

## Soldagem do Alumínio e suas Ligas

### Sumário

- 1) Introdução
- 2) Alumínio e suas ligas
- 3) Soldagem GMAW e GTAW das ligas de alumínio
- 4) Metais de adição
- 5) Controle de qualidade na soldagem
- 6) Efeitos metalúrgicos na soldagem
- 7) Segurança na soldagem

### 1 - Introdução

O alumínio é um metal que se destaca pelo conjunto de suas propriedades, pois, além de seu apelo estético singular, apresenta baixa densidade, alta resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, boa tenacidade, alta resistência a baixas temperaturas e excelente conformabilidade. A adição de elementos de ligas ao alumínio permite o desenvolvimento de outras propriedades interessantes – como a alta resistência mecânica, por exemplo – que ampliam ainda mais o seu espectro de aplicação.

Quando se associa a crescente demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade aos requisitos de redução de consumo e preservação do meio ambiente, o alumínio e suas ligas aparecem como alternativas bastante atrativas. O uso desses materiais, principalmente em substituição ao aço e ao ferro fundido, permite a redução do peso do componente, a redução das perdas por corrosão e o aumento do potencial de reciclagem. O considerável crescimento do consumo desses materiais ao longo dos últimos anos é um bom indicador dessa tendência.

A soldagem do alumínio e suas ligas apresenta algumas peculiaridades em relação à soldagem dos aços, entretanto, é uma prática já consideravelmente dominada. A principal dificuldade associada à soldagem do alumínio e suas ligas está relacionada à presença de uma fina camada de óxido refratário que se forma na superfície do metal e que lhe confere resistência à corrosão. A alta condutibilidade térmica e elétrica do alumínio, bem como o seu alto coeficiente de expansão linear, também influenciam significativamente nos requisitos de soldagem.

Neste Informe Técnico serão abordados os requisitos e cuidados que devem ser considerados quando da soldagem GMAW (MIG) e GTAW (TIG) do alumínio e suas principais ligas comerciais.

## 2 - Alumínio e suas ligas

### Principais características

O alumínio é o segundo metal mais abundante na crosta terrestre, possuindo um conjunto único de propriedades mecânicas, físicas e químicas sem similar na natureza. A tabela 1 apresenta os valores de algumas de suas principais propriedades físicas, sendo ainda destacável a sua excelente resistência à corrosão, mesmo quando exposto a uma ampla gama de meios corrosivos (1).

As principais limitações do alumínio referem-se a resistência mecânica e dureza, que são relativamente baixas, mas podem ser muito melhoradas pela adição de elementos de liga. Assim, justifica-se o significativo crescimento do emprego do alumínio e suas ligas em um grande número de aplicações, inclusive naquelas sujeitas a severas solicitações mecânicas.

Tabela 1 - Propriedades do alumínio.

Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade Elétrica (%I.A.C.S.)	Condutividade Térmica a 25°C (W/(m.°C))	Coefficiente de Expansão Linear (1/°C)	Calor Específico Médio 0-100°C (J/(Kg°C))	Calor Latente de Fusão (KJ/Kg)	Ponto de Fusão (°C)	Módulo de Elasticidade (MPa)
2700	62	222	23,6x10 <sup>-6</sup>	940	388	660	69x10 <sup>3</sup>

Adicionalmente, o alumínio e suas ligas não são magnéticos e possuem características antifagulhantes, ou seja, se atritado com outro metal ou em uma superfície abrasiva, não gera fagulhas. Em seu estado puro, possui alta reflexibilidade e ponto de fusão de 660°C. Apesar de o ponto de fusão do alumínio e suas ligas ser relativamente baixo, a quantidade de calor necessária para fundi-los é igual, ou muitas vezes superior, àquela exigida para fundir o aço. A elevada condutividade térmica provoca um alto escoamento do calor ao longo do material, dificultando o aumento da temperatura localmente. Dessa forma, em processos de soldagem por fusão, por exemplo, é necessário um grande aporte de calor para que a fusão seja obtida.

Uma das principais características do alumínio é sua afinidade química pelo oxigênio, que resulta na formação de óxidos do tipo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na superfície do metal, quando esta é exposta a meios oxidantes. A camada de óxido que se forma na superfície é muito fina, tenaz e refratária. A alta tenacidade dessa camada dificulta sua ruptura pela ação das tensões superficiais geradas durante sua própria formação. A camada produzida é contínua e impermeável, o que torna o alumínio passivo em meios oxidantes, ou seja, a camada de óxido age como uma barreira ao meio, interrompendo o processo corrosivo. Mesmo quando danificada ou removida, a proteção é ainda bastante efetiva, pois a camada possui alto poder de regeneração, se recompondo muito rapidamente.

A camada, que é uma proteção contra a corrosão, é também uma barreira a ser vencida durante a soldagem, devido ao seu alto ponto de fusão. Enquanto o alumínio se funde a 660°C, a camada de óxido só se funde quando a temperatura ultrapassa os 2.000°C. Portanto, é importante estabelecer um mecanismo para retirada desse filme de óxido e, ao mesmo tempo, criar uma atmosfera que impeça a sua regeneração durante a operação de soldagem. Na soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa (MIG e TIG), o próprio arco elétrico pode atuar no sentido de remover a camada de óxido, enquanto que a atmosfera de gás inerte impede a penetração do oxigênio e, conseqüentemente, a formação de óxidos para promover a regeneração da camada.

Outro aspecto a ser destacado no que se refere à resistência à corrosão de ligas de alumínio é a forte influência da composição química da liga e da microestrutura do material. Elementos de liga presentes em solução sólida ou em segundas fases precipitadas possuem influência direta no potencial de oxidação da liga, fazendo com que cada uma delas e cada condição de tratamento

térmico possua um potencial próprio. O diagrama de Pourbaix permite visualizar as faixas de pH e potencial nas quais a liga de alumínio é suscetível a corrosão, apresenta comportamento passivo ou é imune a processos corrosivos. A figura 1 apresenta esquematicamente um diagrama de Pourbaix.

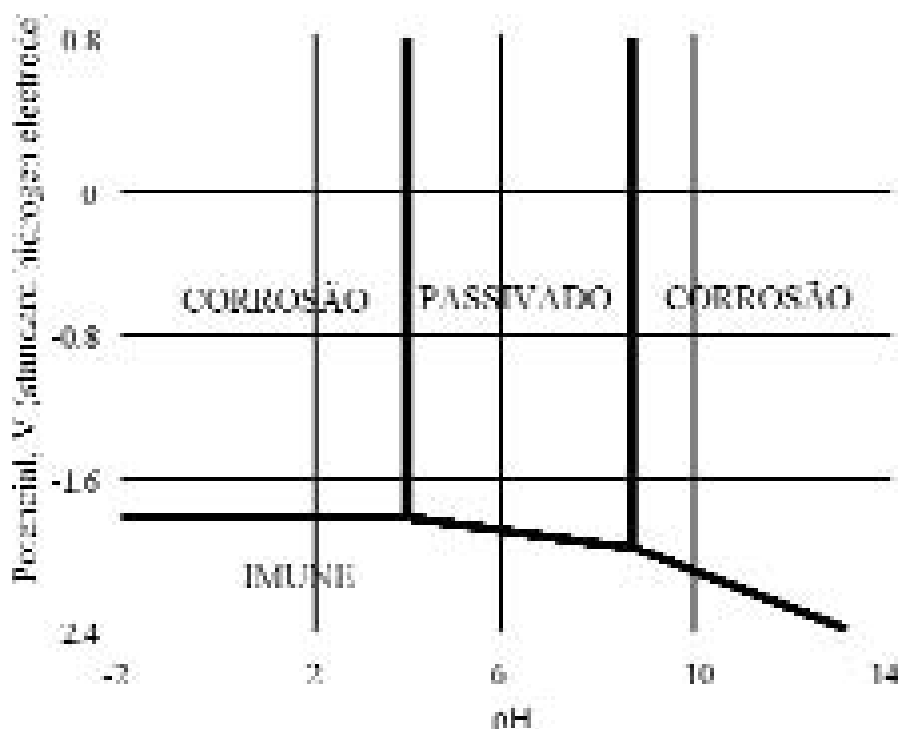


Figura 1 – Diagrama da ocorrência de corrosão em relação ao pH e ao potencial.

### Classificação e designação

As ligas de alumínio são encontradas em duas condições básicas: fundidas e trabalhadas. Independentemente do processo de fabricação, as ligas são basicamente designadas em função do principal elemento de liga presente. Os materiais trabalhados podem ser encontrados na forma de laminados planos, extrudados e forjados, enquanto que as ligas fundidas, na forma de lingotes ou peças acabadas.

O sistema de designação, apresentado pela Aluminum Association (AA), classifica as ligas de alumínio de acordo com os critérios apresentados a seguir e resumidos na tabela 2:

- Os materiais trabalhados são indicados por quatro dígitos: o primeiro classifica a liga pela série, segundo o principal elemento adicionado; o segundo dígito, se diferente de zero, indica modificação na liga básica; e o terceiro e quarto dígitos, para o alumínio comercial (série 1000), indicam o teor mínimo desse metal e, para as ligas, identificam composição específica.

- Os materiais para fundição são designados com três dígitos, um ponto e um quarto dígito: o primeiro dígito indica a liga pela série, segundo o principal elemento adicionado; o segundo e o terceiro dígitos caracterizam as ligas de composição específica; e o quarto, que segue o ponto, indica, se for zero, peça fundida e, se for um, o material na forma de lingote; a colocação posterior de uma letra maiúscula (A, B...) assinala a modificação da liga básica.

Tabela 2 - Sistema de classificação das ligas de alumínio em função dos principais elementos de adição.

Alumínio e ligas trabalhadas	
Designação de série	Indicação da composição
1XXX	Mínimo de 99,00% alumínio
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada
Alumínio e suas ligas fundidas	
Designação de série	Indicação de composição
1XX.X	mínimo de 99,00% alumínio
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício e cobre e/ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não utilizada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

A composição química da liga é um fator fundamental para a determinação de suas propriedades, particularmente no que concerne à possibilidade de modificação por tratamentos térmicos, pois a solubilidade dos elementos adicionados ao alumínio varia significativamente. Em algumas ligas essa solubilidade aumenta com a temperatura, fato que permite a aplicação do tratamento térmico de solubilização. Esse tratamento térmico consiste no aquecimento para solubilização do elemento de liga além do percentual admitido a temperatura ambiente. Em seguida, efetua-se um resfriamento brusco, de modo a manter os elementos em solução sólida supersaturada, a temperatura ambiente. O endurecimento é obtido pela fina precipitação de partículas a temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou através de um aquecimento a temperatura não muito elevada (envelhecimento artificial).

As ligas que são suscetíveis ao endurecimento por tratamentos térmicos são aquelas que contêm cobre (série 2XXX), zinco (série 7XXX) e a combinação magnésio/silício (série 6XXX), sendo designadas como tratáveis termicamente. Os demais elementos adicionados provocam um efeito de endurecimento por solução sólida no alumínio a temperatura ambiente, ou por formação de partículas dispersas quando a quantidade de elemento adicionado excede o limite de solubilidade a temperatura ambiente. As ligas que não são tratáveis termicamente só podem ser endurecidas por um tratamento mecânico (deformação plástica). Como os tratamentos termomecânicos são muito importantes na determinação das propriedades finais do material, existe um sistema complementar indicando a condição de têmpera, isto é, o grau de endurecimento do material obtido por tratamento mecânico e/ou térmico. O sistema de

designação é alfanumérico e posicionado após a designação referente à composição química (por exemplo: 2024 T4). As letras usadas são F, O, H, W e T, que representam as seguintes condições:

- **F** - como fabricado: aplica-se aos produtos trabalhados que não tiveram controles especiais relacionados com tratamentos térmicos e/ou mecânicos.

- **O** - recozido: utilizada para os produtos trabalhados que foram recristalizados e encontram-se na condição de menor dureza.

- **H** - encruado: aplicada aos produtos trabalhados endurecidos por tratamento mecânico (deformação plástica) com ou sem tratamento térmico posterior para controle do grau de endurecimento. Essa letra é seguida de até três dígitos para indicar a condição específica de tratamento. O primeiro dígito indica a combinação específica de operações básicas, o segundo dígito indica a condição final de endurecimento, enquanto que o terceiro dígito designa variantes específicas (tabela 3).

- **W** - solubilizado: corresponde a um tratamento térmico no qual ocorre completa solubilização das partículas e precipitados pelo aquecimento acima da temperatura de solubilização. Em seguida realiza-se um resfriamento brusco para manter, a temperatura ambiente, uma solução sólida supersaturada. Essa condição é indicada apenas para as ligas suscetíveis ao envelhecimento natural.

- **T** - tratado termicamente: aplicada aos produtos para obter uma situação estável da microestrutura (além da condição O ou F) e pode ser ou não seguida de tratamento mecânico; a letra T recebe um ou mais dígitos conforme indicado na tabela 3.

**Tabela 3 - Sistema de classificação das ligas de alumínio em função do tratamento termomecânico.**

Subdivisão para a têmpera H	
H1 - encruado somente	
H2 - encruado e parcialmente recozido	
H3 - encruado e estabilizado	
HX2 - 1/4 duro	HX4 - 1/2 duro    HX8 - duro    HX9 - extra duro

Subdivisão para a têmpera T	
T1 - trabalho a quente + envelhecimento natural	
T2 - trabalho a quente + encruamento + envelhecimento natural	
T3 - solubilização + encruamento + envelhecimento natural	
T4 - solubilização + envelhecimento natural	
T5 - trabalho a quente + envelhecimento artificial	
T6 - solubilização + envelhecimento artificial	
T7 - solubilização + estabilização (superenvelhecimento)	
T8 - solubilização + encruamento + envelhecimento artificial	
T9 - solubilização + envelhecimento artificial + encruamento	
T10 - trabalho a quente + encruamento + envelhecimento artificial	
TX51 - alívio de tensões por deformação	
TX52 - alívio de tensões por compressão	
TX53 - alívio de tensões por tratamento térmico	

### Principais aplicações das ligas de alumínio

A crescente utilização do alumínio e suas ligas pode ser atribuída ao conjunto de suas propriedades específicas, e também à viabilidade técnica e principalmente econômica da sua utilização em substituição aos demais materiais. A redução de peso é um fator muito relevante para um grande número de aplicações, pois permite um funcionamento mais eficiente e econômico, principalmente na fabricação de sistemas móveis, ou mesmo no transporte. O aspecto estético e a alta resistência a corrosão também são pontos de destaque quando da seleção do alumínio e suas ligas como material construtivo. A desmistificação da soldagem do alumínio foi um outro fator que contribuiu bastante para aumentar o grau de interesse por esses materiais.

