor de Carbono e tem o risco de enriquecer o aço com este elemento, tornando-o mais duro e mais frágil. É utilizada na soldagem de ferros fundidos, com pré-aquecimento e fundente, Alumínio e Magnésio também com o uso de fundente e aços-liga ao Cromo e ao Níquel.

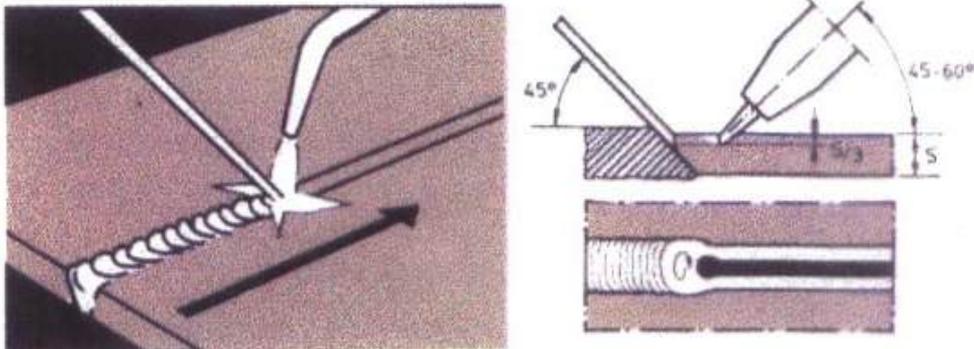
CHAMA OXIDANTE ($r>1$): A chama oxidante é resultante da mistura de Acetileno com Oxigênio em excesso, e isto faz com que o cone e a zona de combustão primária se encurtem, com o cone menos brilhante e mais azul; simultaneamente a zona de combustão secundária fica mais luminosa. Esta chama, rica em Oxigênio, oxida o aço com o risco de formação de porosidades pela reação com o Carbono; normalmente esta chama é utilizada com o uso de fundente para a soldagem de latão, pois o Oxigênio em excesso forma óxido de zinco na superfície da poça que impede a continuidade de reações posteriores, impedindo a contínua volatilização do Zinco, o qual iria se oxidar em seguida na atmosfera.

$$r = \frac{\text{Volume } O_2}{\text{Volume } C_2H_2} \quad \left\{ \begin{array}{l} r = 1 \text{ Chama Neutra ou Normal} \\ r < 1 \text{ Chama Redutora ou Carburante} \\ r > 1 \text{ Chama Oxidante} \end{array} \right.$$

TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A SOLDAGEM A GÁS



Solda a Esquerda: também chamada de Solda para a Frente, apresenta boa penetração e acabamento, sendo utilizada em espessuras de até 7 mm, onde se trabalha aquecendo a peça ou região a ser soldada. Apresenta grande consumo de gases e tempo.



Solda a Direita: Também chamada de Solda para Trás, é utilizada quando a peça a ser soldada requer chanfros, ou seja, para espessuras maiores. É uma técnica desenvolvida durante a 2ª Grande Guerra, e que apresenta boa velocidade, boa penetração e economia de tempo e gases. Trabalha-se mantendo a união soldada aquecida.

VANTAGENS NO USO DO ACETILENO EM RELAÇÃO AOS OUTROS GASES

1. Possui alta temperatura de chama (aproximadamente 3100°C).
2. Composição da chama com notáveis propriedades redutoras.
3. Chama facilmente regulável, permitindo fácil identificação de atmosfera.
4. Baixo custo do Acetileno em relação a vários gases.
5. Elevado teor de Carbono na molécula (92,24% em peso).
6. Boa velocidade de propagação (velocidade com que a chama percorre a massa gasosa).
7. Formação endotérmica do Acetileno, permitindo liberação de calor na dissociação, durante a combustão.

CONCLUSÕES

A chama oxiacetilênica, tal como as outras chamas, é utilizada na atualidade em soldagem de chapas finas, sendo substituída gradativamente por outros processos mais produtivos e menos perigosos. É ainda, porém muito utilizada em operações de pré-aquecimento, pós-aquecimento, brasagem, soldabrasagem, corte e chanfro de aços carbono e aços ligas, revestimento superficial e metalização. Faz-se restrições ao uso do gás Acetileno nas operações de corte submarino a grandes profundidades, quando o mesmo é substituído por gases sintetizados ou mistura de gases, como, por exemplo, entre outros o metil acetileno propadieno (MPS), bastante similar ao Acetileno, porém estabilizado.

DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE GÁS EM UM CILINDRO

Para determinação do volume de um gás remanescente em um cilindro, deve-se aplicar a equação geral do estado que é

$$PV = mRT$$

onde:

P = pressão

V = volume

m = massa

R = constante universal dos gases perfeitos

T = temperatura absoluta

Supondo que a massa de um gás está sob a pressão P1, temperatura T1, contida em um volume V1, temos abaixo a equação que representa este estado:

$$P_1 V_1 = mRT_1 \text{ ou } mR = \frac{P_1 V_1}{T_1}$$

Alterando-se a pressão para P_2 e a temperatura para T_2 , a equação que representa esse novo estado é:

$$P_2 V_2 = mRT_2 \text{ ou } mR = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Concluindo-se que

$$mR = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Se um gás se comporta dessa maneira, ele segue as leis de Boyle-Mariotti e Gay-Lussac, sendo, portanto um gás ideal ou perfeito.

Exemplo: Qual a quantidade em m^3 de O_2 contida em um cilindro de 50,2 l e cuja pressão interna lida no manômetro é de 190 bar, estando esse cilindro ao Sol, de modo que se pode afirmar sem grande erro que a temperatura do gás em seu interior é de $43^\circ C$.

Obs.: a quantidade de gás em m^3 que queremos saber se refere à condição padrão de venda de gás no Brasil, ou seja: $21^\circ C$ e à pressão atmosférica normal = 760 mm Hg. (lembrar que $1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$)

Situação inicial:

$$P_1 = \text{pressão manométrica} + \text{pressão atmosférica} = 190 + 1,013 = 191,013 \text{ bar}$$

$$V_1 = 50,2 \text{ l} = 0,0502 \text{ m}^3$$

$$T_1 = 43 + 273,15 = 316,15^\circ K$$

Situação final:

$$P_2 = 760 \text{ mm Hg} = 1,013 \text{ bar}$$

$$T_2 = 21^\circ C + 273,15 = 294,15^\circ K$$

$$V_2 = ?$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \implies V_2 = \frac{P_1 V_1 T_2}{T_1 \times P_2} = \frac{191,013 \times 0,0502 \times 294,15}{316,15 \times 1,013} = 8,807 \text{ m}^3$$

Como vimos, podemos aplicar esta resolução ao gás Oxigênio que se encontra armazenado na forma gasosa, porém o mesmo não se aplica ao Acetileno, que se encontra dissolvido em Acetona; sabemos que a solubilidade da Acetona depende muito da temperatura, sendo que nesse caso a quantidade de gás deve ser determinada por pesagem.

Naturalmente podemos fazer um cálculo aproximado da quantidade restante no cilindro da seguinte forma: multiplica-se a pressão do cilindro em bar, pelo volume do mesmo em litros e em seguida multiplica-se o resultado por 10.

Exemplo: Em um cilindro de Acetileno com 50 litros de volume, o manômetro indica que a pressão do cilindro é de 10 bar. Portanto o volume do gás remanescente será de:

$50 \times 10 \times 10 = 5000 \text{ l de gás, que equivalem a aproximadamente } 5 \text{ kg de Acetileno.}$

Soldagem com eletrodo revestido

É um processo de soldagem por fusão a arco elétrico que utiliza um eletrodo consumível, no qual o calor necessário para a soldagem provem da energia liberada pelo arco formado entre a peça a ser soldada e o referido eletrodo. A proteção da poça de fusão é obtida por meio dos gases gerados pela decomposição do revestimento do eletrodo, sendo que o material de adição que é manuseado sem pressão provem do metal que compõe o eletrodo.

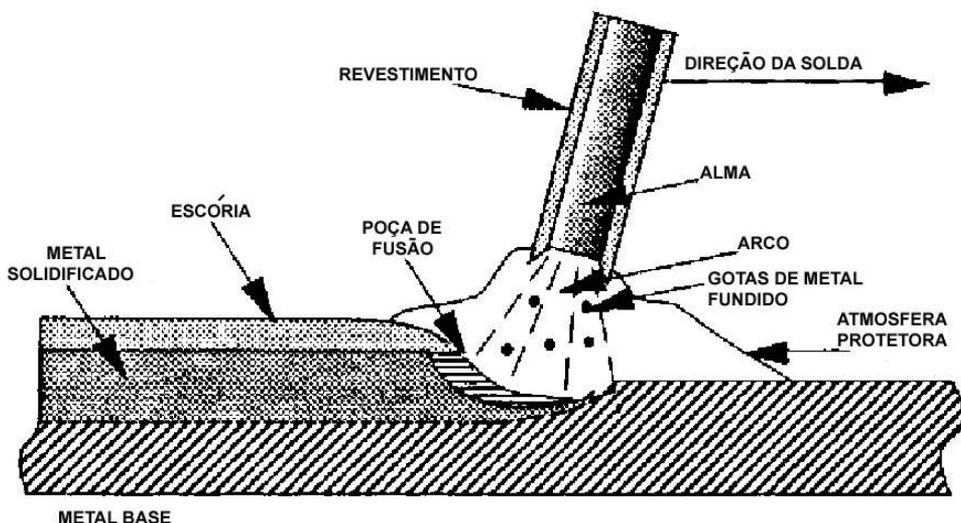
O metal de base no percurso do arco é fundido, formando uma poça de metal fundido. O eletrodo é também fundido e assim transferido à poça de fusão na forma de glóbulos de metal fundido a cada 0,001 a 0,01 segundos a elevada temperatura. Nessas condições a expansão dos gases contidos no arame eletrodo, tanto em solução como armazenados em microporosidades, bem como os gases produzidos pela elevada temperatura dos componentes do revestimento, provocam a explosão desses glóbulos, projetando-os contra o banho de fusão.

O sopro das forças do arco, bem como o impacto dos glóbulos de metal fundido, formam uma pequena depressão no metal de base que é chamada de cratera.

A distância medida no centro do arco, da extremidade do eletrodo até o fundo da cratera é chamada comprimento do arco.

O comprimento do arco deve ser o menor possível (variando na faixa entre 3 e 4 mm ou ainda de 0,5 a 1,1 o diâmetro da alma do eletrodo) a fim de reduzir a chance dos glóbulos do metal em fusão entrarem em contato com o ar ambiente, absorvendo Oxigênio e Nitrogênio, os quais tem efeito bastante adverso nas propriedades mecânicas do metal depositado.

A coluna do arco estende-se desde o fundo da cratera até o glóbulo em fusão da ponta do eletrodo. De acordo com alguns pesquisadores, a temperatura do gás no centro do arco ao longo de seu eixo é de 6000°C, a temperatura do cátodo é de 3200°C e a temperatura no anodo é de 3400°C.



A possibilidade de inúmeras formulações para o revestimento explica a principal característica deste processo que é sua grande versatilidade em termos de ligas soldáveis, operacionalidade e características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado. O custo relativamente baixo e a simplicidade do equipamento necessário, comparados com outros processos, bem como a possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou abertos, sujeitos à ação de ventos, são outras características importantes.

Quando comparada com outros processos, particularmente com a soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa ou com a soldagem a arco submerso, a soldagem com eletrodos revestidos apresenta como principal limitação uma baixa produtividade, tanto em termos de taxa de deposição (entre 1,5 e 5 kg/h para eletrodos de aço carbono), como em termos de ocupação do soldador, geralmente inferior a 40%. Outras limitações são a necessidade de um treinamento específico, que é demorado e oneroso, particularmente para certas aplicações de maior responsabilidade, necessidade de cuidados especiais para os eletrodos, principalmente com os do tipo básico (baixo Hidrogênio), e o grande volume de gases e fumos gerados no processo, que são prejudiciais à saúde, particularmente em ambientes fechados.

Mesmo com esses inconvenientes, ainda continua a ser um processo de soldagem empregado na fabricação e montagem de equipamentos, na área de manutenção e reparos, em construções no campo, na soldagem em locais de difícil acesso em estaleiros, e, de modo mais

abrangente, na soldagem em geral de chapas de espessura variando de 3 mm a 40 mm.

PRINCÍPIOS DO PROCESSO: ABERTURA, MANUTENÇÃO E EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico é aberto tocando-se o eletrodo na peça a ser soldada. Apesar de não se exigir uma técnica especial, é necessário um treinamento prévio para não se causar danos na peça a ser soldada, principalmente se o eletrodo for do tipo de baixo Hidrogênio (eletrodo de revestimento básico).

A manutenção do arco, por sua vez é uma mera questão de controlar a velocidade de deposição e o comprimento do arco elétrico, uma vez todas as outras variáveis estabelecidas.

Na extinção do arco finalmente, um cuidado especial deve ser tomado para evitar a formação da cratera no final do cordão. A cratera deve ser preenchida convenientemente, mantendo-se o eletrodo estacionário sobre o fim do cordão, até que ela seja eliminada.

FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM A ARCO

A corrente que alimenta o arco elétrico provem de uma fonte geradora, podendo ser corrente contínua ou corrente alternada. Os aparelhos que servem de fontes convencionais dividem-se em três categorias:

- Máquinas de corrente contínua: grupos rotativos, grupos eletrógenos, retificadores.
- Máquinas de corrente alternada: transformadores e conversores de frequência.

- Máquinas mistas: transformadores/retificadores.

A partir da década de 60 começaram a surgir no mercado novos tipos de máquinas de soldagem, caracterizadas por possuírem controle eletrônico e por apresentarem desempenho superior à maioria das máquinas convencionais, com funções múltiplas, redução de peso e consumo energético. Atualmente as formas mais conhecidas são as fontes tiristorizadas, as fontes transistorizadas em série, as fontes transistorizadas chaveadas e as fontes inversoras.

A tabela abaixo compara as características das fontes convencionais estáticas (transformadores e transformadores-retificadores) e das fontes com controle eletrônico.

Tipo de Fonte	Saída	Eficiência Elétrica	Características Físicas	Custo Relativo	Aplicações
Convencional	Fixada pelo projeto, resposta lenta, sem estabilização da rede	Razoável	Grande, pesada, robusta, e resistente.	1	SMAW manual, GTAW. Uso geral.
Tiristorizada	Resposta variável, mas relat. lenta. Estabilização da rede, ruído elevado.	Razoável	Mais compacta do que fontes convencionais equivalentes.	3	GMAW/GTAW manual e mecanizada, SMAW manual. Qualidade média a alta.
Análogica	Resposta muito rápida, flexibilidade, precisão, ausência de ruído, alta reprodutibilidade.	Pobre	Relat. grande, necessita refrigeração de água.	6	GTAW/GMAW de alta qualidade, saída pulsada, pesquisa e desenvolvimento.
Chaveada ou Híbridas	Resposta rápida, saída variável e reprodutível, estabilidade.	Muito boa	Tamanho médio, refrigeração pelo ar.	4	Qualidade média a alta, multiprocessos.
Inversora	Resposta rápida, saída variável e reprodutível, estabilidade.	Muito boa	Compacta, projeto complexo.	4	Qualidade média a alta, multiprocessos.

