

# PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem com eletrodo revestido, mundialmente conhecido como SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*, é um processo de soldagem a arco em que a coalescência (união intensa) dos metais é obtida por um arco elétrico mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base.

O consumível utilizado neste processo, o eletrodo revestido, é composto por uma vareta metálica longa (de 230 a 460 mm ou mais), chamada de alma do eletrodo ou, simplesmente, arame. Essa vareta pode ser trefilada ou fundida e é por meio dela que a corrente elétrica é conduzida. A fusão da alma do eletrodo durante a soldagem fornece o metal de adição necessário ao preenchimento da junta. O arame possui pequeno diâmetro (entre 1,5 e 8 mm) e é revestido por uma camada de material apropriado (entre 0,5 e 5 mm), denominada revestimento do eletrodo. Em uma das extremidades do eletrodo, estabelece-se o arco elétrico; na outra, com aproximadamente 20 mm de comprimento e sem revestimento, localiza-se o ponto de contato com o equipamento de soldagem.

Dentre os processos de soldagem a arco elétrico, o SMAW é o mais simples. O investimento em equipamentos é relativamente baixo, e os eletrodos são facilmente encontrados no mercado. No entanto, por utilizar um eletrodo revestido, composto por materiais distintos (aramé e revestimento), ter comprimento limitado e conduzir corrente elétrica por toda sua extensão, o processo apresenta particularidades relevantes.

Por meio do controle da composição química do revestimento, é possível obter uma grande variedade de consumíveis, permitindo a soldagem de diversos materiais e em todas as posições. Também há maior controle sobre a microestrutura e as propriedades do metal de solda, quando comparado ao obtido com outros processos de soldagem a arco elétrico.

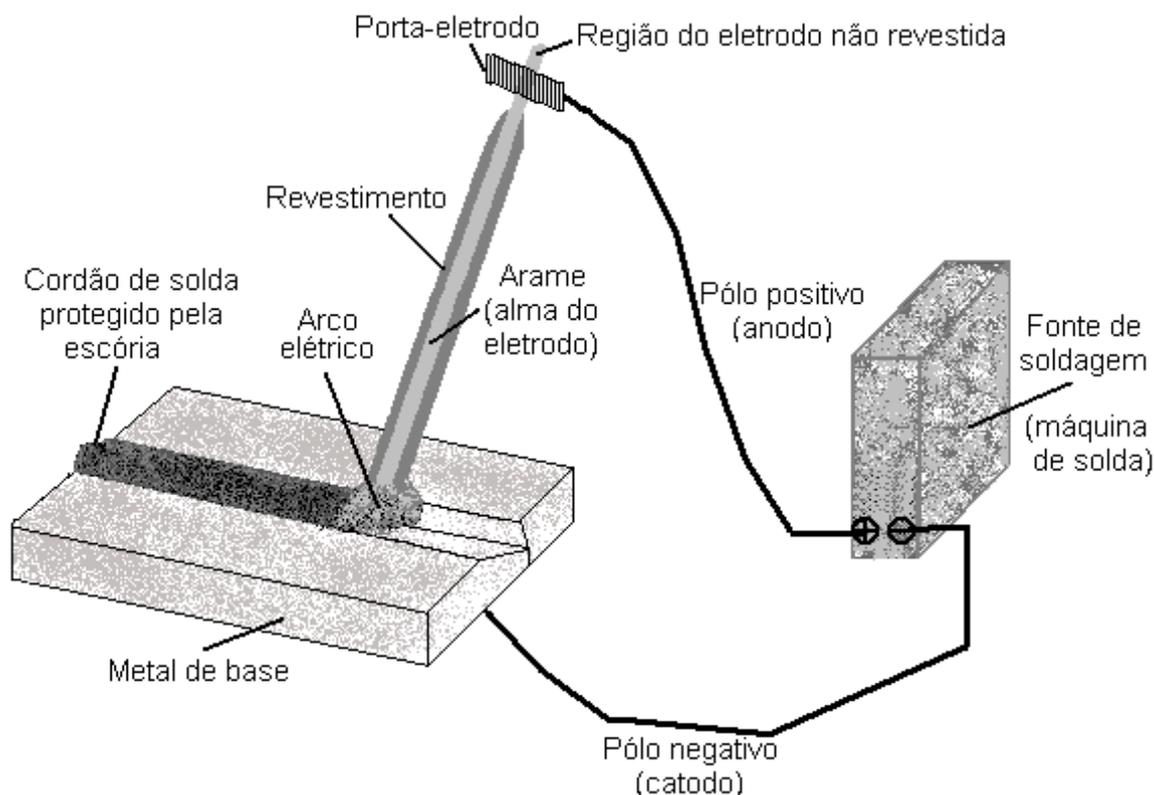
Como o eletrodo é constituído por diferentes materiais, os efeitos térmicos e elétricos durante a soldagem atuam de forma distinta sobre o arame e o revestimento.