Atualmente, as ligas de alumínio encontram um largo campo de aplicação nos mais diversos setores do mercado, assumindo um importante papel na matriz de produção de materiais para a construção/fabricação. A tabela 4 apresenta algumas das principais aplicações típicas do alumínio e suas ligas.

Tabela 4 - Principais aplicações das ligas de alumínio.

ÁREA DE ATUAÇÃO	APLICAÇÕES
<b>INDÚSTRIA AUTOMOTIVA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- trocadores de calor, rodas, eixos (ligas 6061),</li> <li>- eixos de comando (liga 6061 forjada ou extrudada por impacto),</li> <li>- motores (ligas A356, A380, A319),</li> <li>- componentes de pára-choques, batentes e suportes (ligas 5052, 6009, 7021, 7004, 7021, 7029 para barras de face, ligas 6009, 6061, 7003, 7004, 7021, 7029 para reforços, e ligas 6009, 7021 para suportes),</li> <li>- acentos de eixos (ligas 2036 e 6010 para revestimento, ligas 6010, 7003, 7004, 7129 para pistas de rolamento),</li> <li>- cargas de piso (ligas 2036, 5182, 5754, 6009),</li> <li>- chassis e componentes estruturais (ligas 6009, 6061, 6063, 6082, 6005, 7005),</li> <li>- carroçaria (ligas 2036, 3004, 5052, 5182, 5754, 6009, 6010, 6022, 6111, 2008, 2010),</li> <li>- defletores de ar (liga 6463),</li> <li>- pistões,</li> <li>- cabeçotes (ligas A356, A380, A319)</li> <li>- molas (ligas 5454, 6061, A356.0)</li> <li>- elementos de suspensão (6061 forjado)</li> </ul>
<b>INDÚSTRIA AEROESPACIAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estruturas (ligas 2219, 2014, 2024, 7075, 2090),</li> <li>- mísseis (liga A357),</li> <li>- turbinas (liga 711.0),</li> <li>- equipamentos aeroespaciais (ligas 6061, 6013),</li> <li>- aeronaves (liga 355.0).</li> </ul>
<b>INDÚSTRIA NAVAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- estruturas (ligas 6061, 5086, 5083),</li> <li>- equipamentos sujeitos a atmosfera marítima (ligas 518.0, 535.0),</li> <li>- revestimentos (ligas 5052, 5086, 6061, 5083),</li> <li>- unidades de dessalinização (ligas 5454, 5052),</li> <li>- tubos para parapeito (ligas 6061, 6063).</li> </ul>
<b>INDÚSTRIA BÉLICA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mísseis (ligas 2014, 2219),</li> <li>- placas de blindagem (ligas 5083, 7039, 2519),</li> <li>- pontes militares (liga 7039).</li> </ul>
<b>INDÚSTRIAS DIVERSAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bicicletas (ligas 6061, 6013, 7005, 7046, 5086),</li> <li>- bastões de baseball (ligas 7046, 7050),</li> <li>- trenós (liga 1100).</li> </ul>
<b>INDÚSTRIA DE TRANSPORTES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tanques para transporte de produtos químicos (liga 5254),</li> <li>- linhas de vapor (liga 5454).</li> </ul>
<b>CONTAINERS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vasos de pressão (liga 5456)</li> <li>- estrutura dos tanques (liga 5086),</li> <li>- tanques criogênicos e navais (liga 5083),</li> <li>- chapas (ligas 6061, 5454, 5086, 5052).</li> </ul>

### 3 - Soldagem GMAW e GTAW das ligas de alumínio

A maioria das ligas de alumínio é compatível com os processos tradicionais de união (soldagem a arco com proteção gasosa, soldagem por resistência elétrica e brasagem). A soldagem com eletrodos revestidos (SMAW), largamente empregada em aços, não é muito comum na união do alumínio e suas ligas.

Os processos a arco com proteção gasosa GMAW e GTAW (MIG e TIG respectivamente) são empregados com sucesso na grande maioria das ligas de alumínio fundidas ou trabalhadas, com exceção de algumas ligas Al-Cu que apresentam melhores características de união quando soldadas por resistência elétrica.

Entretanto, deve-se destacar que a soldagem das ligas de alumínio requer a observação de procedimentos específicos, que envolvem desde o armazenamento adequado do material antes de ser soldado até a limpeza das juntas antes da operação de soldagem, para a geração de juntas de qualidade.

#### Preparação para a soldagem

A obtenção de bons resultados na soldagem do alumínio e suas ligas exige a adoção de certos cuidados especiais no armazenamento e manuseio dos materiais de base e de adição, na preparação da junta, na própria operação de soldagem e na limpeza e acabamento da junta. A contaminação do material, em qualquer etapa do processamento, representará a geração de descontinuidades, instabilidade no processo de soldagem e/ou baixo desempenho da junta soldada. Esses cuidados são comuns a todos os processos de soldagem aplicados ao alumínio e suas ligas, demandando apenas a sua adequada adaptação, em função das diferenças operacionais entre os processos de soldagem.

O primeiro ponto importante a ser tratado após a especificação das ligas a serem utilizadas na soldagem (materiais de base e de adição) é o armazenamento e manuseio desse material, de modo a evitar a sua contaminação. Prevenindo a contaminação durante o armazenamento e o manuseio, reduz-se o esforço e o custo associado à descontaminação previamente à soldagem.

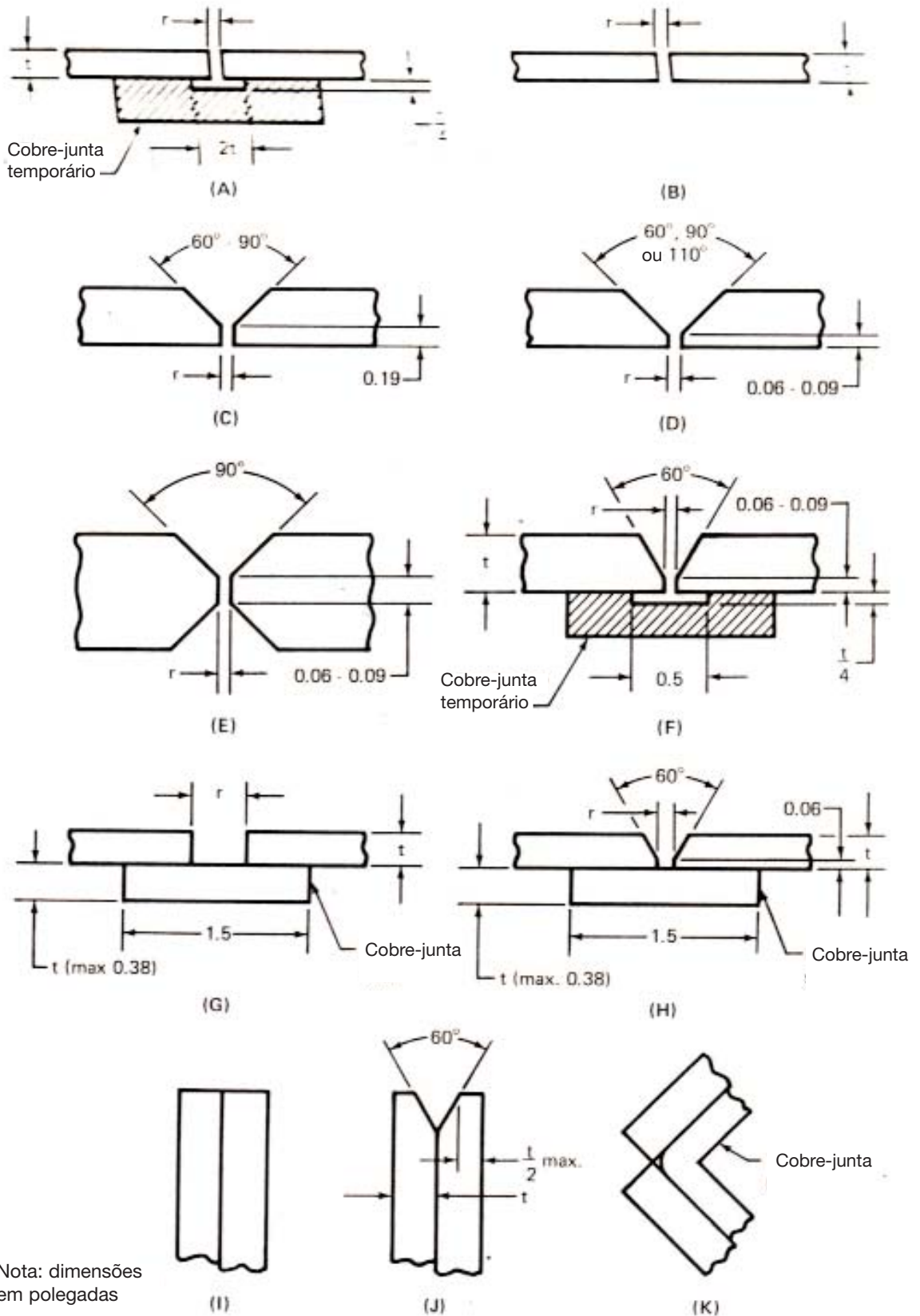
A melhor recomendação para o processamento das ligas de alumínio consiste na designação de uma área física específica e exclusiva para esse material, com ferramentas e acessórios adequados. A limpeza nesse local deve ser um item de especial atenção, pois muitos contaminantes são oriundos do ambiente de fabricação industrial comum (óleo, graxa, partículas de abrasivos, limalhas de ferro etc.). O ambiente para armazenamento deve ser coberto, seco e com temperatura uniforme para evitar a exposição e condensação de água na superfície do material.

O alumínio é muito suscetível à formação de porosidade durante a soldagem. O maior responsável por essa ocorrência é o hidrogênio, normalmente introduzido na forma de hidrocarbonetos (óleos e graxas) e umidade (água). A condensação de água na superfície do material é particularmente indesejável, pois a água acumulada entre as chapas produz uma fina camada de óxido hidratado, que além de ser uma fonte de hidrogênio para formação de porosidade, é uma barreira dielétrica que produz instabilidade no arco elétrico. Portanto, quando houver necessidade de armazenar chapas de ligas de alumínio por um longo período, sugere-se que elas sejam protegidas com uma cobertura impermeável.

Na preparação para soldagem, as etapas seguintes são as que envolvem o corte e a preparação do chanfro. As ligas de alumínio são cortadas e conformadas pelos processos tradicionalmente empregados para essas operações, excluindo-se os processos oxi-combustíveis, que não se aplicam devido ao ponto de fusão dessas ligas ser inferior à temperatura de ignição da reação de oxidação. O corte mecânico é uma alternativa muito utilizada devido à boa qualidade da superfície obtida, havendo a possibilidade, entretanto, de ocorrer deformações, principalmente nas bordas, dependendo do método de corte mecânico empregado. O corte plasma e o laser são alternativas que estão crescendo, face à maior disponibilidade desses processos e à sua alta flexibilidade para cortar geometrias complexas com grande precisão e de forma muito rápida.

A configuração da junta é selecionada de acordo com a aplicação específica e deve levar em conta aspectos práticos como as solicitações de serviço, o processo de soldagem a ser empregado e o acesso à junta, por exemplo. A figura 2 apresenta os principais tipos de juntas utilizadas na união dos componentes soldados de ligas de alumínio, enquanto que na tabela 5 são apresentadas as vantagens

e desvantagens de cada uma delas. A preparação das bordas é geralmente necessária para garantir a fusão completa do metal de base e a penetração total. As juntas podem ser preparadas pelos processos de corte e usinagem convencionais. Lubrificantes e ferramentas específicas podem ser necessários para facilitar o trabalho.



Nota: dimensões em polegadas

Figura 2 - Juntas típicas para a soldagem a arco de ligas de alumínio.

Tabela 5 - Vantagens e limitações dos principais tipos de junta para a soldagem do alumínio.

Tipo de Junta	Vantagens	Limitações
<b>Topo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simples e facilmente projetada.</li> <li>- Ótimo acesso.</li> <li>- É eficaz para todos os tipos de esforço mecânico.</li> <li>- É a mais indicada quando a junta é submetida a esforços de fadiga.</li> <li>- Uso mínimo de material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige maior precisão no ajuste e alinhamento.</li> <li>- Frequentemente requer o uso de gabaritos e guias.</li> <li>- Normalmente precisa de preparação das bordas.</li> <li>- Normalmente exige o uso de backing ou goivagem da raiz.</li> </ul>
<b>Sobreposta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simples e facilmente projetada.</li> <li>- Permite variações na espessura do material.</li> <li>- Eventualmente exige a preparação das bordas.</li> <li>- Não necessita de goivagem.</li> <li>- Os gabaritos, quando necessários, são simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O material sobreposto é inaproveitado.</li> <li>- Excentricidade causa concentrações de tensões e reduzida resistência à fadiga.</li> </ul>
<b>Ângulo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usualmente é simples e facilmente projetada.</li> <li>- Eventualmente precisa de preparação das bordas.</li> <li>- Não requer goivagem.</li> <li>- Os gabaritos são relativamente simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A montagem depende da precisão na preparação da borda da alma.</li> <li>- Excentricidade nas soldas resulta em concentrações de tensões.</li> <li>- O flange deve ser projetado para ter duas vezes a dimensão do filete de solda.</li> </ul>
<b>Canto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simples e facilmente visualizada.</li> <li>- Pode ser soldada apenas por um lado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difícil de fixar.</li> <li>- Difícil de ser soldada pelo processo GMAW .</li> <li>- Pode precisar de backing.</li> <li>- Não é eficaz para todos os tipos de esforços mecânicos.</li> </ul>
<b>Aresta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simples e facilmente visualizada.</li> <li>- Pode ser soldada apenas por um lado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soldagem difícil.</li> <li>- Pode necessitar de preparação das bordas.</li> <li>- Não é eficaz para todos os tipos de esforços mecânicos.</li> </ul>

A última etapa preliminar à montagem para soldagem é a limpeza dos componentes da junta. Essa etapa é requerida para retirar os contaminantes acumulados nas etapas anteriores e a camada de óxido que existe na superfície das ligas de alumínio. Quanto menor for a quantidade de contaminantes presente, menores serão o custo e o tempo para uma limpeza efetiva.