VANTAGENS DA CORRENTE ALTERNADA

- A corrente alternada não é sensível ao fenômeno do sopro magnético (fenômeno do desvio do arco devido a campos magnéticos que atravessam a peça).
- Maior velocidade de solda (devido possivelmente à inversão do sentido da corrente a todo instante).
- As máquinas de soldagem em corrente alternada são de menor tamanho, custo e peso que as de corrente contínua, além de exigirem menor manutenção.
- Menor consumo de energia ($\eta = 0.8$ no transformador; 0.5 no gerador e 0.6 no retificador).
- Maior refinamento no metal depositado, devido agitação do banho de fusão.

VANTAGENS DA CORRENTE CONTÍNUA

- a. Permite utilização de eletrodo com elementos pouco ionizantes no revestimento. Melhor uso de eletrodos para ferro fundidos e aços inoxidáveis.
- b. Mais recomendada para a soldagem de chapas finas e soldagem fora da posição.
- c. A mudança de polaridade permite modificar certas características do depósito, como por exemplo a penetração.
- d. A corrente contínua é independente de circuitos elétricos, pois pode ser gerada pelos grupos eletrógenos.

FUNÇÕES DO REVESTIMENTO DO ELETRODO

Os eletrodos revestidos são constituídos por uma alma metálica cercada por um revestimento composto de matérias orgânicas e ou minerais de dosagem bem definida.

Os vários materiais que compõe o revestimento entram na forma de pó, com exceção do aglomerante que é geralmente silicato de sódio ou potássio. O revestimento é composto por elementos de liga e desoxidantes tais como ferro cromo, ferro manganês, etc., estabilizadores de arco formadores de escória e materiais fundentes (asbesto, feldspato, ilmenita, óxido de ferro, mica, talco, rutilo, etc.) e materiais que formam uma atmosfera protetora (dolomita, carbonato de ferro, celulose, etc.).

A princípio, as funções básicas do revestimento são:

- a. Proteger o arco contra o Oxigênio e Nitrogênio do ar, através dos gases gerados pela decomposição do revestimento em alta temperatura.
- b. Reduzir a velocidade de solidificação, proteger contra a ação da atmosfera e permitir a desgaseificação do metal de solda através da escória.
- c. Facilitar a abertura e estabilizar o arco.
- d. Introduzir elementos de liga

no material depositado e desoxidar o metal de solda.

- e. Facilitar a soldagem nas diversas posições de trabalho.
- f. Servir de guia às gotas em fusão em direção ao banho.
- g. Constituir-se em isolante elétrico na soldagem em chanfros estreitos ou de difícil acesso.

TIPOS DE REVESTIMENTO

Em função de sua formulação e do caráter da escória, os revestimentos dos eletrodos podem ser classificados em diferentes tipos. Essa classificação varia bastante, de acordo com os diferentes autores e da norma utilizada; utilizaremos a classificação dos tipos de revestimento abaixo:

- **revestimento oxidante:** são os eletrodos que contém no revestimento uma grande quantidade de óxido de ferro, com ou sem óxido de manganês, dando uma escória oxidante, abundante e que se remove com facilidade, e um metal depositado com baixa penetração e baixas propriedades mecânicas; hoje em dia este tipo de eletrodo já está superados pelos eletrodos rutilicos.
- **revestimento básico:** estes eletrodos tem um revestimento com altas quantidades de carbonato de

cálcio, que lhe confere uma escória de caráter básico, pouco abundante e de rápida solidificação. A penetração é média, porém o metal depositado é de elevada pureza, com baixo teor de Enxofre e com valores baixos de Hidrogênio (causadores de trincas de solidificação e de trincas a frio respectivamente), apresentando ainda elevada resistência mecânica e resistência à fadiga. O grande perigo para este tipo de eletrodo é sua alta higroscopicidade, que poderá ocasionar porosidade e trincamento no cordão no caso de umidade, exigindo, portanto grande cuidado na armazenagem.

- **revestimento ácido:** o revestimento é a base de óxido de ferro e óxido de manganês ou de titânio ou de silício. A escória é de caráter ácido, abundante, leve e que se destaca com facilidade; a penetração é razoavelmente boa, a taxa de deposição é elevada, o que limita, portanto a posição de soldagem à condição de plana e horizontal. É necessário que o metal de base tenha baixo teor de Carbono e impurezas a fim de evitar trincamento de solidificação.

- **revestimento rútilico:** são eletrodos com grande quantidade de rutilo (TiO_2) no revestimento, gerando uma escória abundante, leve e de fácil remoção. A taxa de deposição é boa, o eletrodo é soldável em todas as posições e a penetração é média; as propriedades mecânicas do metal depositado são boas, porém são exigidos os mesmos cuidados que os eletrodos de revestimento ácido no que diz respeito ao metal base.

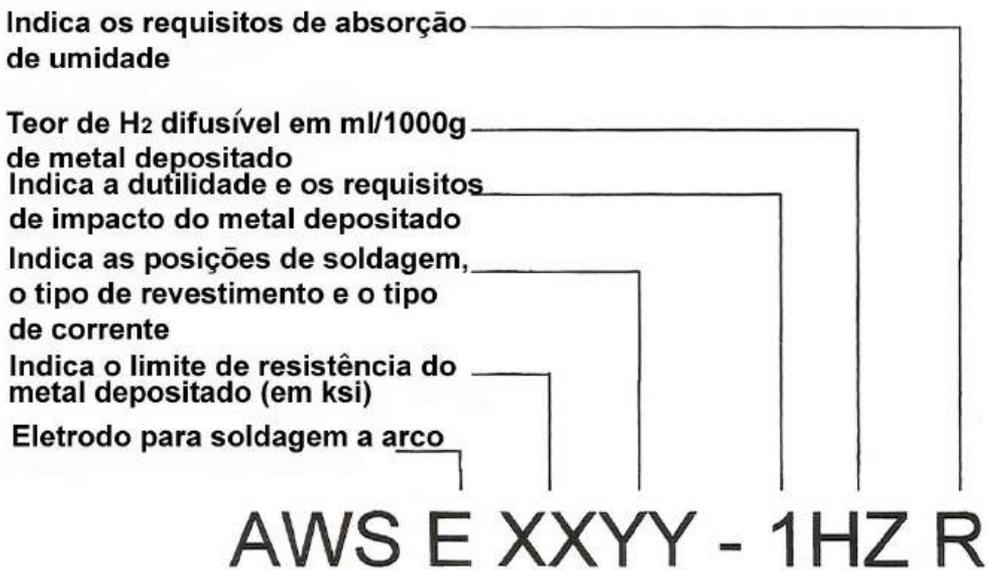
- **revestimento celulósico:** estes eletrodos possuem revestimento com alto teor de materiais orgânicos combustíveis, os quais geram um invólucro de gases protetores quando se decompõem no arco. A escória é pouco abundante, de média dificuldade de remoção, porém o arco é de alta penetração, que é sua característica mais importante. O cordão de solda possui um aspecto bastante medíocre e a perda por respingo é elevada, porém as propriedades mecânicas são bastante boas, com o eletrodo apresentando soldabilidade em todas as posições.

Obs.: É muito comum a utilização de pó de ferro incorporados aos diversos tipos de revestimento, objetivando um aumento no rendimento de metal depositado em relação ao tempo de soldagem. Isto permite um aumento na taxa de deposição do eletrodo, ao mesmo tempo que permite um aumento na corrente de soldagem, pois a adição de pó de ferro torna o revestimento mais resistente à ação do calor; ao mesmo tempo isto dificulta a soldagem fora da posição plana, devido ao maior volume de líquido desenvolvido na poça de fusão.

CLASSIFICAÇÃO DOS ELETRODOS REVESTIDOS CONFORME AWS

Os eletrodos são classificados com base nas propriedades mecânicas e na composição química do metal depositado, no tipo de revestimento, posição de soldagem e tipo de corrente. A classificação da AWS (American Welding Society) utiliza uma série de números e letras que fornecem várias informações a respeito do eletrodo, conforme procedimento abaixo.

Para os eletrodos de aço carbono e aços de baixa liga, a classificação utiliza 4 ou 5 algarismos precedidos da letra E, onde E significa eletrodo. Os primeiros dois (ou três) algarismos se referem à tração mínima exigida e é dado em mil libras por polegada quadrada (ksi). O terceiro (ou quarto) algarismo se refere à posição de soldagem, e o próximo algarismo, que é o último para os eletrodos de aço carbono indica o tipo de revestimento, corrente e polaridade. O sistema opcional desta especificação está mostrado abaixo.



Para os aços de baixa liga, a classificação AWS coloca após o último algarismo um hífen, seguido de um conjunto de letras e números, indicando classes de composição química, relativas aos diversos tipos de ligas.

ÚLTIMO ALGARISMO

Eletrodo	Tipo de Revestimento	Corrente
EXXX10	Celulósico (Sódio)	CC+
EXXX20	Ácido	CC-
EXXXX1	Celulósico (Potássio)	CC+,CA
EXXXX2	Rutílico (Sódio)	CC-,CA
EXXXX3	Rutílico (Potássio)	CC+,CC-,CA
EXXXX4	Rutílico (Pó de Ferro)	CC+,CC-,CA
EXXXX5	Básico (Sódio)	CC+
EXXXX6	Básico (Potássio)	CC+,CA
EXXXX7	Ácido (Pó de Ferro)	CC-,CA
EXXXX8	Básico (Pó de Ferro)	CC+,CA

POSIÇÕES DE SOLDAGEM (penúltimo algarismo):

- 1- Todas
- 2- Plana e horizontal
- 3- Plana

CÓDIGOS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (válido para aços ligas):

Códigos	Significado
A1	Eletrodo de aço carbono-molibidênio (0.40-0.65% Mo)
B1	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (0.40-0.65% Cr e Mo)
B2	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (1.00-1.50% Cr e 0.4-0.65 Mo)
B2L	Idem ao acima, com baixo teor de Carbono (0.005%)
B3	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (2.5% Cr e 1% Mo)
B4L	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (2.25% Cr e 0.65 Mo, baixo Carbono)
B5	Eletrodo de aço cromo-molibidênio (0.6% Cr e 1.25% Mo, traços V)
C1	Eletrodo de aço Níquel (2.00-2.75% Ni)
C2	Eletrodo de aço Níquel (3.00-3.75% Ni)
C3	Eletrodo de aço Níquel (1.10% Ni, Cr<0.15%, Mo<0.35%, V<0.05%)
D1	Eletrodo de aço manganês-molibidênio (1.75% Mn e 0.45% Mo)
D2	Eletrodo de aço manganês-molibidênio (2.00% Mn e 0.45% Mo)
G	Outros tipos de eletrodos de aço baixa liga
M	Especificações militares americanas
P	Eletrodos para soldagem de tubulações
W	Eletrodos resistentes à corrosão atmosférica

ESPECIFICAÇÕES MAIS IMPORTANTES

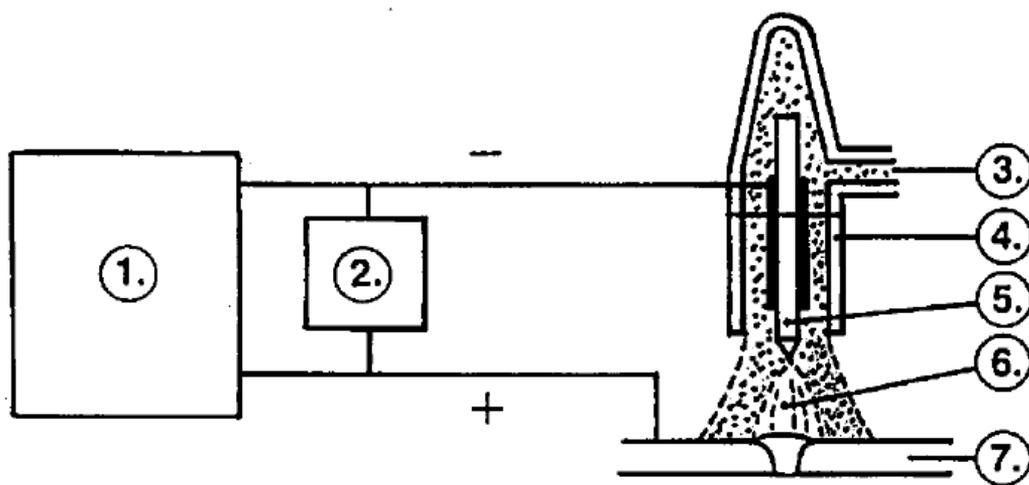
- AWS A 5.1- Eletrodos revestidos para soldagem de aço carbono
- AWS A 5.5- Eletrodos revestidos para soldagem de aço carbono e baixa liga
- AWS A 5.4- Eletrodos revestidos para soldagem de aço inoxidável
- AWS A 5.6- Eletrodos revestidos para soldagem de cobre e suas ligas
- AWS A 5.11- Eletrodos revestidos para soldagem de Níquel e suas ligas
- AWS A 5.13- Eletrodos e varetas para revestimento por soldagem

PROCESSO DE SOLDAGEM TIG (Tungsten Inert Gas) – GTAW

É um processo de soldagem por fusão, a arco elétrico que utiliza o calor gerado pelo arco formado entre o eletrodo de Tungstênio não consumível e a peça que se deseja soldar. A proteção da poça de fusão é conseguida com a adição de um gás inerte ou mistura de gases inertes sobre ela, sendo que o gás também tem a função de transmitir a corrente elétrica quando ionizado durante o processo e ainda auxiliar a resfriar o eletrodo; a soldagem pode ser realizada com ou sem metal de adição.

A abertura do arco pode ser facilitada pela sobreposição de uma corrente de alta frequência, para evitar que se tenha de riscar a peça com o eletrodo de Tungstênio. O arco inicial, obtido pela corrente de alta frequência, ioniza o gás possibilitando a abertura do arco principal.

Esquemática do processo TIG com sobreposição de alta frequência:



- | | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1. Fonte de energia | 5. Eletrodo |
| 2. Unidade de alta frequência | 6. Arco elétrico |
| 3. Gás de proteção | 7. Peça |
| 4. Bocal de gás | |

O eletrodo não consumível utilizado para soldagem é constituído de Tungstênio puro ou ligado a diversos elementos químicos, pois a presença desses elementos de liga aumenta a capacidade de emissão de elétrons, além de permitir uma maior vida útil ao eletrodo.

EWP: Este tipo de eletrodo contém um mínimo de 99,5% de W. Oferece boa estabilidade de arco quando usado com corrente alternada. A ponta do eletrodo se mantém limpa com formato arredondado. Também pode ser usado em corrente contínua, mas neste caso não fornece a iniciação de arco e as características de estabilidade que os ligados oferecem. São eletrodos de baixo custo e são usados principalmente para ligas de alumínio e magnésio. No entanto a capacidade de condução de corrente é inferior aos ligados.

EW Th: Esses eletrodos oferecem melhor iniciação do arco, pois o óxido de tório melhora a qualidade de emissão de elétrons e tem a capacidade de condução de corrente mais elevada, em cerca de 20% em relação ao de tungstênio puro. Normalmente tem uma vida mais longa. Esses eletrodos foram desenvolvidos para as aplicações CCPD. Mantêm uma configuração de ponta afiada durante a soldagem. Raramente são usados em corrente alternada pela dificuldade de manter a ponta arredondada.

EW Ce: Foram introduzidos no mercado americano nos anos 80, para substituir os eletrodos com Tório, pois o Cério não é um elemento radioativo e é elemento abundante da família dos "terras raras". Em relação aos eletrodos de tungstênio puro, apresentam mais facilidade para abrir o arco, oferecem melhor estabilidade de arco e reduz o "burn-off". Os eletrodos EW Ce-2 operam com CA e CC em ambas polaridades.

EW La: Os eletrodos de tungstênio ligados com Lantânio foram desenvolvidos na mesma época daqueles com Cério pela mesma razão de não ser radioativo. As vantagens deste tipo são semelhantes aos de Ce.

EW Zr: Os eletrodos ligados com Zircônio (contém 0,25% de Zr) e as suas características geralmente estão entre aquelas do tungstênio puro e os ligados com tório. Em corrente alternada combina as características de estabilidade de arco e a ponta arredondada com a capacidade de condução de corrente e abertura de arco semelhantes as dos eletrodos com tório. Apresentam uma melhor resistência à contaminação em relação ao de tungstênio puro e são preferidos para aplicações que exigem alta qualidade radiográfica e baixa contaminação de tungstênio.

EWG: Estes eletrodos contêm outros elementos de liga ou aqueles das terras raras em proporções diferentes daqueles existentes com especificação determinada. Podem também ter uma mistura de elementos de liga. O eletrodo serve apenas como ponto focal para o direcionamento do arco, sendo que para não haver fusão do mesmo na temperatura do arco, utiliza-se o Tungstênio, que possui ponto de fusão 3370°C; sua ponta deve ser convenientemente preparada para minimizar o diâmetro do arco conforme esquema a seguir.

$$\lambda = 2 \times D$$

Exemplo:

$$\varnothing \text{ do eletrodo } 1.6. \Rightarrow \lambda = 2 \times 1.6$$

$$\lambda = 3.2 \text{ mm}$$



Nos processos de soldagem da maioria dos materiais procura-se ligar o eletrodo em CC polaridade direta, pois o calor gerado em sua extremidade é menor, comparadamente à polaridade inversa.

Na soldagem do Alumínio, no entanto, muitas vezes utiliza-se a polaridade inversa, mesmo com o risco de fusão do eletrodo, pois para quebrar a camada de óxido de alumínio, de alto ponto de fusão, é necessário que o fluxo de elétrons saia do Alumínio para o eletrodo (fenômeno que recebe o nome de dispersão); melhor que utilizar CC em Alumínio é optar pelo uso de corrente alternada, que quebra a camada de óxido e não aquece em demasia a ponta do eletrodo

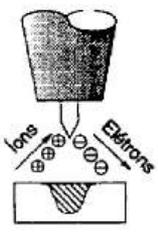
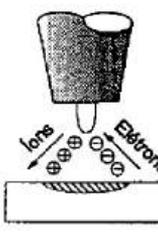
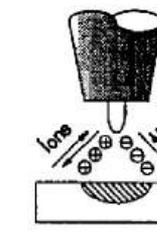
Para soldagem com corrente acima de 130 A devem-se utilizar tochas refrigeradas a água; para correntes menores há tochas de diferentes tamanhos, que devem ser escolhidas em função da aplicação.

É um processo lento, usualmente manual, podendo ser automatizado (taxas de 0,2 a 2 kg/h) e as soldas produzidas são de excelente qualidade; não produz escória, gera poucos respingos, pouca fumaça, pequena Z.T.A. com poucas deformações e pode ser utilizado em

todas as posições. Os cordões de solda são de ótimo acabamento, uniformes, geralmente não requerendo nenhum procedimento de acabamento ou limpeza posterior.

A soldagem TIG é bastante adequada para espessuras finas, pois possibilita o perfeito controle da fonte de calor, sendo que muitas vezes ela é utilizada sem metal de adição, somente caldeando-se as bordas do metal a ser soldado. É muito comum, também utilizar o TIG para o passe de raiz na soldagem de peças espessas e de grande responsabilidade.

É um processo que requer muita habilidade do soldador, uma limpeza perfeita dos metais a serem soldados, além de emitir grande quantidade de radiação ultravioleta. Estas radiações queimam rapidamente as partes da pele expostas, bem como as vistas e ainda tem capacidade de decompor solventes armazenados nas imediações, liberando gases bastante tóxicos; as radiações facilitam a geração de O₃ nas proximidades. Pode-se soldar aços carbono, inoxidáveis, alumínio, magnésio, titânio, cobre, zircônio e outros metais de difícil soldagem, nas espessuras de 0,5 a 50 mm.

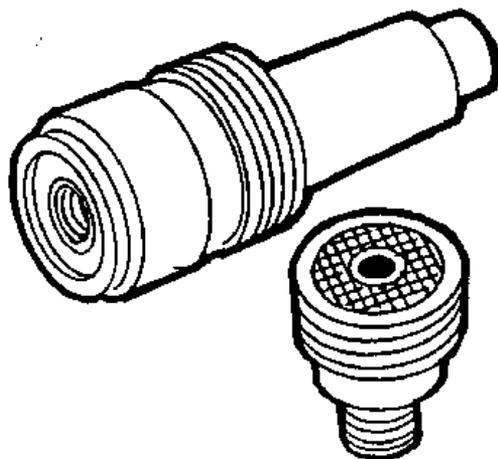
Tipo de corrente	CC -	CC +	CA (Balanceada)
Polaridade de eletrodo	Negativa ou direta	Positiva ou inversa	
Fluxo de elétrons e íons			
Característica de penetração			
Ação de limpeza de óxidos	Não	Sim	Sim, em cada semi-ciclo
Balanco de calor no arco (aprox.)	70 % na peça 30 % no eletrodo	30 % na peça 70 % no eletrodo	50 % na peça 50 % no eletrodo
Penetração	Estreita e profunda	Rasa e Superficial	Média
Aplicação	Aço, Cu, Ag, Aços austeníticos ao Cr - Ni e ligas resistentes ao calor.	Utiliza-se correntes pequenas. Não viável para correntes elevadas.	Al, Mg, e suas ligas.

Os gases de proteção mais utilizados são o Argônio e o Hélio, ou uma mistura de ambos; os gases são direcionados por bocais cerâmicos, metálicos ou por bocais tipo gás-lens, vistos na figura abaixo.

Gas lens

O fluxo de gás pode ser reduzido em aproximadamente 50%.

A ponta do eletrodo pode ser projetada de 15-20mm, para fora do bocal.



O Argônio é o gás mais utilizado, principalmente devido ao menor custo e maior disponibilidade, mas possui outras vantagens:

Arco mais suave e estável, sem turbulências; menor voltagem do arco, para um dado comprimento do arco; menor vazão de gás para uma boa proteção; facilita a abertura do arco (mais ionizável); resiste mais às correntes de ar.

O Hélio é utilizado para soldagem de materiais mais espessos, pois produz mais calor; por ter a densidade menor que a do ar, é utilizado para soldagens sobre cabeça; promove maior penetração do cordão; possui custo mais elevado que o Argônio, pois sua obtenção é difícil.

É bastante utilizada a mistura de Argônio e Hélio para algumas aplicações de soldagem, sendo seu uso bem difundido na soldagem TIG das ligas de alumínio, titânio, cobre e aços inoxidáveis; o objetivo é se beneficiar das melhores características de cada gás, aumentando a largura de fusão e melhorando a aparência do cordão de solda.

Em alguns casos de soldagem são utilizadas misturas especiais, contendo H₂ (aços inoxidáveis). O hidrogênio atua com um agente redutor inibindo a formação de óxidos, o que resulta em superfícies mais limpas e também aumenta a energia do arco para uma determinada corrente, aumentando a penetração.

O nitrogênio é frequentemente utilizado como gás de purga ou de proteção da raiz evitando contaminação com o ar atmosférico. Atualmente é utilizado em adições menores do que 3% em combinação com Argônio nos processos TIG e MIG para a soldagem de aços inoxidáveis duplex. Não é recomendado para a soldagem de aços carbono e baixa liga.

A especificação AWS A 5.32 se aplica aos gases de proteção utilizados nos processos de soldagem TIG. Os gases de proteção podem ser de um único tipo de gás (puro) ou de mistura de gases. A AWS A 5.32 identifica os componentes individuais dos gases como: A – Argônio ; He – Hélio ; H – Hidrogênio ; N – Nitrogênio.

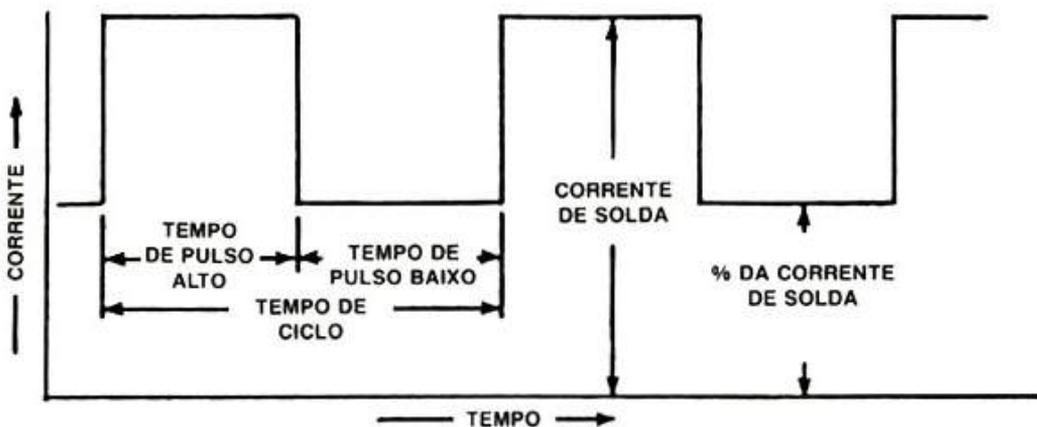
Especificação AWS A 5.32 para Misturas Típicas de Gases de Soldagem

Classificação AWS	Mistura Típica de Gás (%)	Gases de Proteção
SG-AHe-10	90/10	Argônio + Hélio
SG-AH-5	95/5	Argônio + Hidrogênio
SG-HeA-25	75/25	Hélio + Argônio
SG-A-G	Especial	Argônio + Mistura

Como se podem utilizar todas as formas de corrente para soldagem TIG, normalmente se utiliza um transformador/retificador que pode fornecer tanto CC como CA. Trata-se de máquinas especialmente desenvolvidas para soldagem TIG e que incorporam as unidades de controle de fluxo de gás protetor e de geração de corrente de alta frequência. Foram lançados no mercado equipamentos para soldagem automática de tubos, recebendo o processo a denominação de TIG ORBITAL (pelo fato de realizar o cordão de solda automaticamente em 360°).

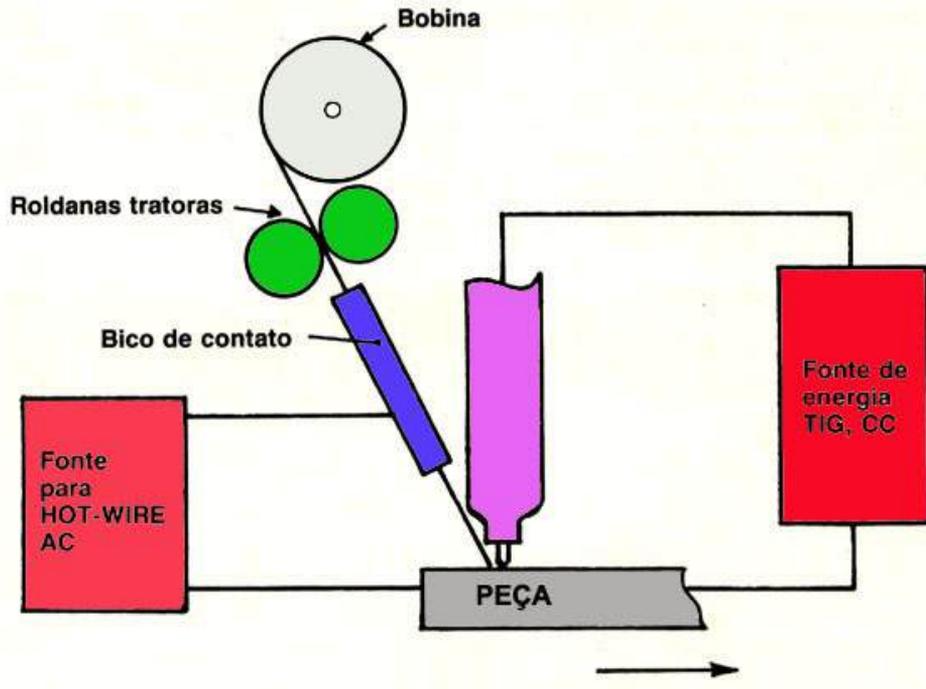
Recentemente desenvolveram-se equipamentos ainda mais específicos que incorporam uma unidade de programação e que fornece CC pulsada com frequência na faixa de 1 a 10 Hz; tal equipamento é normalmente utilizado em aplicações automatizadas.

A principal vantagem da corrente pulsada é permitir uma combinação da força, boa penetração e fusão do pulso, enquanto mantém a área de soldagem relativamente fria. Assim, é possível obter maiores penetrações do que em corrente contínua constante e trabalhar com materiais mais sensíveis ao aporte de calor com minimização das distorções.



As varetas ou arames de metal de adição para TIG tem basicamente a mesma composição química dos materiais base; nenhuma reação química é esperada que ocorra na poça de fusão.