A limpeza deve ser efetuada tão próximo do momento da soldagem quanto possível, pois a camada de óxido começa a se regenerar imediatamente após a sua remoção. Existem dois métodos diferentes de limpeza: química e mecânica. A limpeza química pode variar desde a simples aplicação de um solvente (acetona ou álcool) até um ataque químico com solução de soda cáustica e/ou ácido nítrico para a decapagem da superfície do material. No caso da limpeza por ataque químico, se a soldagem for executada logo após essa limpeza, pode-se dispensar a limpeza mecânica. No caso da limpeza com solvente, a limpeza mecânica previamente à soldagem é recomendada. A limpeza mecânica é, em geral, efetuada com uma escova de aço inoxidável, exclusiva para a limpeza de peças de alumínio.

A montagem da junta é efetuada através de gabaritos, posicionadores, ponteamento com solda ou outros elementos de fixação ("cachorros", "sargentos", etc.). No caso da montagem por ponteamento com solda, os pontos devem ser efetuados conforme procedimentos qualificados, de modo que haja garantias de penetração, isenção de defeitos e perfil adequado para que os passes subsequentes possam ser depositados diretamente sobre eles, sem comprometimento da integridade da solda.

Em alguns casos, nos quais se vai soldar peças muito espessas, o pré-aquecimento é recomendado para evitar que o calor aportado pelo processo de soldagem escoe através do material sem produzir a fusão localizada. O pré-aquecimento deve ser estabelecido e controlado criteriosamente, pois pode modificar sensivelmente as propriedades do metal base. Deve-se portanto, optar por processos de soldagem com alto aporte de calor para evitar a necessidade de pré-aquecimento em peças não muito espessas. Para selecionar a temperatura de pré-aquecimento deve-se considerar a liga que está sendo soldada, o processo e parâmetros de soldagem, a espessura do material e a configuração da junta. Em geral, a temperatura de pré-aquecimento situa-se na faixa de 100°C a 150°C, não devendo exceder o limite de 200°C. O tempo de pré-aquecimento deve ser o mínimo possível para evitar maior deterioração das propriedades mecânicas da junta soldada.

### Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)

O processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa, também conhecido como MIG (Metal Inert Gas) ou GMAW (Gas Metal Arc Welding), é adequado para a soldagem do alumínio e suas ligas numa larga faixa de espessura. A figura 3 apresenta uma representação esquemática do processo GMAW, na qual se observa que o arco elétrico é estabelecido entre um arame-eletrodo consumível e a peça. O arco e a poça de fusão são protegidos por uma atmosfera de gás inerte que os envolve completamente, evitando sua contaminação pelos componentes do ar.

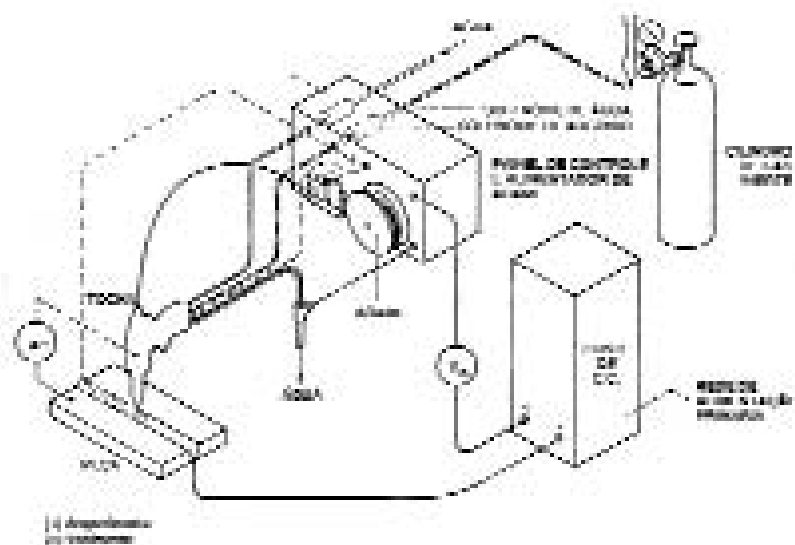


Figura 3 - Diagrama esquemático do processo GMAW.

### Fontes para soldagem

A fonte de energia para a soldagem GMAW de alumínio é, em geral, do tipo que fornece corrente contínua com o eletrodo conectado ao pólo positivo (CCEP), sendo cada vez mais comum que os equipamentos possuam o recurso de pulsação de corrente. As fontes podem possuir característica estática do tipo tensão constante ou corrente constante, dependendo de seu modo construtivo. Outra possibilidade são as fontes de energia que fornecem corrente alternada (CA) dedicadas à soldagem de alumínio. Todos esses equipamentos podem ser adaptados para a soldagem semi-automática, mecanizada ou automática.

Com CCEP, o arco remove o filme de óxido de alumínio a fim de permitir a fusão das bordas da junta e do metal de adição. Ao remover o filme de óxido das faces da junta, ele também possibilita que o metal de solda "molhe" esta superfície de modo que se forme um perfil de solda mais suave, o que é desejável. Neste caso, maior parcela do calor do arco (cerca de 70%) é gerada no eletrodo (o anodo do arco) e, em seguida, é transferida para a poça de fusão através de um feixe de gotículas de metal de adição superaquecidas. Esta técnica recebe o nome de transferência por pulverização "spray" e é largamente utilizada nas soldagens GMAW de alumínio.

Com a utilização da CA, é possível conciliar as características de boa penetração da corrente contínua e eletrodo negativo (CCEN) com o efeito de limpeza da CCEP. A utilização de CA pulsada facilita a soldagem em spray e permite o controle da penetração, possibilitando a soldagem de pequenas espessuras, mesmo menores do que 1mm (12).

### Gás de proteção

Os gases de proteção normalmente recomendados para a soldagem GMAW do alumínio são o argônio, o hélio ou a mistura argônio + hélio (1). O argônio é indicado para soldas semi-automáticas e para materiais de pequena espessura, pois proporciona uma boa estabilidade de arco e uma forte ação de limpeza. O perfil de penetração acentuado produzido pela atmosfera protetora de argônio puro é causado pela coluna de arco constrita e de alta densidade de corrente, que gera uma grande concentração de energia numa pequena superfície. A figura 4 apresenta uma ilustração esquemática dos perfis de cordões de solda obtidos com argônio, hélio e misturas argônio/hélio.

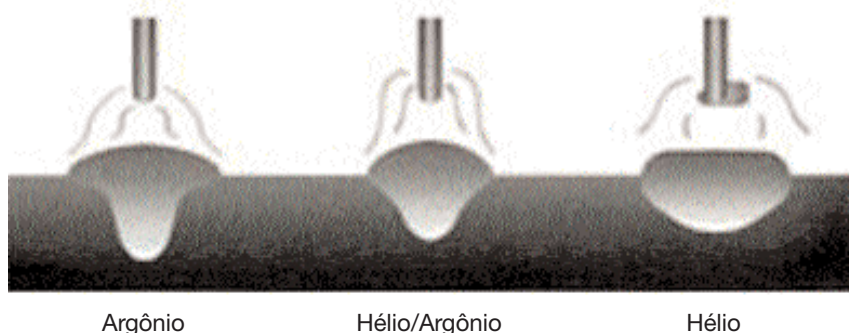


Figura 4- Perfis de solda GMAW com diferentes atmosferas de proteção.

O hélio possui maior condutividade térmica que o argônio, produzindo uma coluna de arco mais larga, que, associada ao maior gradiente de tensão necessário para produzir um arco estável, gera um aporte de calor maior que o gerado pelo argônio, com uma poça de fusão mais larga, mais fluida e com maior molhabilidade. Devido ao alto aporte de calor, permite a execução de soldas com maior velocidade de deslocamento.

As misturas argônio/hélio permitem associar as vantagens dos dois gases, ou seja, a excelente estabilidade de arco e a ação de limpeza produzida pelo argônio, à molhabilidade, maior energia e largura de cordão típicas do hélio. Normalmente, quanto mais espessa é a peça, maior o teor de hélio recomendado na mistura. O percentual de argônio não deve ser inferior a 20% para produzir e manter um arco estável. Os percentuais de hélio normalmente introduzidos em misturas comerciais são 25%, 50% e 75%. A tabela 6 apresenta uma indicação do gás de proteção em função da espessura do material.

Tabela 6 - Gás de proteção recomendado para a soldagem das ligas de alumínio.

Espessura do metal base	Modo de transferência	Gás de proteção	Características
< 3mm	Curto-circuito	Argônio	Ótimo acabamento, penetração controlada
3 mm < e < 6 mm	Curto-circuito	Argônio	Ótimo acabamento
	Spray / Spray pulsado	*Stargold Aluminium	Alta produtividade, excelente acabamento
> 6mm	Spray / Spray Pulsado	*Stargold Aluminium	Alta produtividade, excelente acabamento
		He 25	Excelente acabamento

\* *Stargold Aluminium*: mistura especialmente desenvolvida pela White Martins para a soldagem do alumínio e suas ligas nas transferências spray e spray pulsado. Alia altas velocidades de soldagem com maior tolerância às imperfeições de montagem, com excelente acabamento.

Na tabela 6, faz-se menção aos modos de transferência na soldagem de alumínio, ou seja, da forma como o arame fundido é transferido para a poça de fusão. Essencialmente, existem quatro modos distintos de transferência: curto-circuito, globular, goticular (spray) e controlada (spray pulsado). A figura 5 ilustra, esquematicamente, esses quatro tipos de transferência metálica. Na soldagem do alumínio e suas ligas, normalmente se utiliza transferência goticular ou controlada, pois o nível de energia é mais alto, permitindo a fusão do metal de base e do arame adequadamente.

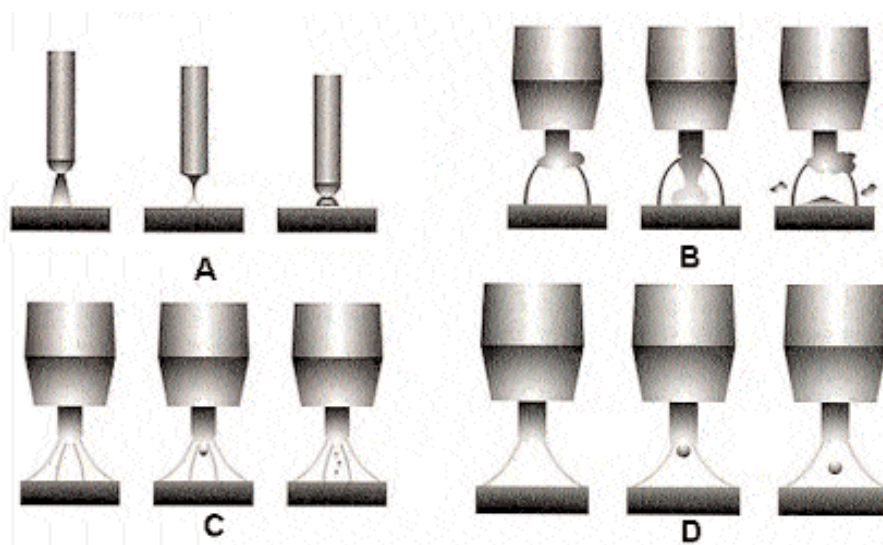


Figura 5 – Modos de transferência metálica na soldagem GMAW:  
(A) Curto-circuito (B) Globular (C) Goticular (D) Controlada

A transferência por curto-circuito é obtida com baixo aporte de calor. Portanto, para a soldagem do alumínio e suas ligas, deve-se tomar o cuidado para não ocorrer falta de fusão, uma vez que estes materiais conduzem o calor muito rapidamente. Entretanto, com o crescente uso de chapas finas, alguns fabricantes desenvolveram equipamentos com características especificamente projetadas para a soldagem desses materiais com transferência por curto-circuito.

### Características do processo GMAW para soldagem das ligas de alumínio

O ponto mais crítico, no que se refere a equipamento, na soldagem do alumínio e suas ligas com o processo GMAW, é o sistema de alimentação de arame. Devido às características do próprio arame (macio e pouco rígido), à alta velocidade de alimentação e ao mecanismo usado para transportar o arame da bobina até o bico de contato na tocha, existe uma grande tendência a haver problemas de alimentação. O problema torna-se ainda mais complicado quando não se observam as modificações que são necessárias em relação ao sistema utilizado para soldagem de aços.

Os roletes que impulsionam o arame para dentro do condute devem ser próprios para os arames de alumínio (possuir perfil "U" com arestas arredondadas) e trabalhar com o mínimo de pressão para evitar o amassamento do arame. O sistema de tracionamento deve ser preferencialmente com quatro roletes em vez de dois roletes, para assegurar uma maior área de contato para o arraste do arame, eliminando a necessidade de aumentar a pressão nos roletes. A figura 6 apresenta um sistema de alimentação recomendado para essa aplicação.

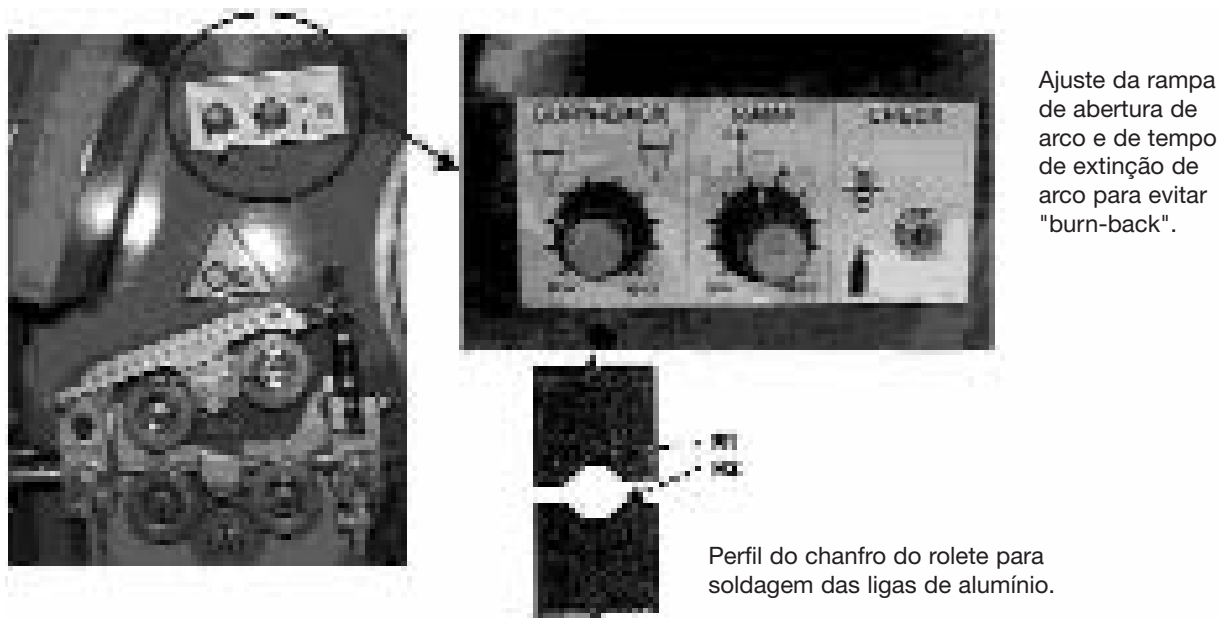


Figura 6 - Sistema de tracionamento de arame para o processo GMAW de alumínio.

Os ajustes de rampa de velocidade de arame e controle do tempo de extinção do arco mostrados na figura 6 são muito importantes para controlar os eventos de abertura e extinção do arco, respectivamente. O ajuste de velocidade de arame objetiva permitir que o arame seja alimentado mais lentamente durante a abertura do arco, pois nesse período o arco ainda não possui capacidade para fundir a quantidade de arame estabelecida para as condições plenas de soldagem. A falta desse controle pode provocar a incidência do arame sobre o metal de base, sem que o primeiro se funda. Essa colisão causa a falha na abertura do arco, amassamento do arame e interrupção da alimentação de arame.

Já o controle do tempo de extinção do arco tem por objetivo evitar a interrupção abrupta do arco elétrico com consumo da ponta do arame e, eventualmente, queima do bico de contato ("burn-back"). Essa extinção repentina provoca também a formação de uma cratera no fim do cordão – normalmente, um sítio preferencial para o aparecimento de trincas. Alguns equipamentos possuem um recurso para reduzir a corrente de soldagem gradualmente e efetuar o enchimento de cratera ("crater fill"). Por outro lado, se a interrupção do arco for muito lenta, poderá haver a colagem da ponta do arame na poça de fusão, com todos os inconvenientes associados a essa condição, principalmente na soldagem mecanizada ou automática.

Ainda com relação ao sistema de alimentação de arame, é necessário salientar que o conduíte adequado para a soldagem de alumínio é confeccionado com teflon ou materiais grafitados, visando reduzir o atrito interno entre o arame e a superfície do conduíte. A limpeza regular desse conduíte é fundamental para manter o sistema sempre livre de partículas sólidas e umidade, caso contrário, poderão ocorrer falhas na alimentação do arame e instabilidade no arco elétrico. O comprimento do cabo da tocha também influi na qualidade da alimentação de arame. Ele deve ser o menor possível, procurando posicionar o alimentador de modo que o cabo da tocha chegue esticado na área de trabalho.

Tochas especiais como a "push-pull" e a "spool on gun" (figura 7) são alternativas interessantes para a soldagem de ligas de alumínio, especialmente quando se trabalha com arames de menor bitola (0,8 e 1,0mm) ou quando há a necessidade de que a tocha efetue uma grande movimentação para acessar todos os pontos de soldagem. Essas tochas, apesar de apresentarem um preço relativamente alto, proporcionam uma significativa redução nos problemas associados com alimentação de arame.

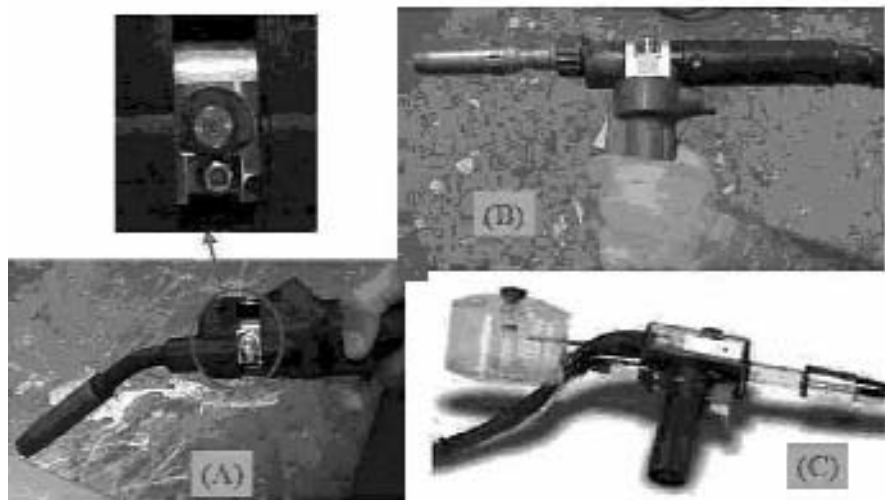


Figura 7 - Tochas com sistemas alternativos de alimentação de arame. (A) Tocha "push-pull" mostrando o detalhe do rolete impulsor no próprio punho. (B) Outro modelo de tocha "push-pull". (C) Tocha tipo "spool on gun" com suporte para bobina de 100mm de diâmetro e 0,5kg.

A tabela 7 apresenta recomendações básicas para a seleção do tipo de sistema de alimentação em função do comprimento do cabo da tocha e da bitola do arame utilizado.

Tabela 7 - Características operacionais dos mecanismos de alimentação (1).

Mecanismo de alimentação	Distância alimentador pistola (m)	Bitolas de arame manuseadas (mm)
Por impulso "push"	3,0 a 3,5	$\geq 1,6$
Por tração "pull"	3,0 a 3,5	$\leq 1,6$
Por impulso - tração "push-pull"	8,0	0,8 a 1,2
Bobina sobre a pistola "spool on gun"	15,0	0,8 a 1,2

### Vantagens e limitações do processo GMAW

A soldagem GMAW do alumínio, além de possuir a vantagem de ser aplicável a todas as posições de soldagem e de efetuar uma eficiente remoção do filme de óxido através do arco elétrico para permitir a fusão da junta e do metal de adição, permite o emprego de velocidades de soldagem elevadas, controle sobre a profundidade de penetração e geração de zonas termicamente afetadas estreitas. Essa flexibilidade do processo é, indiscutivelmente, o que o torna tão atrativo para a soldagem das ligas de alumínio.

As principais limitações do processo GMAW estão relacionadas às dificuldades para alimentação do arame, conforme foi discutido anteriormente. Os problemas de alimentação de arame restringem a livre movimentação da tocha e o acesso a diferentes pontos de soldagem. Os problemas observados no início e no término do cordão, apesar de tecnicamente superados, também criam algumas dificuldades quando o equipamento não possui os recursos necessários para eliminá-los. Outra limitação é a vinculação da energia do arco com a quantidade de material de adição aportado, ou seja, a impossibilidade de efetuar regulagens independentes de energia de soldagem e quantidade de consumível introduzido na junta. Dessa forma, a soldagem autóloga (sem metal de adição) não é possível com o processo GMAW.

### Processo GMAW pulsado

O processo GMAW pulsado é uma variação do GMAW convencional, no qual a transferência metálica ocorre periodicamente, controlada pela pulsação da corrente de soldagem. A corrente de base é utilizada para manter o arco estável, enquanto que os pulsos de corrente são sobrepostos para induzir a transferência do metal. O resultado desta técnica é um processo no qual ocorre transferência goticular controlada, porém com corrente média de soldagem reduzida, normalmente inferior à corrente de transição para uma dada liga e diâmetro de eletrodo. As vantagens deste processo aplicado ao alumínio são:

- condições de arco mais estáveis;
- transferência goticular controlada com níveis de corrente média menores e, conseqüentemente, menor aporte térmico;
- maior controle sobre a poça de fusão;
- em consequência dos itens anteriores, o processo se aplica à soldagem de chapas finas e juntas fora da posição plana com excelentes resultados;
- uso de arames de maior bitola, eliminando o problema de alimentação existente em arames finos, tendo em vista os níveis de corrente média praticáveis com o processo pulsado;
- redução do nível de contaminantes transferidos à poça de fusão pelo arame devido à menor área superficial, associada à possibilidade de se utilizar um arame de bitola maior;
- redução do nível de porosidade, devido ao controle do fluxo de metal líquido para a poça de fusão e de sua movimentação;
- boa aparência do cordão de solda;
- baixo nível de distorções;
- custo final da operação mais baixo.

Apesar de todas as vantagens apresentadas no parágrafo anterior, o processo GMAW pulsado ainda sofre forte resistência devido às dificuldades de se estabelecer os parâmetros ótimos para soldagem. A condição ótima para a soldagem pulsada é aceita como sendo aquela na qual se obtém a transferência de uma gota por pulso. Entretanto, atingir e reconhecer essa condição ótima, mesmo para um profissional com certa experiência, não é uma tarefa fácil. Existem equipamentos que possuem programas introduzidos na sua memória que teoricamente estabelecem os parâmetros ótimos para a soldagem em uma condição específica (metal de base, tipo e bitola do consumível, gás de proteção, posição e técnica de soldagem etc.). Entretanto, havendo variações em pelo menos uma dessas condições de soldagem, o conjunto de parâmetros pode não mais estar otimizado. A experiência com o processo e a pesquisa na literatura específica tornam a tarefa mais simples e rápida.

### Processo GTAW (TIG)

O processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) ou TIG como é mais conhecido atualmente, é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Conforme pode-se notar pela figura 8, a poça de soldagem, o eletrodo e parte do cordão são protegidos através do gás de proteção que é soprado

pelo bocal da tocha. No processo, pode-se utilizar adição ou não (solda autógena), e seu grande desenvolvimento deveu-se à necessidade de se disponibilizar processos de soldagem eficientes para materiais difíceis, como o alumínio e magnésio, notadamente na indústria da aviação no começo da Segunda Grande Guerra Mundial. Assim, com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e custo relativamente baixo, de uso em aplicações diversas, com inúmeras vantagens que serão descritas a seguir.

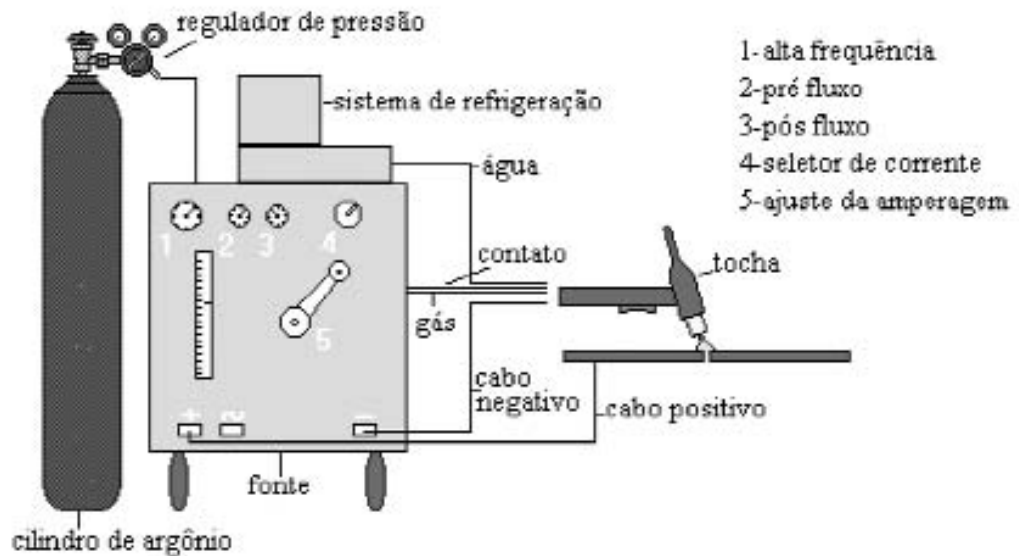


Figura 8 – Diagrama esquemático do processo GTAW

#### Princípios de operação

O GTAW utiliza um eletrodo de tungstênio (ou liga de tungstênio) preso a uma tocha. Por essa mesma tocha é alimentado o gás que protegerá a solda e o próprio eletrodo contra a contaminação da atmosfera. O arco elétrico é criado pela passagem de corrente elétrica pelo gás de proteção ionizado, estabelecendo-se o arco entre a ponta do eletrodo e a peça. Em termos básicos, os componentes do GTAW são:

1. Tocha;
2. Eletrodo;
3. Fonte de energia;
4. Gás de proteção.

#### Vantagens

1. Produz soldas de qualidade superior, geralmente livres de defeitos;
2. Está livre dos respingos que ocorrem em outros processos a arco;
3. Pode ser utilizado com ou sem adição;
4. Permite excelente controle na penetração de passes de raiz;
5. Pode produzir excelentes soldagens autógenas (sem adição);
6. Pode utilizar fontes de energia de baixo custo;
7. Permite um controle preciso das variáveis da soldagem;
8. Pode ser usado em quase todos os metais, inclusive metais dissimilares;
9. Permite um controle independente da fonte de calor e do material de adição.