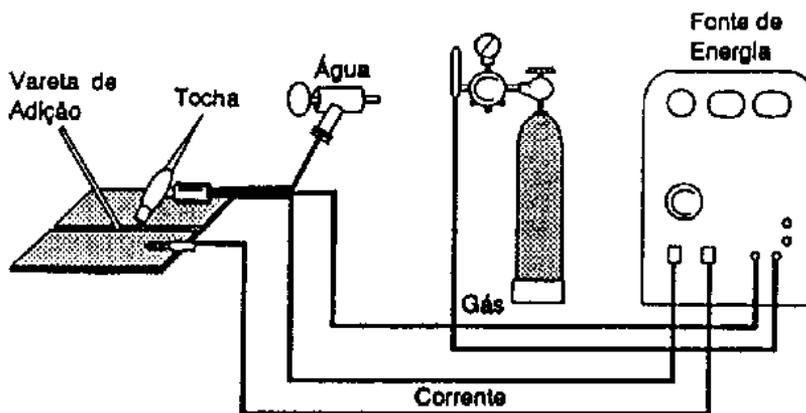
Nas aplicações automáticas pode se utilizar o processo adicional HOT-WIRE, com pré-aquecimento do arame eletrodo.



As varetas são utilizadas para os processos manuais, disponíveis em comprimento em torno de 1 m. Para os processos de alimentação automática se utilizam rolos de arame, similares ao do MIG, enrolados em bobinas de diferentes capacidades, com diâmetros variando entre 0,5 e 5 mm, aproximadamente.

Equipamentos de Soldagem

- Porta-eletrodo com passagem de gás e bico para direcionar o gás ao redor do arco, com mecanismo de garra para energizar e conter o eletrodo de Tungstênio.
- Suprimento de gás protetor.
- Indicador de vazão e regulador-reductor de pressão de gás.
- Fonte de energia.
- Suprimento de água de refrigeração se a pistola é refrigerada a água.



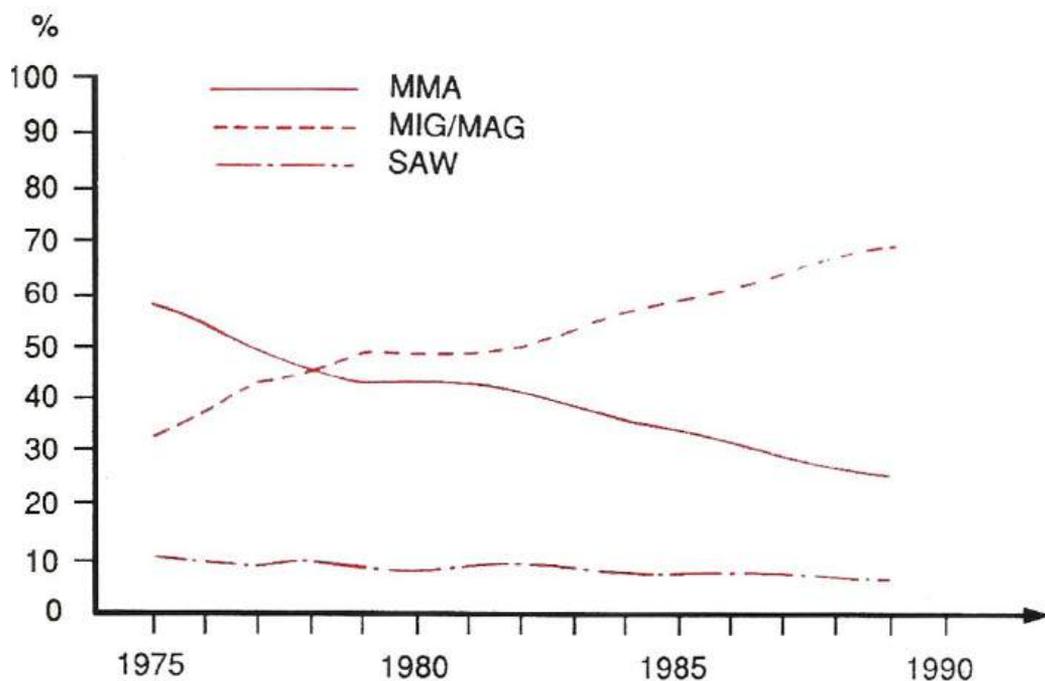
PROCESSO MIG/MAG (METAL INERT GAS/METAL ACTIVE GAS)

MIG é um processo por fusão a arco elétrico que utiliza um arame eletrodo consumível continuamente alimentado à poça de fusão e um gás inerte para proteção da região de soldagem. MAG é um processo de soldagem semelhante ao MIG, porém utilizando um gás ativo (CO₂) para proteção da região de soldagem. Em ambos os processos geralmente o metal de adição possui a mesma composição química do metal base. O processo MIG baseou-se no processo TIG, iniciando com a soldagem do Alumínio e posteriormente estendeu-se à soldagem dos aços inoxidáveis, ao se notar que uma pequena adição de O₂ ao gás inerte facilitava a abertura do arco.

Posteriormente ao processo MIG, desenvolveu-se o MAG para baratear custos e concorrer com os eletrodos revestidos na maioria das aplicações, utilizando-se CO₂ e mistura de gases como gás de proteção; o primeiro desenvolvimento para o MAG ficou conhecido como subprocesso MACRO-ARAME.

Pelo fato das dificuldades deste subprocesso trabalhar com pequenas espessuras e soldar em todas as posições, desenvolveu-se a seguir o subprocesso MICRO-ARAME (para diâmetros até 1,2 mm); na seqüência do desenvolvimento e visando a minimização dos respingos e melhoria do formato do cordão, desenvolveu-se o subprocesso ARAME-TUBULAR (até diâmetro de 4 mm).

Todas estas melhorias permitiram um aumento na velocidade de soldagem do processo MIG/MAG em relação a outros processos, e isso vem refletindo-se na evolução da utilização do mesmo, comparativamente aos processos mais antigos, conforme quadro abaixo:

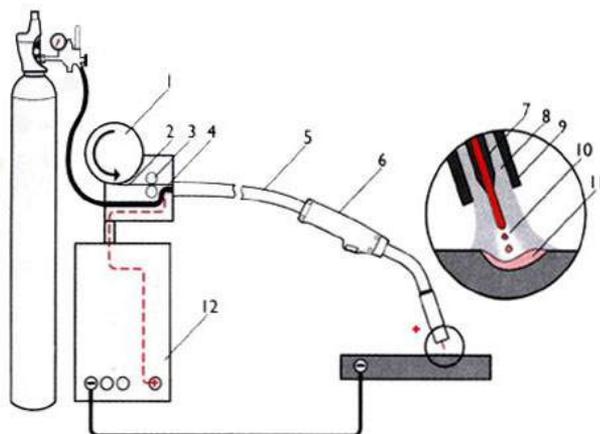


Comparação da utilização dos vários métodos de soldagem na Europa: Arco Submerso (SAW), Eletrodo Revestido (MMA) e MIG/MAG (incluindo arames sólidos e tubulares).

PRINCÍPIO DO PROCESSO MIG/MAG

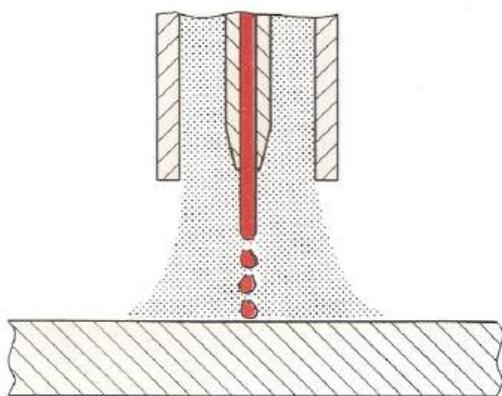
O calor gerado para fundir o metal de enchimento é suficiente para fundir também as superfícies do metal base.

A transferência do material do arco é bastante melhorada comparando-se ao processo TIG devido ao aumento da eficiência do ganho de calor causado pela presença no arco das partículas de material superaquecido. As partículas funcionam como elementos importantes no processo de transferência de calor, sendo que a transferência de material se processa a uma taxa de várias centenas de gotículas por segundo.

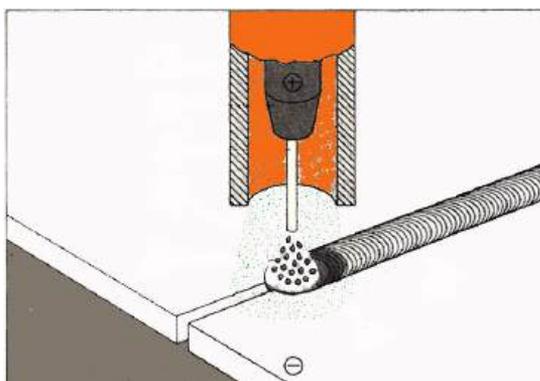


Princípio do processo MIG/MAG: 1. Carretel ou tambor 2. Eletrodo 3. Roletas de tração 4. Guia do arame 5. Conjunto de mangueiras 6. Pistola de soldagem 7. Bico de Contato 8. Gás de proteção 9. Bocal do Gás de proteção 10. Arco elétrico 11. Poça de fusão 12. Fonte de energia.

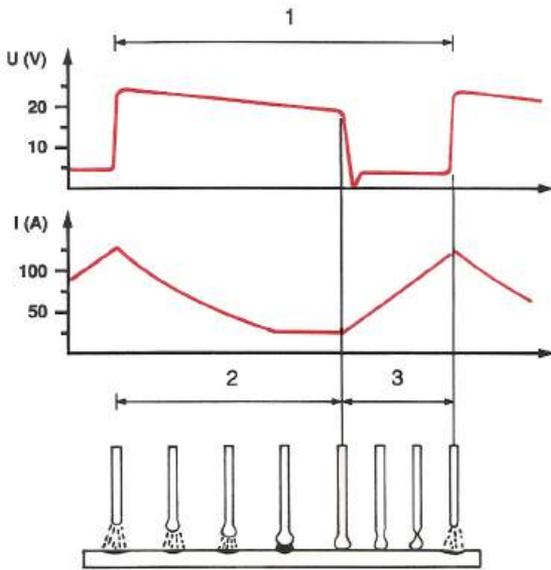
Existem basicamente quatro tipos de transferência de material na soldagem MIG/MAG:



- a) GLOBULAR (MAG = Macro Arame/ Arame Tubular)
- Gotas de grandes dimensões a baixas velocidades
 - Utiliza altas correntes e arcos longos (75 a 900 A)



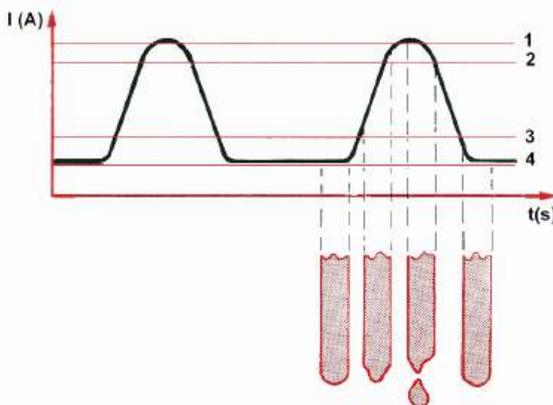
- b) JATO OU SPRAY (MIG)
- Gotas finas e altas velocidades
 - Utiliza altas correntes e altas voltagens (50 a 600 A)



Uma gota de metal fundido é formada no fim do eletrodo. Quando ela se torna suficientemente grande para entrar em contato com a poça de fusão, o arco sofre um curto circuito. Isto eleva a corrente de soldagem e a corrente é liberada, permitindo que o arco seja ignitado novamente. O aumento da corrente causado pelo curto circuito gera respingos. 1.Ciclo do curto circuito. 2.Período do arco. 3.Período do curto circuito.

c) CURTO CIRCUITO (Micro Arame)

- Transferências sucessivas por curto circuitos
- Utiliza baixa corrente e arcos curtos (25 a 200 A)



Princípio do arco pulsado. 1.Pico da corrente de pulso. 2.Corrente de transição. 3.Corrente média de soldagem. 4.Corrente de base.

d) ARCO PULSANTE (Em Operações Automatizadas)

- Arco mantido por uma corrente baixa principal com sobreposição de pulsos de alta corrente e transferência por spray durante os pulsos.

A soldagem MIG pode ser usada em ampla faixa de espessuras, em materiais ferrosos e não ferrosos como Alumínio, Cobre, Magnésio, Níquel e suas ligas. O processo MAG é utilizado apenas na soldagem de materiais ferrosos, tendo como gás de proteção o CO₂ ou misturas ricas nesse gás.

De um modo geral pode-se dizer que as principais vantagens da soldagem MIG/MAG são: alta taxa de deposição, alto fator de trabalho do soldador, grande versatilidade de espessuras aplicáveis, inexistência de fluxos de soldagem, ausência de remoção de escória e exigência de menor habilidade do soldador, quando comparado com eletrodos revestidos.

A principal limitação da soldagem MIG/MAG é sua maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação de soldagem, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado. Além disso deve ser ressaltado o alto custo do equipamento, a grande emissão de radiação ultra violeta, maior necessidade de manutenção em comparação com os equipamentos para soldagem de eletrodos revestidos e menor variedade de consumíveis.

CONSUMÍVEIS DO PROCESSO

GASES

Os gases de proteção utilizados nos processos de soldagem a arco elétrico podem ser Inertes ou Reativos. Os gases de proteção inertes são os considerados que não reagem com o metal líquido da poça de fusão. Os gases inertes mais utilizados na soldagem são Argônio e Hélio.

Os gases de proteção reativos são os considerados que reagem com o metal líquido da poça de fusão, podendo alterar as propriedades metalúrgicas e mecânicas do metal de solda. Estes gases podem ser ativos ou redutores. Os gases ativos utilizados na soldagem são o CO₂ - Dióxido de Carbono e Oxigênio. O gás redutor que pode ser utilizado na soldagem é o Hidrogênio - H₂.

A especificação AWS A 5.32 se aplica aos gases de proteção utilizados nos processos de soldagem MIG/MAG, TIG, ARAME TUBULAR e PLASMA. Os gases de proteção podem ser de um único tipo de gás (puro) ou de mistura de gases.