#### Limitações e potenciais problemas

1. Taxas de deposição inferiores em relação aos processos com eletrodos consumíveis;
2. Há necessidade de maior destreza e coordenação do operador em relação ao SMAW e GMAW;
3. É menos econômico que os processos de eletrodos consumíveis para espessuras a partir de 10 mm;
4. Há dificuldade de manter a proteção em ambientes turbulentos;
5. Pode haver inclusões de tungstênio, no caso de haver contato do mesmo com a poça de soldagem;
6. Pode haver contaminação da solda se o metal de adição não for adequadamente protegido;

7. Há baixa tolerância a contaminantes no material de base ou adição;
8. Vazamento no sistema de refrigeração pode causar contaminação ou porosidade, sopro ou deflexão do arco, como em outros processos;

#### Variáveis do processo

As principais variáveis do processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, a velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem de forma independente, havendo forte interação entre elas.

Com relação à corrente de soldagem, pode-se considerar, de uma forma geral, que ela controla a penetração da solda, numa relação de proporcionalidade direta. Ainda assim, a corrente afeta também a tensão do arco, sendo que, para um mesmo comprimento de arco, um aumento na corrente causará um aumento na tensão do arco. A soldagem do alumínio e suas ligas é geralmente efetuada com corrente alternada (CA), para que haja a chamada limpeza catódica, ou seja, a remoção da camada de óxido refratário presente na superfície do material.

A tensão do arco (designação dada para a variação de tensão entre o eletrodo e a peça), é fortemente influenciada por diversos fatores, a saber:

1. Corrente do arco;
2. Perfil da ponta do eletrodo;
3. Distância entre o eletrodo e a peça (comprimento do arco);
4. Composição do gás de proteção.

A tensão do arco está diretamente associada ao comprimento do arco, à largura da poça e à energia de soldagem. A determinação da tensão ideal de trabalho deve considerar o aspecto do cordão desejado, o comprimento de arco mais adequado (em geral, o menor possível) e outras condições relevantes, como por exemplo a possibilidade de contaminação do eletrodo e do gás de proteção, a dificuldade de alimentação do material de adição, mudanças de temperatura e erosão do eletrodo.

A velocidade de soldagem afeta a penetração e a largura do cordão, sendo entretanto, na maioria das vezes, uma consequência dos demais parâmetros de soldagem selecionados e da definição dos padrões de qualidade e uniformidade adotados. Outro importante aspecto é o fato de ela determinar a produtividade do processo e, conseqüentemente, uma parcela significativa do seu custo.

A forma de alimentação do material de adição é outra condição importante na soldagem GTAW. Em processos manuais, a maneira como o material é adicionado influencia no número de passes e na aparência da solda acabada. Já no caso de soldas mecanizadas e automatizadas, a variação na velocidade significará variação na quantidade de adição por unidade de comprimento. Aumentando-se a velocidade de alimentação do arame, produzem-se soldas com menor penetração e perfis convexos. Diminuindo-se a velocidade, aumenta-se a penetração e têm-se perfis mais achatados. A variação da velocidade, obviamente, tem limites práticos, fora dos quais não se consegue a produção de um cordão de solda adequado.

#### **Eletrodo de tungstênio**

No processo GTAW os eletrodos não são consumíveis e têm o papel de servir como um dos terminais do arco que gerará o calor para o processo. Ao aproximar-se da sua temperatura de fusão (3410°C), o tungstênio torna-se termoiônico, como uma fonte disponível de elétrons. Os eletrodos são classificados com base em sua composição química, conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Características dos eletrodos de tungstênio.

Classificação AWS	Composição Química ( % em peso )				
	Tungstênio	Tório	Zircônio	Outros	Cor de identificação
EWP	99,5	-	-	0,5	Verde
EWTh-1	98,5	0,8 a 1,2	-	0,5	Amarelo
EWTh-2	97,5	1,7 a 2,2	-	0,5	Vermelho
EWZr	99,2	-	0,15 a 0,40	0,5	Marrom

A adição desses elementos tem a finalidade de aumentar a emissividade eletrônica, a estabilidade de arco e a durabilidade do eletrodo.

A tabela abaixo mostra os valores da intensidade de corrente elétrica em função do tipo e diâmetro do eletrodo e da corrente elétrica utilizada, onde se observa o baixo nível de corrente suportado pelo eletrodo quando este trabalha com a corrente contínua polaridade inversa (eletrodo positivo).

Tabela 9 - Valores de corrente em função do diâmetro do eletrodo e do tipo de corrente elétrica.

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente contínua (A)		Corrente alternada (A)	
	Direta (E <sup>-</sup> )	Reversa (E <sup>+</sup> )	EWP	EWZr
0,26	até 15	-	até 15	até 15
0,51	5 - 20	-	5 - 15	5 - 20
1,02	15 - 80	-	10 - 60	15 - 80
1,59	70 - 150	10 - 20	50 - 100	70 - 150
2,38	150 - 250	15 - 30	100 - 160	140 - 235
3,18	250 - 400	24 - 40	150 - 210	225 - 325
3,97	400 - 500	40 - 55	200 - 275	300 - 400
4,76	500 - 750	55 - 80	250 - 350	400 - 500
6,35	750 - 1000	80 - 125	325 - 450	500 - 630

O eletrodo de tungstênio puro é utilizado na soldagem com corrente alternada, sendo que o ligado ao zircônio suporta maior nível de corrente, como mostrado na tabela. Com corrente contínua é recomendada a utilização do eletrodo ligado ao tório.

Os eletrodos de tungstênio puro (EWP) são recomendados para a soldagem do alumínio e suas ligas. Possuem, no mínimo, 99,5% de W e têm uma capacidade de corrente inferior à dos eletrodos de liga de tungstênio. Entretanto, são muito utilizados em soldagem com CA, pois mantêm uma extremidade limpa e arredondada, que prevê boa estabilidade ao arco neste processo.

Os eletrodos com óxido de zircônio (EWZr) também são indicados para soldagem do alumínio, pois possuem características intermediárias entre as dos eletrodos puros e as dos torinados. Eles são muito utilizados em soldagem CA, pois combinam a estabilidade e ponta arredondada do eletrodo puro e a capacidade de corrente e partida dos eletrodos torinados. Ainda assim, eles possuem resistência à contaminação mais alta que os eletrodos puros.

A preparação da extremidade do eletrodo é normalmente efetuada pelo arredondamento, esmerilhamento ou afiação química. Via de regra, uma ponta cônica é preparada, mesmo que a extremidade vá ser arredondada para um processo em CA. O arredondamento é produzido pela abertura de um arco em um bloco de cobre refrigerado a água, utilizando CA ou DCEP. A corrente é aumentada até que a extremidade se torne branca com o calor e o tungstênio começa a se fundir, formando uma pequena bola em sua extremidade.

Um problema que deve ser evitado durante o manuseio do processo GTAW é a contaminação do eletrodo de tungstênio. Normalmente, a contaminação do eletrodo ocorre quando o soldador acidentalmente mergulha o eletrodo na poça ou toca o eletrodo com o metal de adição. Uma proteção imprópria também pode causar oxidação do eletrodo e a conseqüente contaminação da solda. Outras fontes de contaminação podem ser vaporização de metais no arco, erupções ou respingos da poça causados por aprisionamento de gás e evaporação de impurezas superficiais. A contaminação pode afetar as características do arco e causar inclusões no metal de solda. Caso isso ocorra, a operação deve ser interrompida e a porção contaminada do eletrodo deve ser removida, com nova afiação de acordo com as características necessárias na ponta

### Fontes de energia

As fontes de energia usadas nos processos GTAW são do tipo corrente constante, pois, como o processo é tipicamente manual, ao haver variação no comprimento do arco, e conseqüentemente na tensão, a variação na corrente (que controla o aporte de calor no processo) será mínima. Para soldagem do alumínio e suas ligas usa-se, normalmente, corrente alternada (CA), fornecida tanto por fontes eletromagnéticas como eletrônicas.

A soldagem das ligas de alumínio com corrente contínua pode ser executada com eletrodo positivo (CCEP). Nesse caso, os elétrons fluem da peça para o eletrodo, concentrando 70% do calor no eletrodo e somente 30% na peça. O efeito de limpeza catódica, propiciada pela saída de elétrons da peça, é bastante intenso, promovendo a remoção dos óxidos refratários. Esta forma de operação, entretanto, por manter o eletrodo extremamente aquecido, necessita de eletrodos de diâmetro sensivelmente maiores, ficando a capacidade do eletrodo neste processo reduzida a cerca de um décimo da existente quando se opera em CCEN.

### Gás de proteção

O gás de proteção é direcionado pela tocha de modo a proteger o arco e a poça de fusão, evitando a degradação do eletrodo e a contaminação do material metálico fundido pela atmosfera. Ele também pode ser utilizados para proteger a raiz da solda, como gás de purga, evitando a oxidação durante a soldagem.

Na soldagem do alumínio usam-se o argônio, o hélio e as misturas destes dois gases, assim como na soldagem GMAW. O argônio é mais utilizado que o hélio nesse processo devido às seguintes características :

- Possibilita arco mais suave;
- Penetração reduzida;
- Ação de limpeza mais intensa;
- Baixo custo e alta disponibilidade;
- Maior resistência a deslocamentos de ar;
- Melhor partida do arco.

A menor penetração é particularmente útil na soldagem de materiais finos ou soldas fora de posição. O hélio transmite maior calor para uma mesma corrente e tensão que o argônio e, portanto, é particularmente importante na soldagem de peças espessas. Características intermediárias podem ser obtidas através da mistura dos dois gases. A principal característica envolvida no processo de proteção é a densidade dos gases. Neste aspecto, o argônio, por ter uma densidade aproximadamente dez vezes maior que a do hélio, forma uma camada sobre a área de solda após deixar o bocal, ao contrário do hélio que, por ser extremamente leve, tende a subir em torno do bocal ao deixá-lo. Assim, para prover a mesma eficiência de proteção, a vazão de hélio deverá ser de 2 a 3 vezes maior que a vazão de argônio.

Tabela 10 - Gases e misturas indicadas para a soldagem do alumínio e suas ligas pelo processo TIG.

Metal	Tipo de soldagem	Espessura da chapa (mm)	Gás recomendado
Alumínio e suas ligas	Manual	< 3,0	Argônio
		> 3,0	Ar + 25 / 75% He
	Mecanizado	qualquer	Ar + 25 / 75% He

O GTAW é um processo perfeito para a soldagem do alumínio, podendo ser realizadas operações em todas as espessuras e soldagens, autógenas ou não. Na maioria dos casos é utilizada CA, devido à limpeza catódica. Na soldagem de superfícies finas, algumas vezes é utilizado o CCEP. Para seções espessas (acima de 1/4") utiliza-se CCEN com hélio em processos automáticos sendo que, devido à ausência de limpeza catódica, as peças têm de ser limpas imediatamente antes do processo. Em CA, utiliza-se o argônio por prover melhor limpeza, melhor inicialização do arco e qualidade superior de solda.

Como se pode avaliar pelas curvas da figura 9, a tensão do arco obtido com hélio é significativamente maior que a do obtido com o argônio. Assim sendo, o hélio fornece mais calor ao processo, permitindo as vantagens discutidas acima.

A vazão de gás de proteção deve ser estabelecida em função do deslocamento de ar, do tamanho do bocal e da dimensão da poça. Vazões inferiores ao mínimo produzem proteção insuficiente com deterioração do aspecto do cordão, enquanto que vazões excessivas causam turbulência que pode aspirar contaminantes da atmosfera. Quando o ambiente for sujeito a deslocamentos de ar intensos, deve-se introduzir anteparas de proteção, em vez de aumentar a vazão do gás, o que, além de mais oneroso, pode levar ao problema da turbulência.

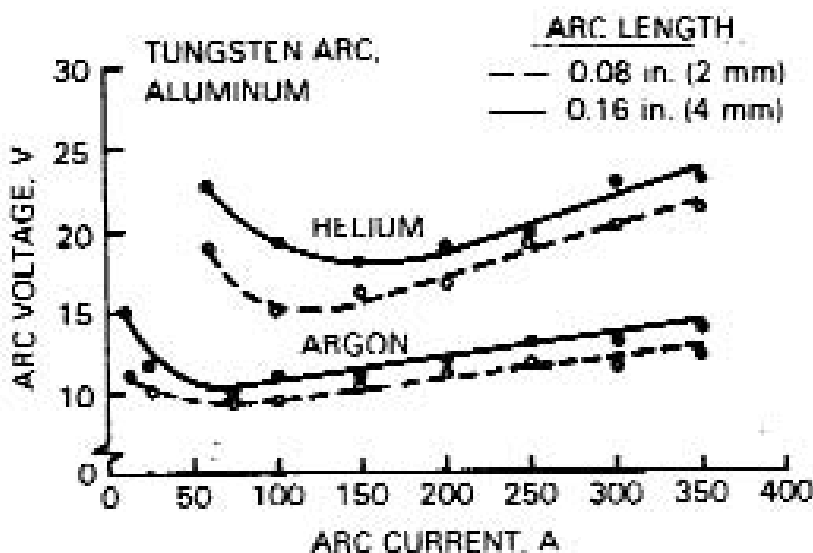


Figura 9 - Influência da atmosfera protetora na tensão do arco no processo GTWA.

#### Métodos de iniciação do arco

O método mais simples de iniciação do arco, o toque do eletrodo na peça, apesar de extremamente simples, não é recomendado, pois, ao tocar a peça, o eletrodo pode contaminá-la e danificar-se. Outro método é a utilização de uma fonte de alta frequência, que fornece uma alta tensão com alta frequência em série ao circuito de soldagem, para ionizar o gás e permitir a abertura do arco. Este método tem o inconveniente de gerar grande quantidade de distúrbios para a rede de alimentação elétrica.

A partida pulsada também pode ser utilizada, sendo obtida através de pulsos de alta tensão que ionizam o gás e permitem a abertura do arco, trabalhando via de regra com correntes iguais às de soldagem. A partida através de arco piloto pode ser utilizada com fontes de CC, mantendo-se um arco entre o eletrodo e o bocal da tocha. Este arco piloto ioniza o gás necessário para estabelecer o arco. O arco piloto é alimentado por uma pequena fonte e é iniciado por alta frequência.

## 4) Metais de adição

Tabela 11 - Seleção dos metais de adição em função dos metais base para a soldagem do alumínio.

Metais de base		1060, 1070, 1080, 1350	1100	2014, 2036	2219	3003, ALCLAD 3003	3004	ALCLAD 3004	5005, 5050
Características		WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM
319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0, 380.0	Metais de adição 2319 4043 4145	B A A A A A A A B A A A	B A A A A A A A B A A A	B A A A A A C C B C A A A B C B A A	B A A A A A C C B C A A A B C B A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A
413.0, 443.0, 444.0, 356.0, A356.0, A357.0, 359.0	4043 4145 A356.0 A357.0 5356	A A A A A A A A B B A A	A A A A A A A A B B A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	A A A A A A A A B B A A	A A A A A A A A B B A A	A A A A A A A A B B A A	A A A A A A A A B B A A
7005, 7021, 7039, 7046, 7146, 710.0, 711.0	4043 4145 5183 5356 5554 5556 5654	A A C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A A C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	A B C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A D C B A A B A B A A A B B A A A A C C A A A A B C A A A A C C A A A B	A D C B A A B A B A A A B B A A A A C C A A A A B C A A A A C C A A A B	A B C B A A B A B A A A B A A A A A C A A A A A B A B A A A C A A A A A
6061, 6070	4043 4145 4643* 5183 5356 5554 5556 5654	A A C A A A A A D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A A C A A A A A D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	A B C A A A A A D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A D C A A A B C D B A A B A B A A A B B A A A A B A B A A A	A D C A A A B C D B A A B A B A A A B B A A A A B A B A A A	A B C A A A A B D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A
6005, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	4043 4145 4643* 5183 5356 5554 5556 5654	A A C A A A A A D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A A C A A A A A D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	A B C A A A A A D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A D C A A A B C D B A A B A B A A A B B A A A A B A B A A A	A D C A A A B C D B A A B A B A A A B B A A A A B A B A A A	A B C A A A A B D B A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A
5454	4043 5183 5356 5554 5556 5654	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A A A A A B A B B A A	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A B A A A B A B B A A		A A A A A A	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A A A A A B A B B A A	A D C C A A B A B B A A B B A B A A C C A A A A B A B B A A	A D C C A A B A B B A A B B A B A A C C A A A A B A B B A A	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A A A A A B A B B A A
511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0, 5154, 5254	4043 5183 5356 5554 5556 5654	A B C C A A B A B B A A C A A A A A B A B B A A C A A A B A	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A A A A A B A B B A A		A A A A A A	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A A A A A B A B B A A C A A A B A	A D C C A A B A B B A A B B A B A A C C A A A A B A B B A A C C A A A B	A D C C A A B A B B A A B B A B A A C C A A A A B A B B A A C C A A A B	A B C C A A B A B B A A B A A B A A C A A A A A B A B B A A
5086, 5056	4043 5183 5356 5554 5556 5654	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A		A A A A A A	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A	A C C B A A A A B A A A A B A A A A A A B A A A	A C C B A A A A B A A A A B A A A A A A B A A A	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A
5083, 5456	4043 5183 5356 5554 5556 5654	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A		A A A A A A	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A	A C C B A A A A B A A A A B A A A A A A B A A A	A C C B A A A A B A A A A B A A A A A A B A A A	A B C B A A A A B A A A A A A A A A A A B A A A
5052, 5652	4043 5183 5356 5554 5556 5654	A B C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A B C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A A A A A A	A A A A A A	A B C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A B C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A	A C C A A A B A B A A A B B A A A A B A B A A A	A B C A A A B A B A A A B A A A A A B A B A A A
5005, 5050	1100 4043 4145 5183 5356 5556	C B A A A A A A C A A A B A D B A A C A B B A A C A B B A A C A B B A A	C B A A A A A A C A A A B A D B A A C A B B A A C A B B A A C A B B A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	C C A A A A A B C A A A B B D B A A C A B C B A C A B C B A C A B C B A	A B C A A A B A B A A A C A B A A A B A B A A A	A B C A A A B A B A A A B B A A B A B A B B A A	B A A A A A A B D A A A B A C B A A B A B B A A B A C B A A
ALCLAD 3004	1100 4043 4145 5183 5356 5554 5556	D B A A A A A A C A A A B A D B A A C A B C B A C A B C B A	D B A A A A A A C A A A B A D B A A C A B C B A C A B C B A	B B A A A A A A D A A A	B B A A A A A A B A A A	C C A A A A A B C A A A B B D B A A C A B C B A C A B C B A C A B C B A	A D D A A A B A C C A A B B B C A A C C A B A A B A C C A A	A D D A A A B A C C A A B B B C A A C C A B A A B A C C A A	1 1 0 0 4 0 4 3 4 1 4 5 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6
3004	1100 4043 4145 5183 5356 5554 5556	D B A A A A A A C A A A B A D B A A C A B B A A C A B B A A	D B A A A A A A C A A A B A D B A A C A B B A A C A B B A A	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	C C A A A A A B C A A A B B D B A A C B C B A A C A B C A A C B C A A A	A B D A A A B A C C A A B B B C A A C C A B A A B A C C A A	1 1 0 0 4 0 4 3 4 1 4 5 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6	
3003, ALCLAD 3003	1100 4043 4145	B B A A A A A A B A A A A A C B A A	B B A A A A A A B A A A A A C B A A	B B A A A A A A B A A A	B A A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A A A C B A A	1 1 0 0 4 0 4 3 4 1 4 5		
2219	2319 4043 4145	B A A A A A A A B A A A	B A A A A A A A B A A A	B A A A A A B C B C A A A B C B A A	A A A A A A B C B C A A A B C B A A	2 3 1 9 4 0 4 3 4 1 4 5			
2014, 2036	2319 4043 4145	B A A A A A A A B A A A	B A A A A A A A B A A A	C A A A A A B C B C A A A B C B A A	2 3 1 9 4 0 4 3 4 1 4 5				
1100	1100 4043 5356	B B A A A A A A B A A A	B B A A A A A A B A A A	1 1 0 0 4 0 4 3 5 3 5 6					
1060, 1070, 1080, 1350	1100 1188 4043	B B A A A B C C A A A A A A B A A A	1 1 0 0 1 1 8 8 4 0 4 3						

5052, 5652	5083 5456	5086, 5056	511.0,512.0, 513.0,514.0, 535.0, 5154, 5254	5454	6005, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	6061, 6070	7005, 7021, 7039, 7046, 7146, 710.0, 711.0	413.0,443.0, 444.0, 356.0, A356.0, A357.0, 359.0	319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0,380.0		
WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	WSDCTM	
A A A A A A	A A A A A	A A A A A	A A A A A	A A A A A A	B B A A A A A A A B A A A A	B B A A A A A A A B A A A A	B B A A A A A A A B A A A A	B B A A A A A A A B A A A A	B B A A A A A A A B A A A A	B A A A A A A B B B A A	2 3 1 9 4 0 4 3 4 1 4 5
A A A A A A	A B B A A	A B B A A	A B B A A	A B B A A A	A B A A A A A A A B B A A	A B A A A A A A A B B A A	A B B A A A A A A B B A A	A B A A A A A A A B B A A A A A A A A A A	A B A A A A A A A B B A A B A A A A A A A A A A A A A A	4 0 4 3 4 1 4 5 A 3 5 6 . 0 A 3 5 7 . 0 5 3 5 6	
B A B B A	A A A A A	A A A A A	A A A B A	A A A B A				A A A A B			
B D C B A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	4 0 4 3 4 1 4 5 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 3 5 6 5 4	
A D C A A	A D C A	A D C A	A D C A	A D C B A	A C B A A A B A A C C A B A A C C A C C A A A A B A B C A A C C A B B	A C B A A A B A A C C A B A A C C A C C A A A A B A B C A A C C A B B	A C B A A A B A A C C A B A A C C A C C A A B B A B A A C C A C B A A B	4 0 4 3 4 1 4 5 4 6 4 3 * 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 6 5 4			
A D C A A	A B C A	A B C A	A B C A	A B C B A	A C B A A A B A A C C A B A A C C A C C A A A A B A B C A A C C A B B	A C B A A A B A A C C A B A A C C A C C A A B B A B A A C C A C B A A B	4 0 4 3 4 1 4 5 4 6 4 3 * 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6 5 6 5 4				
A D C C A A A A B A A B A A A C C A A A A A B B A A B C A B	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	4 0 4 3 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6 5 6 5 4				
A D C C A A A A B B A B A A A C C A A A A A B B B A B C A A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	A A B B A A A B A A A B C A A A A B B A A A B B A	4 0 4 3 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6 5 6 5 4				
A A B A A A B A A A C C A A A A A B A A B C A A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A B A A A A B A A A A B A A	4 0 4 3 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6 5 6 5 4				
A A B A A A B A A A C C A A A A A B A A B C A A A	A A B A A A A A A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A A A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A A A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A A A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A A A A A A B A A A A B A A	A A B A A A A A A A A A B A A A A B A A	4 0 4 3 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6 5 6 5 4				
A D C B A A A B C B A B A C A C C A A A A A B C B B C A A A	4 0 4 3 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 4 5 5 5 6 5 6 5 4										
1 1 0 0 4 0 4 3 4 1 4 5 5 1 8 3 5 3 5 6 5 5 5 6											

- NOTAS**
- Combinações de metais de base sem graus atribuídos não são usualmente recomendadas.
  - Os graus não se aplicam a estas ligas quando tratadas termicamente após soldagem.
  - \*4643 proporciona maior resistência em soldas de ligas da série 6XXX em chapas grossas após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento pós-soldagem.
  - 4047 pode ser usada em vez de 4043 para chapas finas, devido ao menor ponto de fusão das ligas 4047.

Símbolo	Características
<b>W</b>	Facilidade de soldagem (isenção de trincas).
<b>S</b>	Resistência da junta soldada (condição como soldado). (Aplicado particularmente a juntas de filete. Todas as varetas e arames mencionados atendem aos limites de resistência mínimos especificados para juntas de topo).
<b>D</b>	Dutilidade (ranking baseado na capacidade de alongamento da solda sob dobramento).
<b>C</b>	Resistência a corrosão após imersão contínua ou alternada em água pura ou salgada.
<b>T</b>	Recomendado para serviço em temperaturas acima de 65°C.
<b>M</b>	Compatibilidade visual de coloração após anodização.

\* A, B, C e D são graus relativos em ordem decrescente de valor. Os graus têm significado relativo apenas dentro de cada bloco.

**Como utilizar:**

- 1 – Selecione os metais de base a serem soldados (um na coluna lateral esquerda e outro na linha superior);
- 2 – Encontre o bloco onde a coluna e a linha se cruzam;
- 3 – Este bloco contém filas horizontais de letras (A, B, C ou D) representativas das ligas que se encontram na mesma fila, no final à direita. As letras em cada fila mostram os graus de A a D para as características listadas no topo de cada coluna – W, S, D, C, T e M;
- 4 – Analise as características da solda produzida por cada um dos metais de adição. Você verá que é possível escolher entre as características, até selecionar o metal de adição que melhor se enquadre nas suas necessidades.

**Exemplo:**

Na união de metais de base de classificação 3003 e 1100, encontre o bloco onde eles se cruzam. Agora, note que o metal de adição 1100 proporciona excelente ductilidade (D), resistência a corrosão (C), desempenho em temperaturas elevadas (T) e compatibilidade visual após anodização (M), com boa facilidade de soldagem (W) e resistência (S).

Entretanto, se facilidade de soldagem e resistência são os itens mais importantes, e ductilidade e compatibilidade visual podem ser levemente sacrificados a liga 4043 pode ser usada com vantagens.

## 5 - Controle de qualidade na soldagem do alumínio e suas ligas

Descontinuidades são interrupções na estrutura típica da soldagem e podem ocorrer no metal de base, no metal fundido e nas zonas termicamente afetadas. Quando estas descontinuidades levam o material a não satisfazer os requisitos do trabalho a ser realizado elas são classificadas como defeitos.

As principais descontinuidades observadas na soldagem do alumínio e suas ligas são trincas, porosidades, falta de penetração, falta de fusão, inclusão de tungstênio e respingos. A adoção de procedimentos de soldagem adequados, a correta seleção de consumíveis (metal de adição e gás de proteção) e a observação de todos os cuidados relacionados com a preparação e pós-processamento da junta garantem a obtenção de níveis de qualidade satisfatórios

**Trincas**

As trincas são geradas por tensões que podem ocorrer durante a utilização do componente em temperaturas relativamente baixas (trinca a frio) ou durante um tratamento térmico ou utilização em altas temperaturas (trinca a quente). Geralmente, as trincas começam a se propagar a partir de concentradores de tensões, que são regiões da peça, que por algum motivo relacionado à forma (redução de seção, cantos vivos, inclusões e descontinuidades), tendem a possuir uma tensão maior do que a esperada para a seção à qual ela pertence.