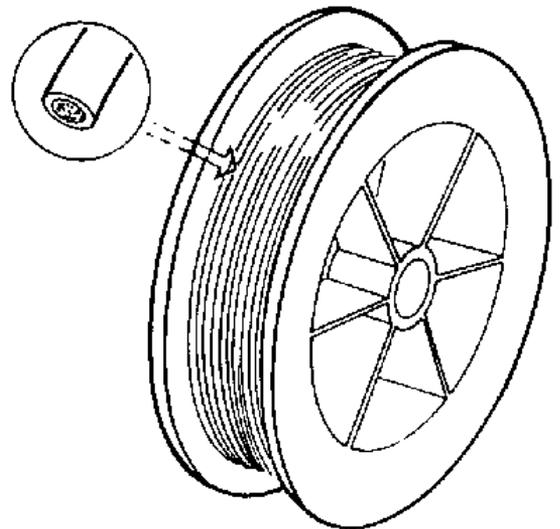
A AWS A 5.32 identifica os componentes individuais dos gases como:

- A – Argônio ;**
- C – CO₂ - Dióxido de Carbono;**
- He – Hélio ;**
- H – Hidrogênio ;**
- N – Nitrogênio ;**
- O – Oxigênio.**

METAIS DE ADIÇÃO

Para MIG/MAG, os eletrodos consumíveis consistem de um arame contínuo em diâmetros que variam de 0,6 a 2,4 mm (arame tubular até 4 mm), usualmente em rolos de 12 a 15 kg, existindo no mercado rolos de até 200 kg. Os arames são normalmente revestidos com uma fina camada de Cobre para melhor contato elétrico com o tubo de contato da pistola e para prevenir a ocorrência de corrosão na estocagem.

Há arames de adição sólidos ou tubulares sendo que estes últimos são recheados de fluxos que possuem as mesmas características e funções dos revestimentos dos eletrodos revestidos. Esses arames tubulares podem ser utilizados com proteção gasosa ou ser do tipo autoprotégido, sem o uso de gases. Neste caso o fluxo contido dentro do arame gera o gás de proteção da poça de fusão, a formação de escória, a desoxidação da poça e a estabilização do arco.

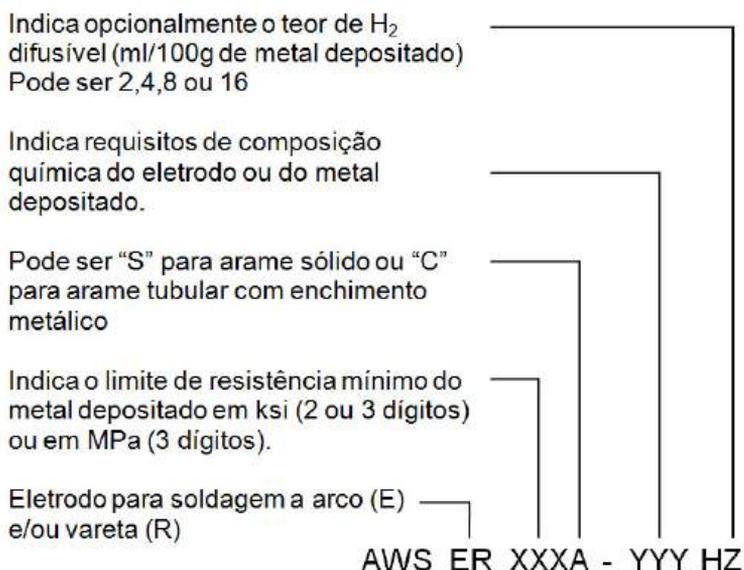


Rolo de arame tubular (observar detalhe)

A tabela abaixo relaciona as especificações AWS de arames para soldagem MIG/MAG de diferentes materiais.

Material	Nº da especificação
Arames de Cobre e suas ligas	A 5.7
Arames de Aços inoxidáveis	A 5.9
Arames de Alumínio e suas ligas	A 5.10
Arames de Níquel e suas ligas	A 5.14
Arames para soldagem de Ferro fundido	A 5.15
Arames de Titânio e suas ligas	A 5.16
Arames e arames tubulares de Aço carbono com pó interno	A 5.18
Arames de Magnésio e suas ligas	A 5.19
Arames tubulares de Aço carbono com fluxo interno	A 5.20
Arames para Revestimento	A 5.21
Arames tubulares para soldagem de Aços inoxidáveis	A 5.22
Arames para soldagem de Zircônio	A 5.24
Arames de Aços de baixa liga	A 5.28

A principal especificação para os arames-eletrodos é a AWS A 5.18 que prescreve os requerimentos para a classificação de eletrodos sólidos ou compostos (arame tubular com núcleo metálico – metal cored) e varetas para os processos MIG/MAG (GMAW), TIG (GTAW) e PLASMA (PAW) na soldagem de aço carbono. A classificação dos arames para soldagem de aços pelas especificações AWS A 5.18 e A 5.28, que engloba os arames sólidos e os arames com enchimento metálico, tem o formato abaixo.



Resistência Mecânica do metal de solda

Classificação	Gás de Proteção	Limite de Resistência		Limite de Escoamento		Alongamento % mínimo
		psi	MPa	psi	MPa	
ER 70S-2 a7	CO2	70.000	480	58.000	400	22
ER 70S-B2L	Ar/1-5%O2	75.000	515	58.000	400	19
ER70C-B2L						
ER 80S e 80C						
ER 90S e 90C						
ER 100S						
ER 110S ou 110C						
ER 120S ou 120C	120.000	830	105.000	730	14	

Requisitos de composição química para o arame ou metal de solda (% peso)

Classificação	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER 70S-2	0,07	0,9-1,4	0,40-0,70	0,025	0,035	0,15	0,25-0,55	0,25-0,55	0,03	0,50
ER 70S-3	0,06-1,15	0,9-1,4	0,45-0,75							
ER 70S-4	0,06	1,0-1,15	0,65-0,85							
ER 70S-6	0,06	1,4-1,8	0,80-1,15							
ER 70S-7	0,06	1,5-2,0	0,50-0,80							
ER 70S-G	Não especificado									
ER 80S-B2	0,07-0,12	0,4-0,70	0,4-0,70	0,025	0,025	0,20	1,2-1,15	0,40-0,65	-	0,35
ER 80S-B6	0,10	0,4-0,70	0,4-0,70			0,60	4,5-6,0	0,40-0,65	-	0,35
ER 90S-B9	0,07-0,13	1,25	0,15-0,30	0,010	0,010	1,0	8,0-9,5	0,80-1,10	0,15-0,25	0,20
ER 100S-1	0,08	1,2-1,8	0,2-0,55			1,4-2,1	0,30	0,25-0,55	0,5	0,25
ER 110S-1	0,09	1,4-1,8	0,20-0,55			1,9-2,6	0,50	0,25-0,55	0,4	
ER 120S-1	0,10	1,4-1,8	0,25-0,60			2,0-2,8	0,60	0,30-0,65	0,3	
ER 70C-3X	0,12	1,75	0,90	0,030	0,030	0,50	0,20	0,30	0,08	0,50
ER 80C-B2	0,05-0,12	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	1,0-1,5	0,40-0,65	-	0,35
ER 80C-B3L	0,05	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	2,0-2,5	0,90-1,20	-	0,35
ER 90C-B3	0,05-0,12	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	2,0-2,5	0,90-1,20	0,15-0,25	0,35

GENERALIDADES:

Ao contrário da soldagem TIG, a maior parte dos casos de soldagem MIG/MAG utiliza a CCPI, ficando a utilização da CCPD apenas para os casos de deposição superficial do material de adição e aplicações onde a penetração não é importante.

Corrente	RESULTADOS				
	Tamanho de Gota	Penetração	Velocidade de Transferência	Quantidade de Respingos	Dispersão dos Óxidos
CCPI	Pequena	Alta	Alta	Pouca	Ocorre
CCPD	Grande	Baixa	Baixa	Grande	Não ocorre

EQUIPAMENTOS

Os principais componentes do sistema são:

- A máquina de soldar (Fonte de energia)
- A unidade de alimentação de arame com seus controles (Cabeçote)
- A pistola de soldagem com seus cabos
- O gás protetor e seu sistema de alimentação
- O arame eletrodo

Fontes de corrente contínua e de tensão constante são empregadas na maioria dos casos de soldagem MIG/MAG. Essa característica contrasta com as fontes de corrente constante utilizadas na soldagem TIG e com eletrodos revestidos. Uma fonte MIG/MAG proporciona uma tensão do arco relativamente constante durante a soldagem. Essa tensão determina o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação brusca da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança momentânea da tensão do arco, a fonte aumenta ou diminui abruptamente a corrente (e, portanto, a taxa de fusão do arame) dependendo da mudança no comprimento do arco. A velocidade de alimentação do arame que o operador seleciona antes da soldagem determina a corrente de

soldagem. Esse parâmetro pode ser alterado sobre uma faixa considerável antes que o comprimento do arco mude o suficiente para fazer o arame tocar na peça ou queimar o bico de contato. A fonte de soldagem também pode ter um ou dois ajustes adicionais para uso com outras aplicações de soldagem (por exemplo, controle de indutância).

O motor de alimentação de arame e o controle de soldagem são freqüentemente fornecidos em um único módulo — o alimentador de arame. Sua principal função é puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco. O controle mantém a velocidade predeterminada do arame a um valor adequado à aplicação. O controle não apenas mantém a velocidade de ajuste independente do peso, mas também regula o início e fim da alimentação do arame a partir do sinal enviado pelo gatilho da tocha.

O gás de proteção, a água e a fonte de soldagem são normalmente enviados à tocha pela caixa de controle. Pelo uso de válvulas solenóides os fluxos de gás e de água são coordenados com o fluxo da corrente de soldagem. O controle determina a seqüência de fluxo de gás e energização do contator da fonte. Ele também permite o pré e pós-fluxo de gás. Muitas vezes o

alimentador trabalha distante da fonte elétrica, permitindo ao soldador o controle local das variáveis do processo.



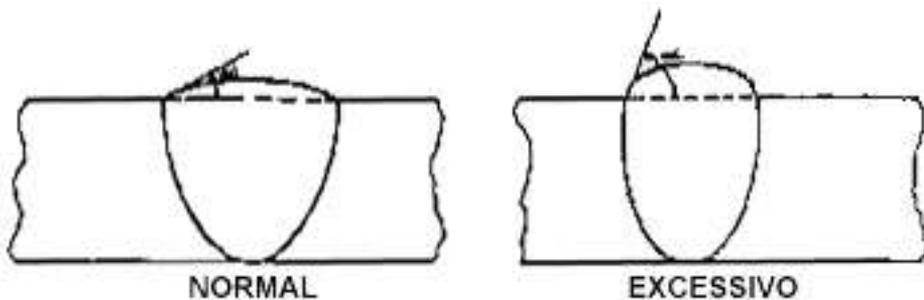
Exemplo de uma fonte de potência para solda (Máquina de soldar)

Defeitos de operação de soldagem

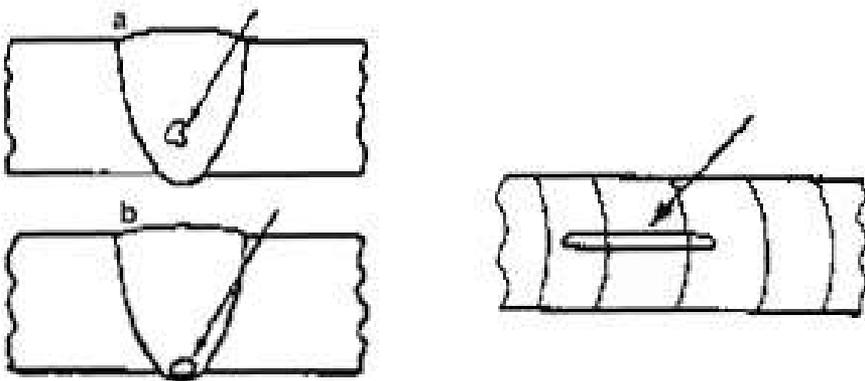
DESCONTINUIDADES MAIS FREQUENTES NAS OPERAÇÕES DE SOLDAGEM

Podemos definir descontinuidade como sendo uma interrupção das estruturas típicas de uma junta soldada, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. De acordo com as exigências de qualidade da junta soldada, uma descontinuidade pode ser considerada um defeito, exigindo ações corretivas. Abaixo temos algumas descontinuidades mais comuns encontradas nas operações de soldagem, e eventuais cuidados para evitar o surgimento das mesmas.

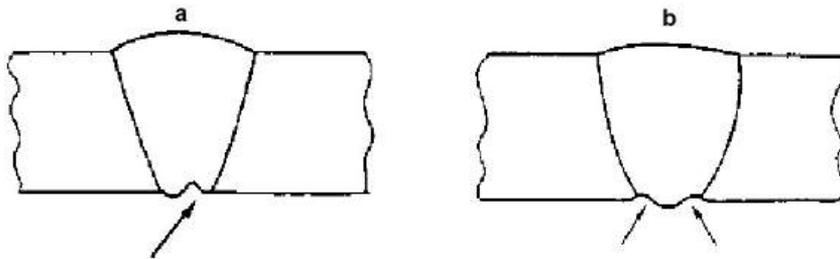
Abertura de arco – É uma imperfeição local na superfície do metal de base resultante da abertura do arco elétrico.



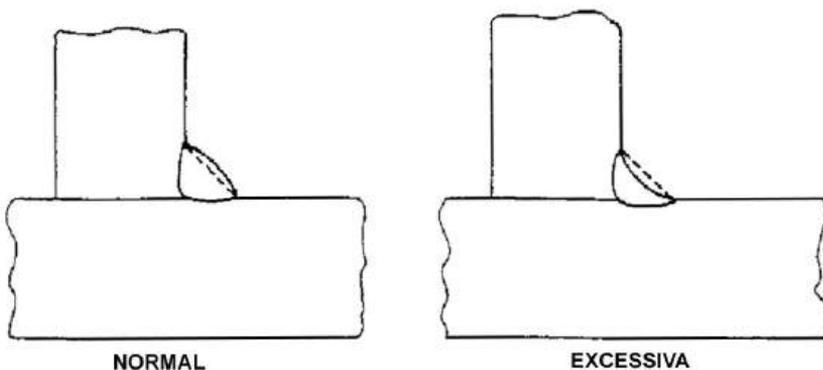
Ângulo excessivo de reforço – É um ângulo excessivo entre o plano da superfície do metal de base e o plano tangente ao reforço da solda, traçado a partir da margem da solda (Fig. 1). É causado por excesso de material de solda no acabamento.



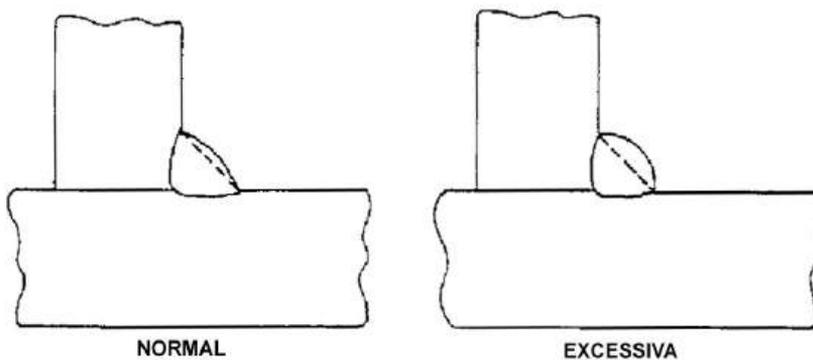
Cavidade alongada – Vazio não arredondado com a maior dimensão paralela ao eixo da solda, podendo estar localizado na solda (Fig. 2a); ou na raiz da solda (Fig. 2b). Pode ser causado por excesso de velocidade de soldagem.