As trincas podem se propagar em várias direções. Em se tratando especificamente de regiões soldadas, as trincas geralmente são longitudinais ou transversais, dependendo das tensões reinantes e das características do material. As trincas podem ser causadas por uma especificação incorreta de metal de adição, por uma abertura de junta inadequada, por preparação imprópria das bordas das chapas a serem soldadas e pela utilização de uma corrente de soldagem baixa. Na tabela 12 estão apresentadas as principais causas e soluções para trincas.

Na figura 10 observa-se uma trinca a quente que se propaga intergranularmente, numa direção longitudinal em relação ao cordão de solda, sendo que o metal de base utilizado foi o 2014-T6 e o consumível AWS ER 4043.

Tabela 12 – Causas e soluções para trincas.

Possíveis causas	Possíveis soluções
<b>Material de base de má soldabilidade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evite materiais de base que não sejam soldáveis com o processo disponível</li> </ul>
<b>Perfil da solda inadequado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste os parâmetros de soldagem para produzir um cordão com perfil adequado (tensão do arco, velocidade de soldagem e gás de proteção)</li> </ul>
<b>Arco muito longo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encurte o arco</li> </ul>
<b>Cratera final da solda com mau acabamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retorne um pouco com a tocha para dentro da cratera final antes de extinguir o arco. Utilize recursos para preenchimento de cratera</li> </ul>
<b>Montagem muito rígida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escolha uma seqüência de soldagem que induza as menores tensões possíveis no metal de solda</li> <li>• Controle a distribuição do calor na peça de trabalho</li> <li>• Aperfeiçoe a construção</li> </ul>
<b>Chapas sujas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpe a superfície das chapas</li> </ul>
<b>Vibrações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nunca solde uma peça que esteja sofrendo, simultaneamente, trabalho com ferramentas pneumáticas ou similares</li> </ul>

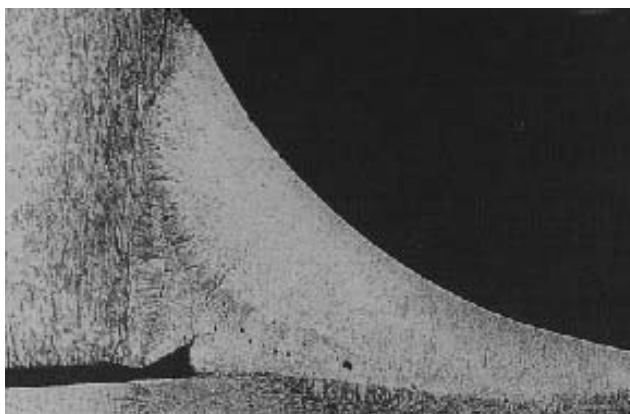


Figura 10 - Exemplo de trinca a quente.

### Trinca de cratera

É o tipo de trinca que ocorre no final da solda, quando a pouca quantidade de material da poça de fusão começa a se solidificar. Essa solidificação ocorre da periferia da poça para o centro, o que, associado à contração do material, leva à geração de um rechupe central. Com isso, é impossível deixar de haver tensões nesse local e, conseqüentemente, as trincas encontram uma condição favorável para se propagar. Estas são normalmente causadas por uma manipulação inadequada da tocha ou por uma especificação incorreta de metal de adição (1).

Observa-se na figura 11 uma trinca de cratera causada por uma interrupção abrupta da soldagem, sem que haja tempo de um preenchimento do centro da poça de fusão.

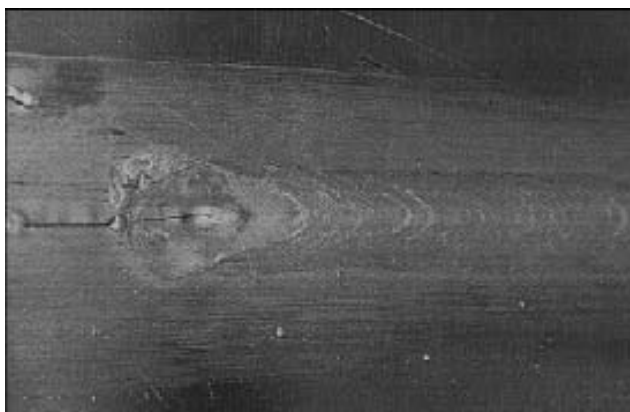


Figura 11 - Exemplo de trinca de cratera.

### Falta de penetração

É quando a penetração da soldagem não consegue atingir toda a profundidade especificada para o cordão de solda. Os problemas relacionados a esse fenômeno são a redução da área resistente e a formação de concentradores de tensão.

A falta de penetração pode ser causada por corrente de soldagem baixa, abertura de junta inadequada, preparação da borda imprópria e comprimento do arco muito longo. A figura 12 apresenta um exemplo de falta de penetração



Figura 12 - Exemplo de falta de penetração

### Falta de Fusão

A falta de fusão pode ser causada por corrente de soldagem inadequada, comprimento de arco muito longo, abertura de junta imprópria, metal de base sujo ou com camada de óxido espessa e preparação das bordas inadequada. A figura 13 apresenta um exemplo de falta de fusão.

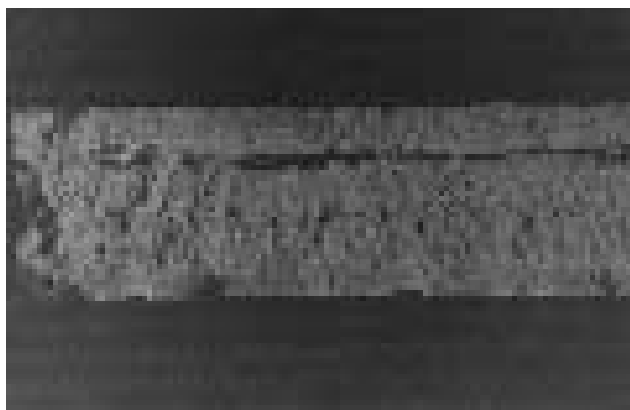


Figura 13 - Exemplo de falta de fusão associada a uma superfície de fratura (7).

### Porosidade

Caracterizada como a presença de pequenas bolsas de hidrogênio, provenientes de contaminação por água, graxa e óleos, impurezas em geral que têm sua origem a partir de gases de proteção não suficientemente puros, conduítes e mangotes contaminados, consumíveis sujos e chapa ou perfis sujos.

A porosidade, quando disposta alinhada, em quantidade excessiva ou em tamanho excessivo, pode causar decréscimo nas propriedades mecânicas da junta soldada, sendo, em geral, adequadamente avaliada por radiografia ou análise metalográfica. Pode ser causada por comprimento de arco incorreto e técnica de soldagem inadequada. Na tabela 13, estão relacionadas as principais causas e as possíveis soluções desse problema. A figura 14 apresenta exemplo de poros em uma superfície de fratura.

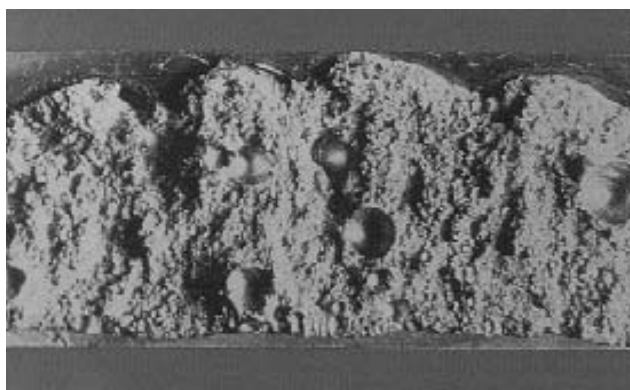


Figura 14- Exemplo de porosidade em superfície de fratura.

Tabela 13 - Causas e soluções para porosidade.

Possíveis causas	Possíveis soluções
<b>Velocidade de soldagem muito alta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avance mais lentamente</li> </ul>
<b>Em CC, polaridade errada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inverta as ligações nos terminais do equipamento de soldagem</li> </ul>
<b>Corrente inadequada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste a corrente na máquina, aumentando ou diminuindo</li> </ul>
<b>Arco muito longo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encurte o arco</li> </ul>
<b>Material de base impuro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substituir o material de base</li> </ul>
<b>Chapas sujas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpe a superfície das chapas</li> </ul>
<b>Material de base segregado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rejeite as chapas</li> </ul>

### Respingos

Na tabela 14 estão relacionadas as principais causas e as possíveis soluções desse problema.

Tabela 14 – Causas e soluções para respingos abundantes.

Possíveis causas	Possíveis soluções
<b>Corrente muito alta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminua a corrente</li> </ul>
<b>Arco muito longo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encurte o arco</li> </ul>
<b>Sopro magnético</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar distorções do arco</li> </ul>
<b>Peça de trabalho suja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpe a peça de trabalho</li> </ul>
<b>Peça de trabalho muito fria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pré-aqueça a peça</li> </ul>
<b>Tocha muito inclinada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenha a tocha formando ângulo correto com a peça de trabalho</li> </ul>

### Inclusão de tungstênio

É um tipo de descontinuidade encontrado exclusivamente em processos GTAW. As causas típicas destas inclusões são:

1. Contato da ponta do eletrodo com a poça;
2. Contato do material de adição com a ponta aquecida do eletrodo;
3. Contaminação do eletrodo por respingo da poça;
4. Extensão dos eletrodos muito além da pinça ou mandril, resultando em superaquecimento;
5. Eletrodo inadequadamente preso ao mandril;
6. Vazões de gás de proteção inadequadas ou ventos excessivos;
7. Uso de gases não apropriados como misturas argônio – CO<sub>2</sub>

A falta de proteção no processo está relacionada a descontinuidades como inclusão de tungstênio, porosidade, filmes óxidos e inclusões, fusão incompleta e fissuras.

## 6) Efeitos metalúrgicos na soldagem

Exceto quando o metal base encontra-se no estado recozido ou na condição como fundido, a soldagem por fusão provoca sempre uma redução de resistência nas ligas tratáveis e não tratáveis termicamente. Basicamente, a solda é compreendida por duas regiões. Uma delas é o cordão de solda, a qual apresenta uma estrutura bruta de solidificação cuja composição é o resultado das participações de metal base e metal de adição. A outra é a zona termicamente afetada (ZTA) no metal base, em cada lado da solda, onde ocorrem alterações metalúrgicas devido ao calor da soldagem. Por sua vez, a ZTA pode ser dividida em subzonas, as quais dependem da liga, da temperatura e tempo experimentados pelo metal (1).

### **Cordão da solda**

As propriedades da estrutura bruta de solidificação do cordão de solda são influenciadas pela composição química e taxa de solidificação. Um aumento na taxa de solidificação contribui para a obtenção de melhores propriedades mecânicas, devido à formação de uma microestrutura mais fina. Ainda, a taxa de solidificação será tanto maior quanto menor for o aporte térmico. Este último é influenciado pela velocidade de soldagem, de modo que velocidades maiores diminuem o aporte térmico cedido à solda e o tamanho dos cordões. Embora os cordões de solda menores geralmente apresentem propriedades mais elevadas, deve-se tomar cuidado em relação ao tamanho das soldas, pois quando os cordões de solda são muito pequenos, eles podem trincar durante a soldagem devido às tensões geradas em virtude da restrição imposta pelo metal base.

### **Zona termicamente afetada da solda (ZTA)**

O efeito do calor de soldagem sobre as ligas de alumínio varia com a distância a contar da solda e pode ser dividido, aproximadamente, em áreas que exprimem as diferentes temperaturas atingidas pela liga. O período de tempo em cada temperatura também é significativo para as ligas tratáveis termicamente. A largura dessas áreas e o grau de transformações metalúrgicas nas ligas tratáveis termicamente dependem da espessura e geometria da junta, do processo de soldagem, do procedimento de soldagem, temperaturas de pré-aquecimento e interpasses, dos efeitos térmicos e dispositivos de fixação.

A ZTA nas juntas feitas com os processos com proteção gasosa raramente estende-se além de meia polegada (12,7 mm) da linha do centro da solda. Contudo, para a finalidade de projeto, assume-se o valor de uma polegada (25,4 mm) de largura para cada lado da junta.

### **Ligas não-tratáveis termicamente**

Nas ligas não-tratáveis termicamente, a ZTA é considerada como uma zona única, onde o metal passa por uma faixa de temperaturas, sendo que em determinado ponto ele atinge a temperatura de recozimento, geralmente 345°C. Uma vez que a recristalização ocorre rapidamente, em especial no metal encruado, a resistência mecânica desta zona será bem próxima da resistência da liga na condição totalmente recozida, apresentando um ganho de ductilidade. Temperatura, tempo e taxa de resfriamento não são fatores tão importantes no recozimento dessas ligas ocasionado pela operação de soldagem. Dessa forma, num projeto baseado no limite de resistência à tração, utiliza-se, para o valor da tensão máxima admissível em tração para as soldas de topo nas ligas não-tratáveis termicamente, o valor mínimo de resistência da liga na condição recozida.

A popularidade das ligas de elevada resistência pertencentes à série 5XXX, tais como 5083, 5086 e 5456, em estruturas soldadas, ocorre em virtude de as mesmas apresentarem alta resistência na condição recozida e boa ductilidade. Em geral, a têmpera do metal base e outros fatores, tais como espessura, afetam muito pouco as propriedades mecânicas dessas ligas; já o mesmo não acontece com as ligas tratáveis termicamente.

As soldas nas ligas não-tratáveis termicamente possuem excelente ductilidade. Sendo assim, elas conseguem resistir a grandes deformações antes de atingir a ruptura, devido à capacidade que as mesmas apresentam de redistribuir as tensões.