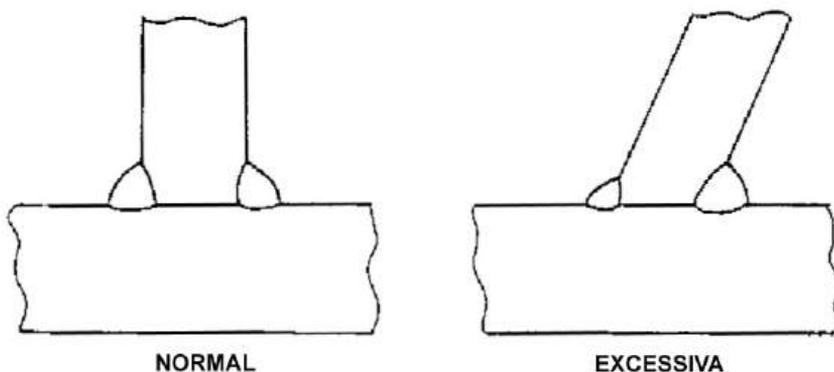
Concavidade – reentrância na raiz da solda, podendo ser: central, situada ao longo do centro de cordão (Fig. 3a); ou lateral, situada nas laterais do cordão (Fig. 3b). Geralmente é causada por movimentação rápida do eletrodo.



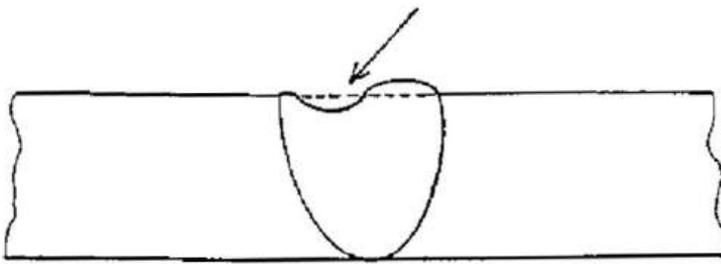
Concavidade – reentrância na raiz da solda, podendo ser: central, situada ao longo do centro de cordão (Fig. 3a); ou lateral, situada nas laterais do cordão (Fig. 3b). Geralmente é causada por movimentação rápida do eletrodo.



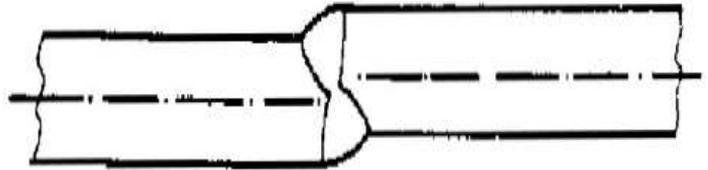
Concavidade – reentrância na raiz da solda, podendo ser: central, situada ao longo do centro de cordão (Fig. 3a); ou lateral, situada nas laterais do cordão (Fig. 3b). Geralmente é causada por movimentação rápida do eletrodo.



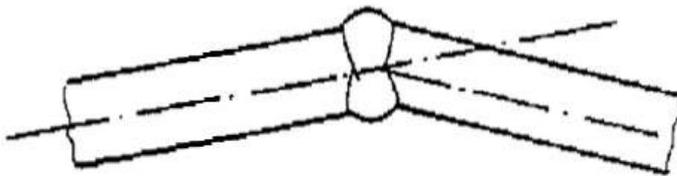
Deformação angular – Distorção angular da junta soldada em relação à configuração de projeto (Fig. 6), exceto para junta soldada de topo (Ver embicamento).



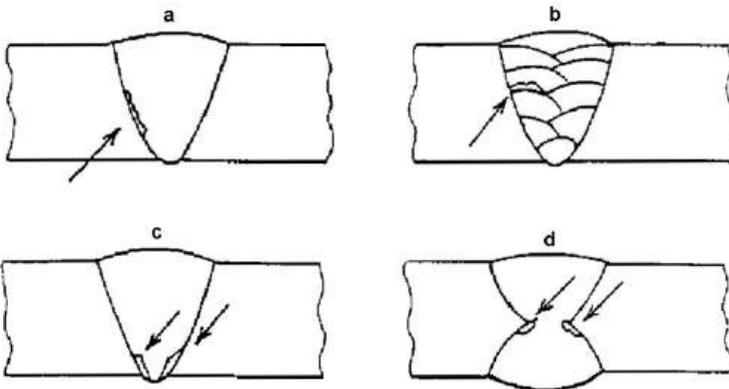
Deposição insuficiente – Insuficiência de metal na face da solda



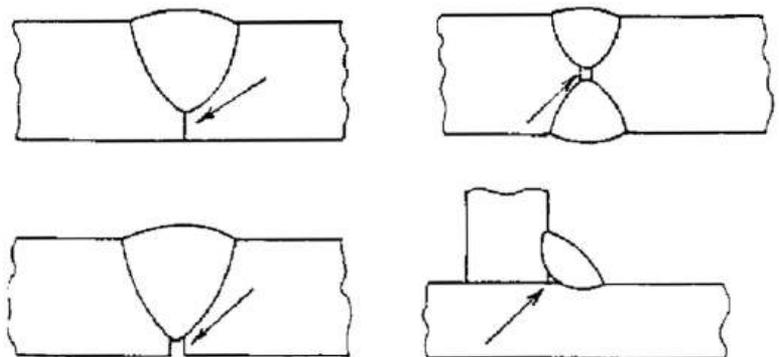
Desalinhamento – Junta soldada de topo, cujas superfícies das peças, embora paralelas, apresentam-se desalinhas, excedendo à configuração de projeto



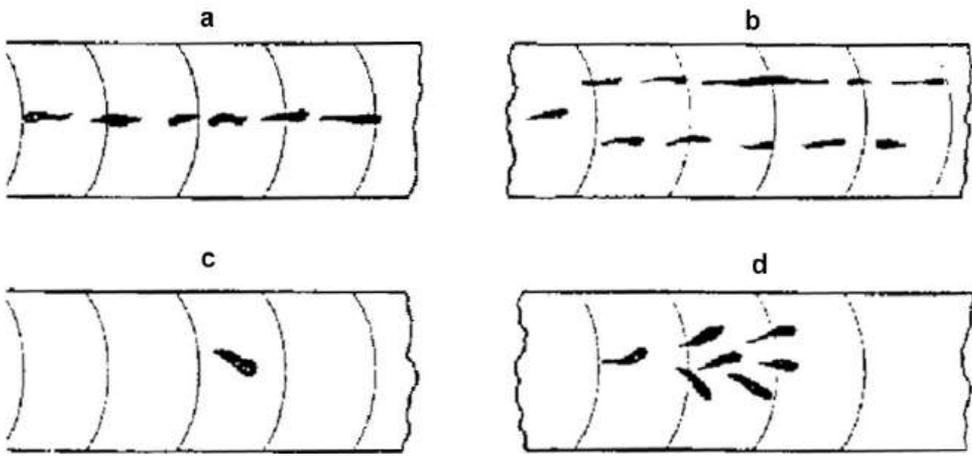
Embicamento – É uma deformação angular de uma junta soldada de topo



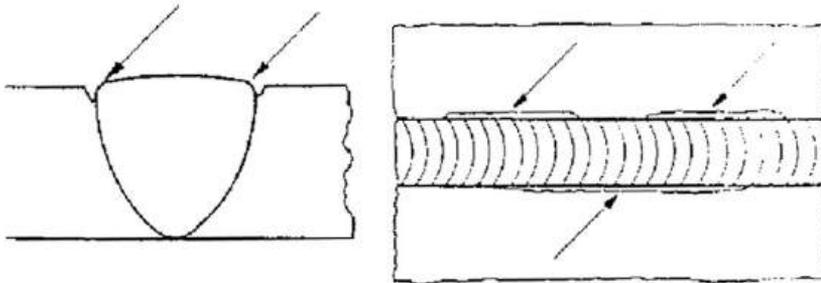
Falta de fusão – É uma fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base, ou entre passes da zona fundida, podendo estar localizada: na zona de ligação (Fig. 10a); entre os passes (Fig. b) ou na raiz da solda (Fig. c e d)



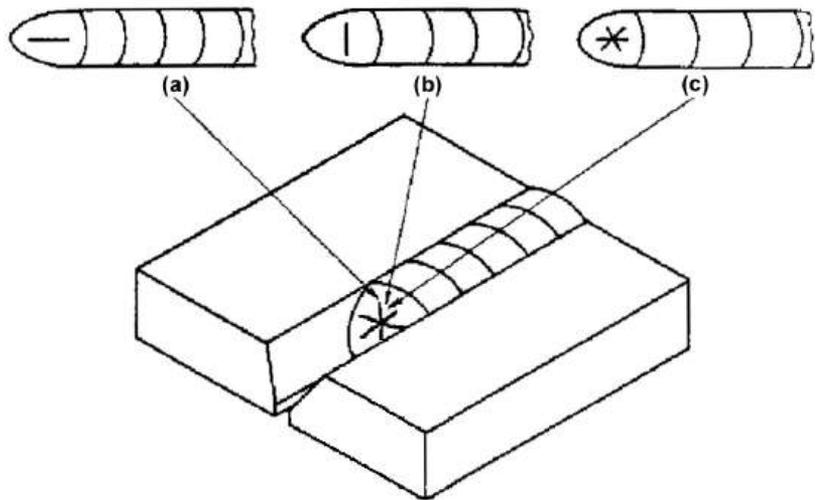
Falta de penetração – Insuficiência de metal na raiz de solda (Fig. 11). As causas mais comuns deste tipo de defeito são: manipulação incorreta do eletrodo, junta mal preparada (ângulo de chanfro ou abertura de raiz pequenos), corrente de soldagem insuficiente, velocidade de soldagem muito alta e diâmetro de eletrodo muito grande.



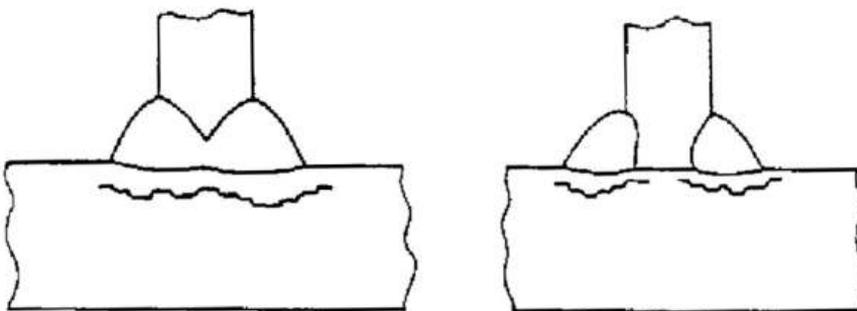
Inclusão de escória – Material não metálico retido na zona fundida, podendo ser: alinhada (Fig. a e b); isolada (Fig. c); ou agrupada (Fig. d)



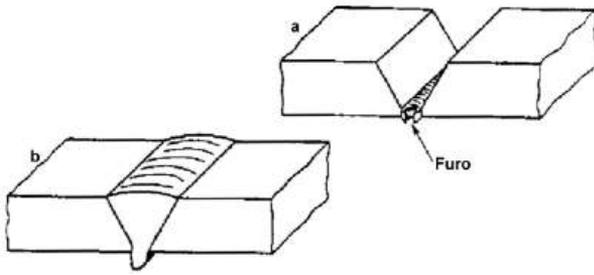
Mordedura – Depressão sob a forma de entalhe, no metal de base acompanhando a margem da solda



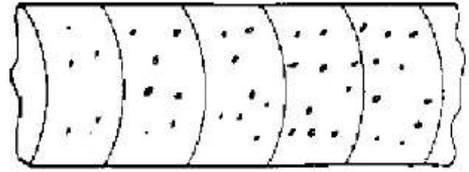
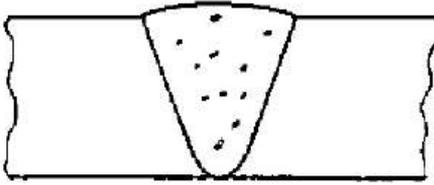
Trinca de cratera – Trinca localizada na cratera do cordão de solda, podendo ser: longitudinal (Fig. a), transversal (Fig. b) ou em estrela



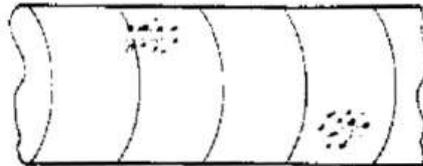
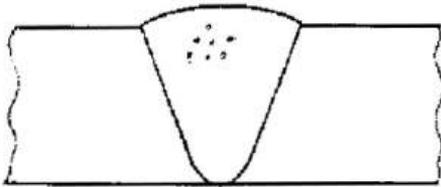
Trinca interlamelar – Trinca em forma de degraus, situados em planos paralelos à direção de laminação, localizada no metal de base, próxima à zona fundida



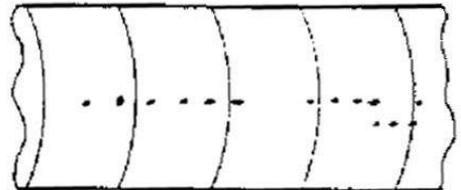
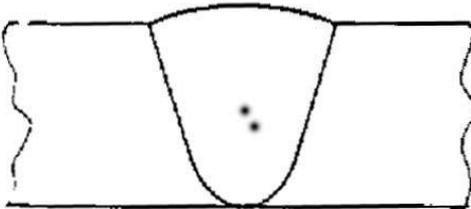
Perfuração – Furo na solda (Fig.a) ou penetração excessiva localizada (Fig. b) resultante da perfuração do banho de fusão durante a soldagem