### Ligas tratáveis termicamente

Nas ligas tratáveis termicamente, ocorre uma degradação das propriedades do metal base localizada na ZTA formada contigualmente à zona de fusão. A microestrutura nesta zona é alterada devido às temperaturas elevadas que a mesma experimentou durante a soldagem. Nessas ligas endurecíveis por precipitação, a ZTA apresenta dissolução ou crescimento de precipitados. Por exemplo, nas ligas da série 2XXX ela corresponde a uma dissolução, enquanto nas da série 6XXX é principalmente um crescimento de precipitados. Embora a natureza dessas ZTA possa diferir, elas são exclusivamente governadas por difusão e como tal, termicamente dependentes.

Um meio prático de determinar a largura e a extensão da ZTA é fazer-se um levantamento do perfil de dureza através de uma seção transversal da solda. A figura 15 mostra os perfis de dureza de soldas TIG realizadas em três ligas de alumínio usuais. O perfil de dureza da liga 2219-T87 mostra a ocorrência de dissolução de precipitados. A fase endurecedora é uma fase intermetálica, de modo que próximo a zona de fusão, onde ocorrem as maiores temperaturas, há uma maior dissolução dessas fases. Isto resulta num decréscimo gradual de dureza nesta zona, como ilustra a figura 15.

O perfil de dureza da liga 6061-T6 é típico de todas as ligas da série 6XXX. A ZTA é governada por um crescimento, semelhante à transformação de precipitados para formar fases não endurecedoras. Essa transformação ocorre muito rapidamente quando o metal encontra-se na faixa de temperatura entre 427°C e 288°C. Os pontos mais baixos indicados no perfil de dureza desta liga indicam que o metal experimentou temperaturas dentro desta faixa. Próximo à zona de fusão, onde as temperaturas são maiores, o precipitado encontra-se dissolvido em solução, vindo a precipitar durante o resfriamento.

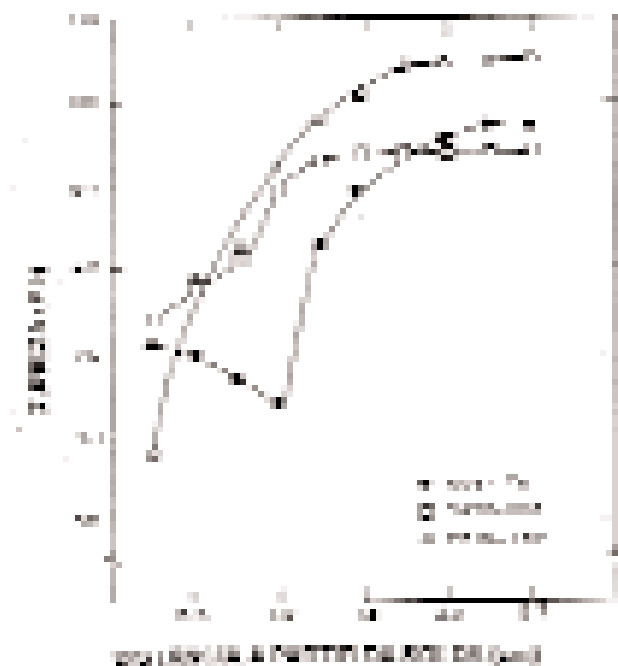


Figura 15 - Perfis de dureza de soldas TIG em ligas de alumínio.

A extensão da ZTA também pode ser identificada metalograficamente. Contudo, para as ligas endurecidas por precipitação, a metalografia ótica define somente os extremos da dissolução ou do crescimento. Por outro lado, a recristalização da ZTA das ligas endurecíveis por encruamento é facilmente identificada metalograficamente.

Devido as transformações metalúrgicas que ocorrem na ZTA serem termicamente dependentes, os processos e parâmetros de soldagem determinam a extensão do metal base que sofre degeneração.

O aporte térmico elevado e o uso de preaquecimento aumentam a perda de resistência e a largura da ZTA. Isto se verifica, particularmente, nas ligas endurecíveis por precipitação e está ilustrado na Figura 16 para soldas na liga 6061-T6 feitas com diferentes aportes térmicos.

Para melhorar a resistência da ZTA de juntas soldadas em ligas da série 6XXX, é comum a prática do tratamento térmico pós-soldagem, sendo que essa prática nem sempre é muito fácil, principalmente em peças de grandes dimensões, nas quais há dificuldade para tratar a peça inteira.

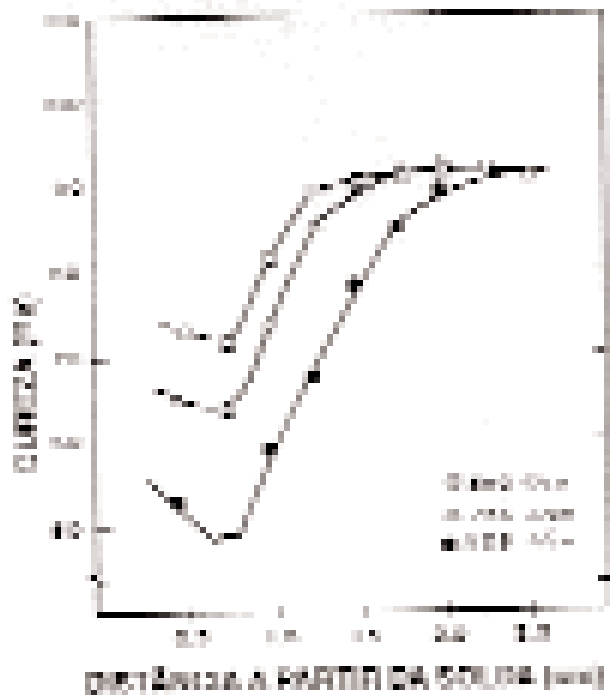


Figura 16 - Perfis de dureza de uma solda TIG na liga 6061-T6 com vários aportes térmicos

## 7) Segurança na soldagem

Os principais tópicos a serem observados nos itens de segurança são manipulação de cilindros pressurizados; aspiração de gases tóxicos associados ao processo (ozônio, dióxido de nitrogênio, etc.), gases inertes de proteção ou fumos metálicos; energia radiante, especialmente na pele e olhos (cuidados especialmente com UV, inclusive refletido pelas paredes); e choques elétricos.

### Gases

Os gases para soldagem/corte são geralmente estocados em alta pressão (até cerca de 200 bar), a qual é reduzida para aquela de trabalho (em torno de 2 bar).

A liberação súbita dos mesmos é extremamente perigosa, sendo que as seguintes regras devem ser observadas:

- Os cilindros e demais acessórios devem ser manuseados com cautela;
- A abertura de cilindros, ou fixação dos reguladores, deve ser realizada somente com ferramentas apropriadas;
  - A válvula de um cilindro nunca deve ser removida;
  - Chamas, ou qualquer outra fonte de calor (cigarros, etc.), devem ser mantidas afastadas do local de estoque dos gases;
  - A estocagem deve ser em área ventilada e protegida de eventuais invasores;
  - O equipamento deve ser devidamente limpo e sofrer inspeção e manutenção periódica (programada), e não somente ser consertado quando ocorrer defeito.

Gases inertes e oxidantes: os gases inertes geralmente utilizados são argônio e hélio, os quais não são tóxicos, ou inflamáveis. Deve-se, entretanto, tomar precaução, porque causam asfixia. Ambientes muito ricos em oxigênio são perigosos, pois esse gás promove a combustão. Por sua vez, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) não é quimicamente inerte e pode causar intoxicação.

### Radiação

O arco elétrico gera radiações desde o ultravioleta, através da luz visível, até o infra-vermelho. Não existe evidência de que o mesmo produza radiações ionizantes, mas o feixe de elétrons pode produzir raios-X.

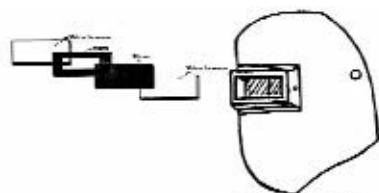
A radiação ultra-violeta queima a pele e causa danos aos olhos, além do que, ondas de curto comprimento como essas (130 a 175nm) decompõem o oxigênio, formando ozônio. Portanto, além da proteção do corpo, o operador somente deve olhar para o arco através do correto filtro colocado na máscara de solda, sendo que na tabela a seguir estão indicados aqueles mais adequados para cada situação, conforme a numeração adotada pela American Welding Society.

Tabela 15 - Filtros recomendados em função da corrente de solda e o processo de soldagem utilizado.

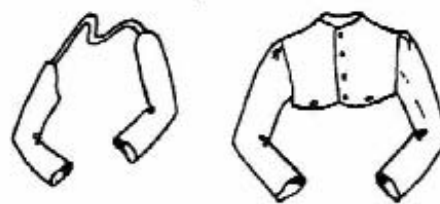
Filtros recomendados para as operações de soldagem e técnicas conexas (AWS)							
Processo	Corrente (A)	Núm. adm. (mín.)	Núm. sugerido	Processo	Corrente (A)	Núm. adm. (mín.)	Núm. sugerido
Eletrodo revestido	< 60	7	-	Eletrodo de carbono (corte com ar) Brasagem Solda branda	< 500 500 a 1000	10 11	12
	60 a 160	8	10				14
	160 a 250	10	12				3 ou 4
	250 a 550	11	14				2
MIG e Eletrodo Tubular	< 60	7	-	Pulverização térmica Arame s/ Mo Arame c/ Mo Pó metálico	(chama) (chama)		2 a 4
	60 a 160	10	11				3 a 6
	160 a 250	10	12				
	250 a 500	10	14				
TIG	< 50	8	10	Exotérmicos e cerâmicos Plasma e arco Operações de fusão	(chama)		4 a 8
	50 a 150	8	12				9 a 12
	150 a 500	10	14				4 a 6
Plasma (solda)	< 20	6	6 a 8	Solda oxigás (aços)	Espessura da chapa (mm) < 3,2 3,2 a 12,7 > 12,7		4 ou 5
	20 a 100	8	10				5 ou 6
	100 a 400	10	12				6 a 8
	400 a 800	11	14				
Plasma (corte)	< 300	8	9	Corte oxigás (aços)	< 25 25 a 100 > 150		3 ou 4
	300 a 400	9	12				4 ou 5
	400 a 800	10	14				5 ou 6

### Equipamentos de proteção

As figuras abaixo ilustram alguns dos vários equipamentos utilizados para proteção do soldador, ou operador, na soldagem e técnicas conexas. Os aventais, luvas, perneiras etc., geralmente são de couro, mas atualmente esse material está sendo substituído por sintéticos. Hoje em dia, existem máscaras de soldas com visor de cristal líquido (ou outro material), o qual é perfeitamente transparente quando não está sob efeito das radiações do arco. Entretanto, tão logo esse inicie (geralmente 1/500 s), o visor atinge o nível de filtragem pré-fixada pelo operador.



Máscara de Solda



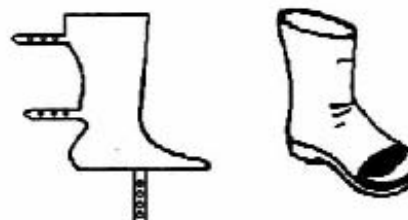
Proteção para os Braços e/ou Tórax



Tipos de Luvas



Tipos de Aventais Protetores



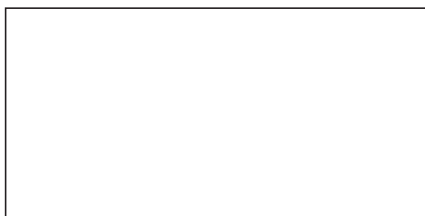
Polaina e Bota

A White Martins comercializa uma linha completa de equipamentos, consumíveis, gases puros e misturas dedicadas à soldagem e corte do alumínio e suas ligas. Consulte-nos através da nossa filial mais próxima de você .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALCAN – MANUAL DE SOLDAGEM, BRASIL-1° ED. 1993, PÁG. 1-1 a 8.19.
2. AWS – ALUMINUM ALLOYS, VOL. SEVENTY ED. PÁGS. 316 a 318.
3. ASM – CORROSION – “CORROSION OF ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS”, VOL. 13, PÁGS. 583 a 609.
4. FILHO, E.B. – SELEÇÃO DE MATERIAIS METÁLICOS - “ALUMÍNIO E LIGAS DE ALUMÍNIO”, 1988, PÁGS. 219 a 241.
5. EPSTEIN, SG – ALUMINUM AND ITS ALLOYS, THE ALUMINUM ASSOCIATION, WASHINGTON, 1980.
6. ALCOTEC – PARTNERSHIP – PRODUCT DESIGN AND DEVELOPMENT - ALUMINUM WELDING WIRE, PÁGS. 24 a 31.
7. AWS – WELDING JOURNAL, JUNE 1998, PÁGS. 37 a 42, PÁGS 31 a 35, PÁGS. 49 a 55.
8. AWS – WELDING JOURNAL, MAY 1999, PÁGS. 45 a 50.
9. AWS - WELDING JOURNAL, JULY 1999, PÁGS. 34 a 40.
10. AWS - WELDING JOURNAL, JANUARY 1999, PÁGS. 37 a 41.

Cód. 40037217 MAI/2002



 **WHITE MARTINS**

PRAXAIR INC

**Fazendo diferença**

[www.whitemartins.com.br](http://www.whitemartins.com.br)

Bauru 0800-115977 Belém (91) 211-7222 Campinas/Sorocaba/Piracicaba 0800-151715 Caxias do Sul (54) 223-4788 Contagem (31) 3359-1111 Cuiabá 0800-653070 Curitiba 0800-412728 Goiânia 0800-621050 Ipatinga 0800-338848 Joinville 0800-474040 Juiz de Fora (32) 3222-1566 Londrina 0800-437585 Manaus 0800 927272 Niterói/Cachambi (21) 2582-2222 Osasco/Diadema/Guarulhos 0800-113177 Porto Alegre 0800-517766 Porto Velho 0800-692000 Recife 0800-812400 Salvador 0800-713622 Sapucaia do Sul/Pelotas 0800-517766 Sertãozinho 0800-110404 Taubaté 0800-124999 Uberlândia 0800-342055 Varginha 0800-352100 Vitória (27) 3246-7222 Volta Redonda (24) 3348-1516