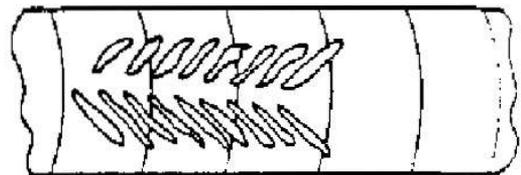
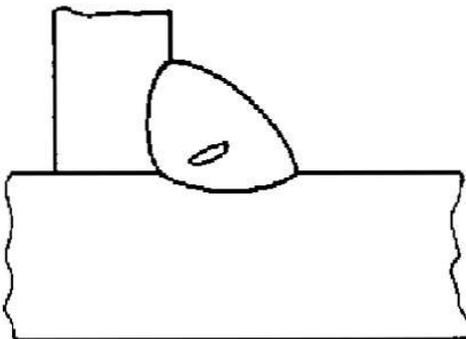
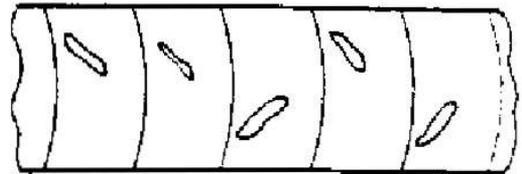
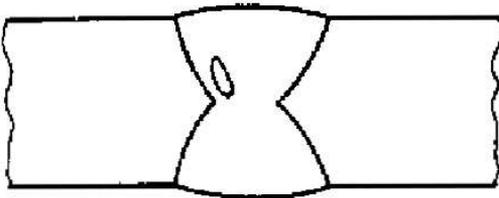
Porosidade – Conjunto de poros distribuídos de maneira uniforme, porém não alinhados



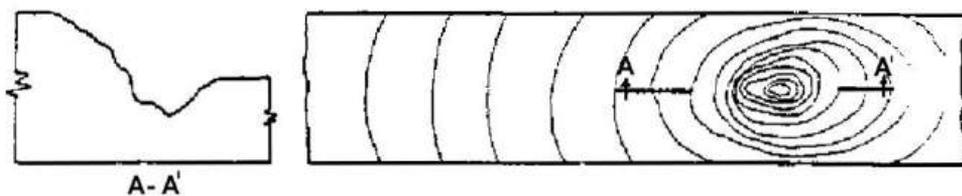
Porosidade agrupada – Conjunto de poros agrupados



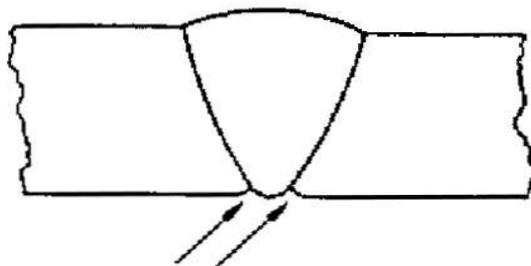
Porosidade alinhada – Conjunto de poros dispostos em linha, segundo uma direção paralela ao eixo longitudinal da solda



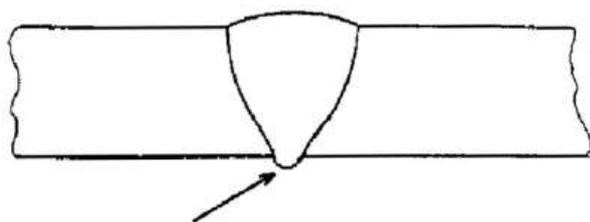
Porosidade vermiforme – Conjunto de poros alongados ou em forma de espinha de peixe situados na zona fundida



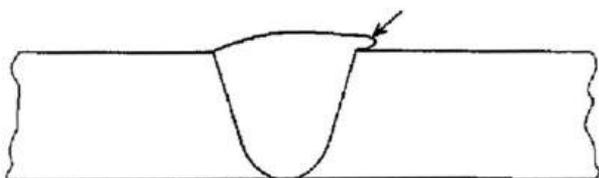
Rechupe de cratera – Falta de metal resultante da contração da zona fundida, localizada na cratera do cordão de solda



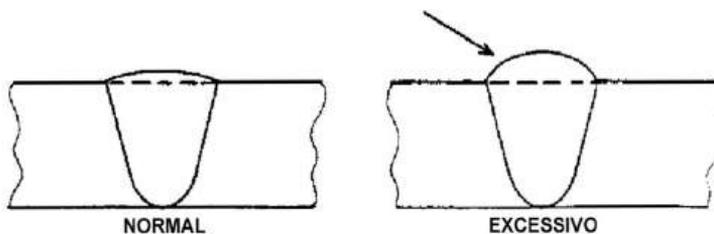
Mordedura na raiz – Mordedura localizada na margem da raiz da solda



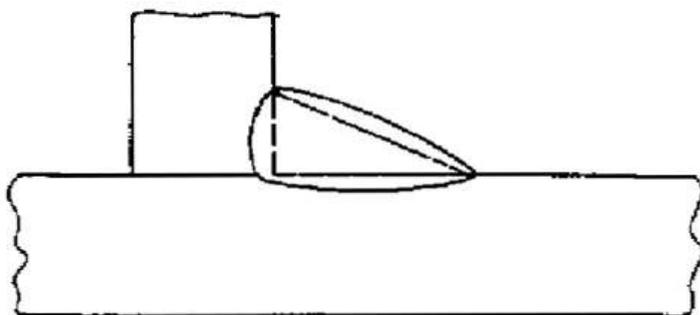
Penetração excessiva – Metal da zona fundida em excesso na raiz da solda



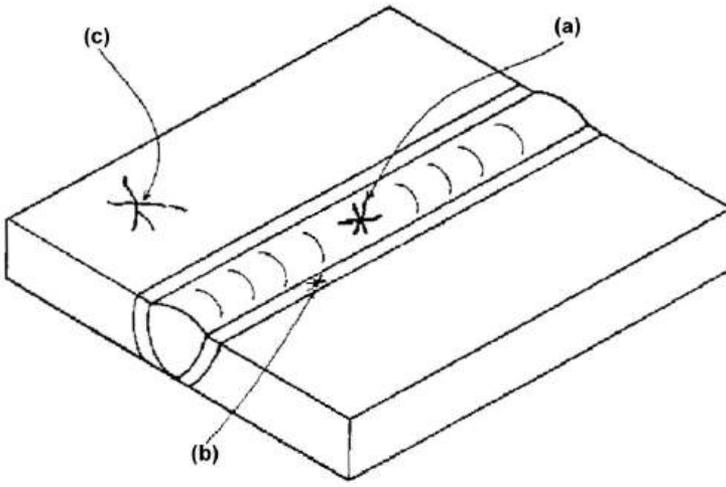
Sobreposição – Excesso de metal da zona fundida sobreposto ao metal de base na margem da solda, sem estar fundido ao mesmo. É geralmente causado por uma alta taxa de deposição



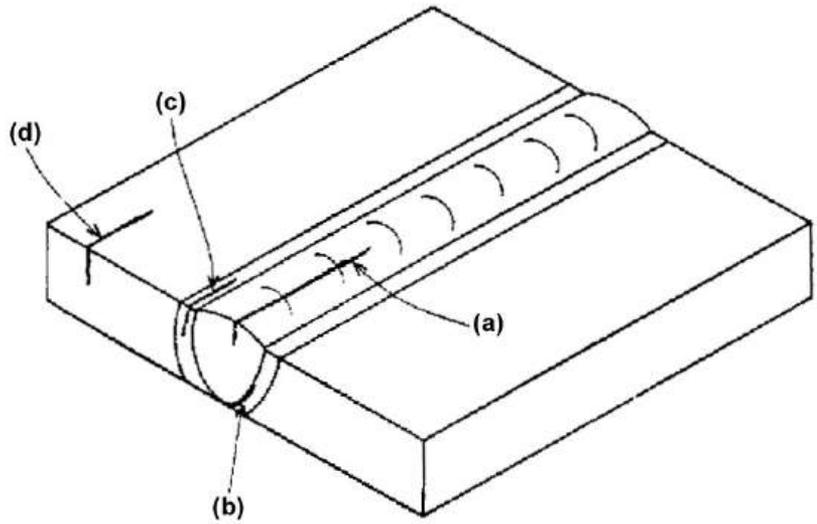
Reforço excessivo – Excesso de metal da zona fundida, localizado na face da solda. É causado por excesso de material no acabamento



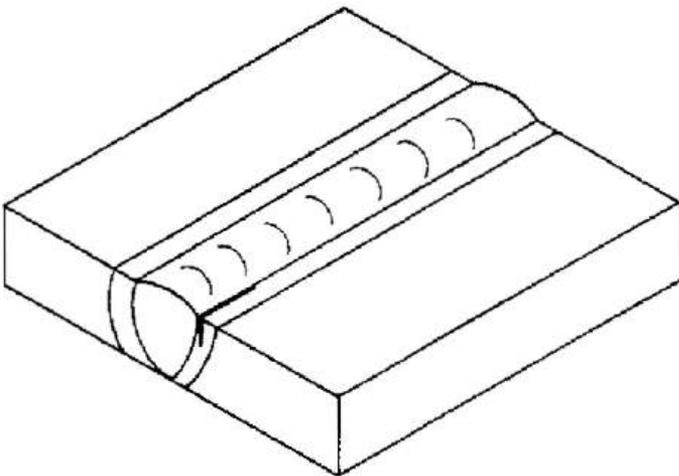
Solda em ângulo assimétrica – Solda em ângulo, cujas pernas são significativamente desiguais em desacordo com a configuração de projeto



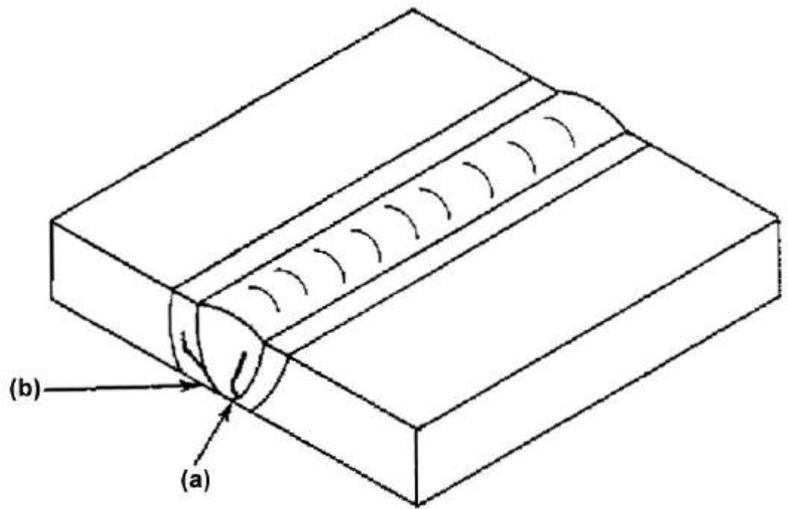
Trinca irradiante – Conjunto de trincas que partem de um mesmo ponto, podendo estar localizadas: na zona fundida (Fig.a); na zona termicamente alterada (Fig. b) ou no metal de base (Fig. c)



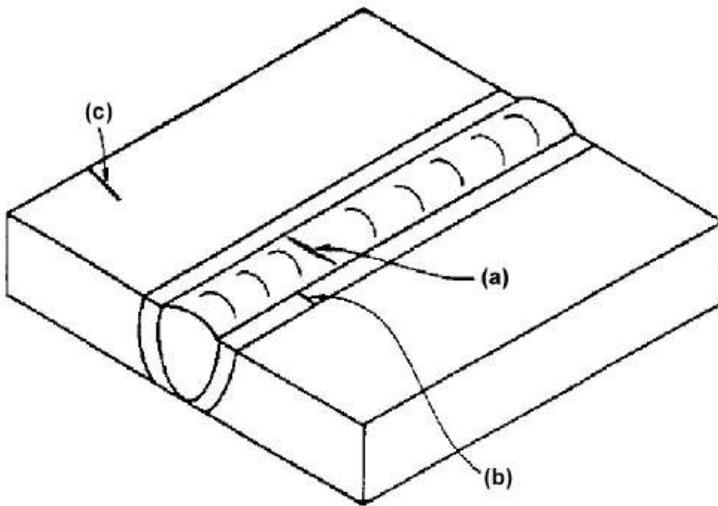
Trinca longitudinal – Trinca com direção aproximadamente paralela ao eixo longitudinal do cordão de solda, podendo estar localizada: na zona fundida (Fig. a); na zona de ligação (Fig. b); na zona termicamente afetada (Fig. c) ou no metal de base (Fig.d)



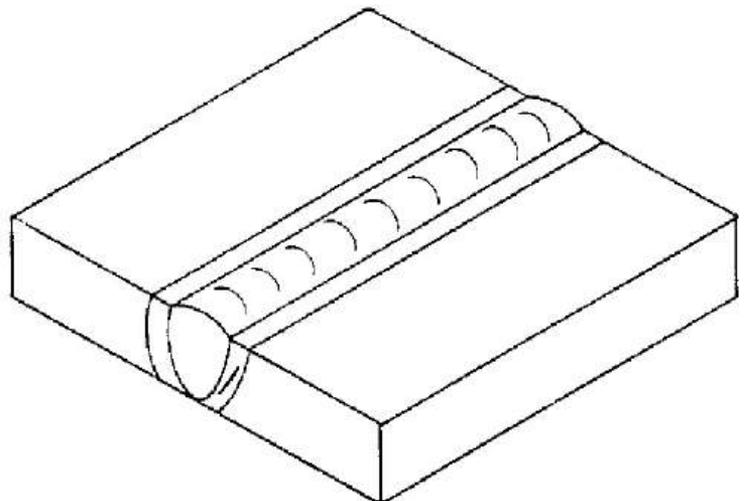
Trinca na margem – Trinca que se inicia na margem da solda, localizada geralmente na zona termicamente afetada



Trinca na raiz – Trinca que se inicia na raiz da solda, podendo estar localizada: na zona fundida (Fig.a); ou na zona termicamente afetada (Fig. b)



Trinca transversal – Trinca com direção aproximadamente perpendicular ao eixo longitudinal do cordão de solda, podendo estar localizada: na zona fundida (Fig. a); na zona termicamente afetada (Fig. b) ou no metal de base (Fig. c)



Trinca sob cordão – Trinca localizada na zona termicamente afetada, não se estendendo à superfície da peça

CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DE DEFEITOS EM SOLDAS

NORMAS	DEFEITOS	
	INCLUSÕES DE ESCÓRIA	POROSIDADE
ASME VIII (DIVISÃO 1) ASME I	<ul style="list-style-type: none"> - Para E = 1 • $l_{max} = 6,3 \text{ mm } p/ t < 19 \text{ mm}$ $= 1/3 t \text{ p/ } 19 \leq t \leq 57 \text{ mm}$ $= 19 \text{ mm } p/ t > 57 \text{ mm}$ • $\Sigma L < t$ para cada trecho de solda de comprimento = 12t, exceto quando a distância entre os defeitos for $> 6L$ (L é o tamanho do maior defeito). • $\Sigma l \leq 25 \text{ mm}$ para cada 300 mm de solda. - Para E < 1: a. $l \leq 19 \text{ mm}$ b. $l \leq 2/3 t$ c. $\Sigma L \leq t$ para cada trecho de solda de comprimento = 6t, e se a distância entre os defeitos for $\geq 3L$. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Para E = 1 a. $A_T \leq 38,7 t \text{ mm}^2$ em uma solda de comprimento = 150mm. b. $\varnothing \text{ max} = 0,2 t$ ou 3,2 mm (o menor valor) exceto quando está afastado do adjacente de mais de 25 mm, quando então $\varnothing \text{ max} = 0,3 t$ ou 6,3 mm (o menor valor). c. Porosidade alinhada: $\Sigma \varnothing < t$ em um comprimento = 12 t ou 150 mm (o menor valor) e que cada poro diste pelo menos 6 x \varnothing (do maior poro) do outro poro. d. Ver cartas de porosidade. b. Para E < 1 Não é fator a ser levado em consideração.
ANSI (B 31.3)	<p><u>Soldas Circunferenciais e Longitudinais</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 1- Para E = 1: a) $l \leq t/3$ b) $\Sigma L \leq t/2$ para cada 150 mm de solda c) largura $\leq 1,6 \text{ mm}$ - Para E < 1: - $l \leq 2t$ - $\Sigma L \leq 4t$ para cada 150 mm de solda - largura $\leq 2,4 \text{ mm}$ 	<p><u>Soldas Circunferenciais e Longitudinais</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 1- $\varnothing \leq 1,6 \text{ mm}$ ou $\varnothing \leq t/3$ para E = 1 2- $\varnothing \leq 2,4 \text{ mm}$ ou $\varnothing \leq t/2$ para E < 1 3- $A_T \leq 6,5 \text{ mm}^2$ (3 áreas $\varnothing = 1,6 \text{ mm}$ ou $\varnothing = 2,4 \text{ mm}$) em uma área de 650 mm^2 por 25,4 mm de espessura.
API (650)	<ul style="list-style-type: none"> 1. Inclusões Isoladas: 2. $l < 6,3 \text{ mm}$ são aceitas para qualquer t. 3. $l < 2/3 t$ e $t < 19 \text{ mm}$. 2. Inclusões Alinhadas: a) $\Sigma L > t$, para cada trecho de solda de comprimento = 6t não são aceitas, a menos que o espaço entre os defeitos seja 3 vezes o tamanho do maior defeito. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. $A_T \leq 0,06t$ para cada 150 mm de solda. 2. $\varnothing \leq 0,2t$ ou 3,2 mm (o menor valor). Se for poro isolado distante 25,4 mm ou mais de outro poro, $\varnothing \text{ max} \leq 0,3t$ ou 6,3 mm (o menor valor). 3. Para cada solda de 25,4 mm ou 2t de comprimento (o menor valor) a porosidade poderá se agrupar em uma concentração 4 vezes superior à permitida no item acima.

CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DE DEFEITOS EM SOLDAS

NORMAS	DEFEITOS				
	TRINCAS	FALTA DE FUSÃO/ FALTA DE PENETRAÇÃO	EXCESSO DE PENETRAÇÃO	CONCAVIDADE	MORDEDURAS
ASME VIII (DIVISÃO 1) ASME I	NÃO SÃO ACEITAS	NÃO SÃO ACEITAS	NÃO DEVERÁ SER ACEITO (ver UW-35)	—	NÃO DEVERÃO SER ACEITAS (VER UW-35)
ANSI (B 31.3)	NÃO SÃO ACEITAS	<p><u>A-Solda Circunferencial</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 1) Para E=1: Não são aceitas. 2) Para E<1: a- $p \leq 0,8 \text{ mm}$ ou 0,2 t (o menor valor) b- $Ct < 38 \text{ mm}$ para cada 150 mm de solda. <p><u>B-Solda Longitudinal</u> Não são aceitas.</p>	<p><u>Soldas Circunferenciais e Longitudinais</u></p> <ul style="list-style-type: none"> a) $p \leq 3,2 \text{ mm}$ ou 0,25t (o menor) para $t > 6,3 \text{ mm}$ b) $p \leq 1,6 \text{ mm}$ para $t \leq 6,3 \text{ mm}$ 	<p><u>Soldas Circunferenciais e Longitudinais</u></p> <p>$p \leq R$</p>	<p><u>A-Solda Circunferencial</u></p> <p>$p \leq 0,8 \text{ mm}$ ou $p \leq 0,25t$</p> <p><u>B- Solda longitudinal</u> Não são aceitas.</p>
API (650)	NÃO SÃO ACEITAS	NÃO SÃO ACEITAS	—	—	<p>A- Soldas Horizontais $p \leq 0,8 \text{ mm}$</p> <p>B- Soldas Verticais Não são aceitas</p>

ABREVIATURAS

l - comprimento de inclusões alongadas	A_T - área total das porosidades ou inclusões
L - comprimento de inclusões alinhadas	E = eficiência de junta
t - espessura da peça mais fina	R - altura do reforço / p - profundidade
\varnothing - diâmetro do poro	Ct - comprimento total

GUIA PRÁTICO DE SOLDAGEM MÉTODO DE UTILIZAÇÃO

Este guia permite selecionar o metal de adição mais adequado para realização de soldas em materiais de uso geral, que são os materiais ferrosos e as ligas a base de Níquel, bem como permite obter o tratamento térmico mais adequado. As indicações entre parênteses são notas que devem ser consultadas devido as restrições impostas pelos códigos de fabricação.

- Use a tabela 1 ou 2 para obter a referência do material a ser utilizado na solda e tratamento térmico correspondente.
- Use esta referência para obter o material de solda adequado, bem como o tratamento térmico nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

TABELA 1⁽¹⁾

MATERIAIS FERROSOS														
TIPO	P-N ⁽²⁾	310	316 316L	347 321	304 304L	3 1/2 Ni	12Cr 405	12Cr 410	9 Cr ⁽³⁾	5 Cr ⁽³⁾	2 1/4 Cr ^(3,4)	1 1/4 Cr ^(3,4)	C- Mo	AC
A. Carbono	P-1	12A	12A	12A	12A	1C	1B	1F	1G	1E	1E	1D	1B	1A
C - Mo	P-3	12B	12B	12B	12B	2C	2B	2F	2G	2E	2E	2D	2B ⁽⁵⁾	
1 1/4 Cr	P-4	12D	12D	12D	12D	3D	3D	3F	3G	3E	3E	3D ⁽⁵⁾		
2 1/4 Cr	P-5	12E	12E	12E	12E	4E	4E	4F	4G	4E	4E ⁽⁶⁾			
5 Cr-1/2Mo	P-5	12E	12E	12E	12E	5E	5E	5F	5G	5E ⁽⁶⁾				
9Cr-1Mo	P-5	12G	12G	12G	12G	6G	6G	6G	6G ⁽⁶⁾					
12 Cr(410)	P-6	12F	12F	12F	12F	7F	7F	7F ⁽⁶⁾						
12 Cr(405)	P-7	12H	12H	12H	12H	7C	12H 7D							
3 1/2 Ni	P-9	12C	12C	12C	12C	8C 13A								
304-304L ⁽⁷⁾	P-8	9H	9H	9H	9H									
347-321	P-8	10H	10H	10H										
316-316L ⁽⁷⁾	P-8	11H	11H											
310	P-8	16H												

TABELA 2⁽¹⁾

LIGAS A BASE DE NÍQUEL					
TIPO	P-N ⁽²⁾	NÍQUEL	MONEL	INCONEL	INCOLOY
AÇO CARBONO	P-1	13	14	13	13
AÇO INOX	P-8	13	13	13	13
INCOLOY	P-45	13	13	13	13
INCONEL	P-43	13	13	13	
MONEL	P-42	15	14		
NÍQUEL	P-41	15			

Pré-aquecimento mínimo: 10°C. Não é exigido tratamento térmico pós-soldagem para juntas soldadas com as combinações acima.

TABELA 3

MATERIAL DE ADIÇÃO					
Nº	MATERIAL	ELETRODO REVESTIDO		VARETA DE ADIÇÃO	
		ASME	CLASSIFICAÇÃO	ASME	CLASSIFICAÇÃO
1	AÇO CARBONO	SFA 5.1	E-6010, E-7018	SFA5.18	ER 70S-2
2	Carbono-Molibidênio	SFA 5.5	E-7010 A1 E-7018 A1	SFA5.18	ER 70S-1B
3	1 1/4 Cr-Mo	SFA 5.5	E-8016 B2, E-8018 B2	-	ER 515 ⁽⁹⁾
4	2 1/4 Cr-Mo	SFA 5.5	E-8016 B3, E-8018 B3	-	ER 521 ⁽⁹⁾
5	5 Cromo-Molibidênio	SFA 5.4	E 502 16 ou 15	SFA 5.9	ER 502
6	9 Cromo-Molibidênio	SFA 5.4	E 505 16 ou 15	-	ER 505 ⁽⁹⁾
7	12 Cromo	SFA 5.4	E 410 16 ou 15	SFA 5.9	ER 410
8	3 1/2 Níquel	SFA 5.5	E-8016 C2, E 8018 C2	-	-
9	18 Cromo-8 Níquel (308,308L) ⁽⁷⁾	SFA 5.4	E 308 16 ou 15 E 308L 16 ou 15	SFA 5.9	ER 308 ER 308L
10	18 Cr-10 Ni-Cb (347)	SFA 5.4	E 347 16 ou 15	SFA 5.9	ER 347
11	10 Cr-10 Ni-Mo (316, 316L)	SFA 5.4	E 316 16 ou 15 E 316L 16 ou 15	SFA 5.9	ER 316 ER 316L
12	25 Cr-12 Ni ⁽⁸⁾ INCONEL	SFA 5.4 SFA 5.11	E 309 16 ou 15 E NiCrFe-3	SFA 5.9	ER 309 ER NiCr-3
13	INCONEL	SFA 5.11	E NiCrFe-3 (Inconel 182)	SFA5.14	ER NiCr-3 (Inconel 182)
14	MONEL	SFA 5.11	E NiCu-2 (Monel 190)	SFA5.14	ER NiCu-7(11) (Monel 60)
15	NÍQUEL	SFA 5.11	E Ni-1 (Níquel 141)	SFA5.14	ER Ni-3 (Níquel 61)
16	25 Cr-20 Ni (310) ⁽⁸⁾	SFA 5.4	E 310 16 ou 15	SFA 5.9	ER 310

TABELA 4

TRATAMENTO TÉRMICO		
SIMBOLO DO TRATAMENTO	PRÉ-AQUECIMENTO	TRATAMENTO TÉRMICO POSTERIOR
A	10°C Mínimo. Acima de 25mm, 80°C mínimo.	Nenhum. Exceto p/ A. Carbono acima de 19 mm de espessura = 620°C h/polegada.
B	Idem, idem acima de 12 mm	Idem, idem acima de 12 mm
C	95°C Mínimo.	620°C - 1h/polegada
D	150°C Mínimo	730°C-1h/polegada; 2 h no mínimo
E	175°C Mínimo	730°C-1h/polegada; 2 h no mínimo
F	205°C Mínimo	760°C-1h/polegada; 2 h no mínimo
G	175°C Mínimo, mais pós aquecimento de 260°C por meia hora (10)	730°C-1h/polegada; 2 h no mínimo
H	10°C Mínimo	NENHUM

1 - As tabelas 1 e 2 mostram dois materiais a serem soldados, tendo no ponto de cruzamento um número correspondente ao eletrodo e uma letra correspondente ao tratamento térmico. As tabelas 3 e 4 contêm essas informações.

2 - A listagem dos materiais dos grupos P. Number é encontrada no ASME Seção IX, tabela QW-422.

3 - Soldas de selagem, soldas soquete ou soldas em filete de tubulações soldadas com eletrodo n.ºs. 13 ou 12 não necessitam tratamento térmico posterior. Devem ser observados os requisitos de pré-aquecimento (ANSI B-31.3 - parágrafo 331.3.6 (c)).

4 - Soldas de topo em tubos deste material não necessitam tratamento térmico posterior se o máximo teor de Cromo for 3%, o máximo diâmetro externo for 4", a espessura de parede máxima for 12,7 mm, o teor de Carbono máximo for 0,15% e tenha sido executado pré-aquecimento mínimo de 150°C (ASME Seção I - Parágrafo PW-39 e tabela 331.3.1 da ANSI B 31.3).

5 - Estas soldas estão sujeitas a teste de dureza após o tratamento térmico. Dureza máxima permitida: 225 Brinell (ANSI B 31.3 - parágrafo 331.3.2).

6 - Estas soldas estão sujeitas a teste de dureza após o tratamento térmico. Dureza máxima permitida: 241 Brinell (ANSI B 31.3 - parágrafo 331.3.2).

7 - Onde for utilizado material grau L, deverá ser utilizado o eletrodo correspondente grau L.

8 - Graus especiais do E 309 e 310 contendo adição de Molibdênio e/ou Colúmbio ou com a faixa de Carbono controlada, podem ser utilizados para soldagem de materiais dissimilares de uso pouco freqüente e ainda para solda de cobertura.

9 - Não existem especificações ASME para estas varetas, entretanto os nomes utilizados são aceitáveis na soldagem industrial.

10 - A solda deve ser resfriada pelo menos até 205°C entre o pós aquecimento e o tratamento térmico para permitir transformar qualquer austenita retida.

11- ER Ni-3 (Níquel 61) é a vareta preferível na soldagem de Monel ao aço carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. São Paulo, LTC, 1982.
2. WAINER, E., BRANDI, S. e MELLO, F. D.H., Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo, Edgard Blücher, 1992.
3. MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., Soldagem Fundamentos e Tecnologia, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.
4. SCOTTI, A.; PONOMAREV, V., Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho – São Paulo; Artiliber Editora, 2008.
5. ZIEDAS, S. e TATINI, I. Soldagem, São Paulo, SENAI, 1997.
6. REIS, R.P.; SCOTTI, A., Fundamentos de Soldagem a Plasma – São Paulo; Artiliber Editora, 2008.
7. AGA. Fatos sobre Solda MIG de Aços Inoxidáveis. s/l, s/d.
Fatos sobre Solda TIG. s/l, s/d.
Fatos sobre Fumos e Gases. s/l, s/d.
Gases de Proteção para Solda - Teoria e Aplicações. s/l/, s/d.
Contaminantes na Solda ao Arco com Gás de Proteção. s/l, s/d.

O autor desse material, Manoel Messias Neris possui Graduação em Engenharia Mecânica pelo Instituto Superior de Educação Santa Cecília (1981), Graduação em Mecânica pelo Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (1998), e Mestrado em Engenharia de Materiais pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (1998). Atualmente é professor titular da Universidade Santa Cecília, professor convidado da Universidade Paulista e professor do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Soldagem, Engenharia de Materiais e Pneumática, atuando principalmente nos seguintes temas: tenacidade, aço estrutural, tratamento térmico, manutenção, equipamentos, soldagem e pneumática.

Essa apostila foi desenvolvida para a capacitação de Soldagem, organizada por Wanda Jucha, coordenadora de projetos na Unidade de Ensino Médio e Técnico do Centro Paula Souza e teve colaboração do Professor Marcos Antônio Batalha.

abril de 2012