Devido à rigidez do eletrodo, seu comprimento é limitado, o que exige trocas frequentes durante a operação, caracterizando-o como um processo intermitente. Em consequência, a produtividade do SMAW é inferior à dos processos de soldagem a arco com eletrodo consumível de alimentação contínua.

Outro aspecto relevante é o fato da corrente elétrica atravessar todo o comprimento do eletrodo, provocando seu aquecimento por efeito Joule. Uma das principais consequências desse aquecimento é a variação da taxa de fusão do eletrodo e, conseqüentemente, da sua velocidade de mergulho. Esse comportamento dificulta a automatização do processo, tornando o SMAW tipicamente manual, no qual o nível de habilidade do soldador é fundamental para a obtenção de uma solda de qualidade.

## 2. PRINCÍPIO OPERACIONAL

A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da soldagem com eletrodo revestido. A região não revestida do eletrodo entra em contato com o alicate porta-eletrodo, o qual está conectado à fonte de soldagem, normalmente do tipo corrente constante. A corrente elétrica, que pode ser alternada ou contínua, flui do porta-eletrodo para o arame (alma do eletrodo).



**Figura 1** – Desenho esquemático da soldagem manual com eletrodo revestido.

Para iniciar a soldagem, o soldador encosta a ponta do eletrodo no metal de base. Esse toque aquece o arame e inicia a queima do revestimento próximo à extremidade, promovendo a ionização de elementos presentes e estabelecendo o arco elétrico. Os gases e a escória gerados pela queima do revestimento formam uma atmosfera protetora, que preserva o arco e a poça de fusão.

Quando se utiliza corrente contínua, é possível adotar polaridade direta ou reversa. Na maioria das aplicações com eletrodo revestido, assim como nos demais processos com eletrodo consumível, emprega-se a polaridade reversa, em que o eletrodo é conectado ao polo positivo da fonte.

Após o estabelecimento do arco, o soldador deve realizar dois movimentos simultâneos:

- Um movimento de translação do eletrodo ao longo da junta (velocidade de soldagem), para distribuir o metal fundido.
- Um movimento de alimentação do eletrodo (velocidade de mergulho), para manter constante o comprimento do arco.

A qualidade do cordão de solda depende fundamentalmente da habilidade do soldador, que é o

responsável direto por:

- Abrir e fechar o arco.
- Controlar a velocidade de soldagem.
- Alimentar o eletrodo adequadamente.
- Manter o comprimento do arco estável.

### **Vantagens do Processo SMAW**

Apesar de exigir perícia do soldador, o processo de soldagem com eletrodo revestido oferece diversas vantagens:

- Um dos processos de soldagem mais utilizados, sobretudo em manutenção, reparos e cordões curtos.
- É o processo a arco mais comum em soldagem subaquática.
- Equipamentos simples, compactos e de baixo custo.
- Dispensa gás de proteção adicional – o próprio eletrodo gera os elementos protetores;
- Menor sensibilidade a correntes de ar, comparado a processos com proteção gasosa;
- Alta flexibilidade de aplicação.
- Pode ser usado em áreas de acesso limitado.
- Adequado para materiais com espessura superior a 2 mm.
- Grande variedade de eletrodos disponível no mercado, de fácil acesso.
- Soldagem possível em todas as posições.
- 
- Possibilidade de soldar materiais dissimilares.
- Compatível com a maioria dos metais e ligas metálicas usuais, como:
  - Aço carbono.
  - Aços de baixa, média e alta liga.
  - Aço inoxidável.
  - Ferro fundido.
  - Cobre, níquel e suas ligas.
  - Algumas ligas de alumínio.

### **Limitações do Processo SMAW**

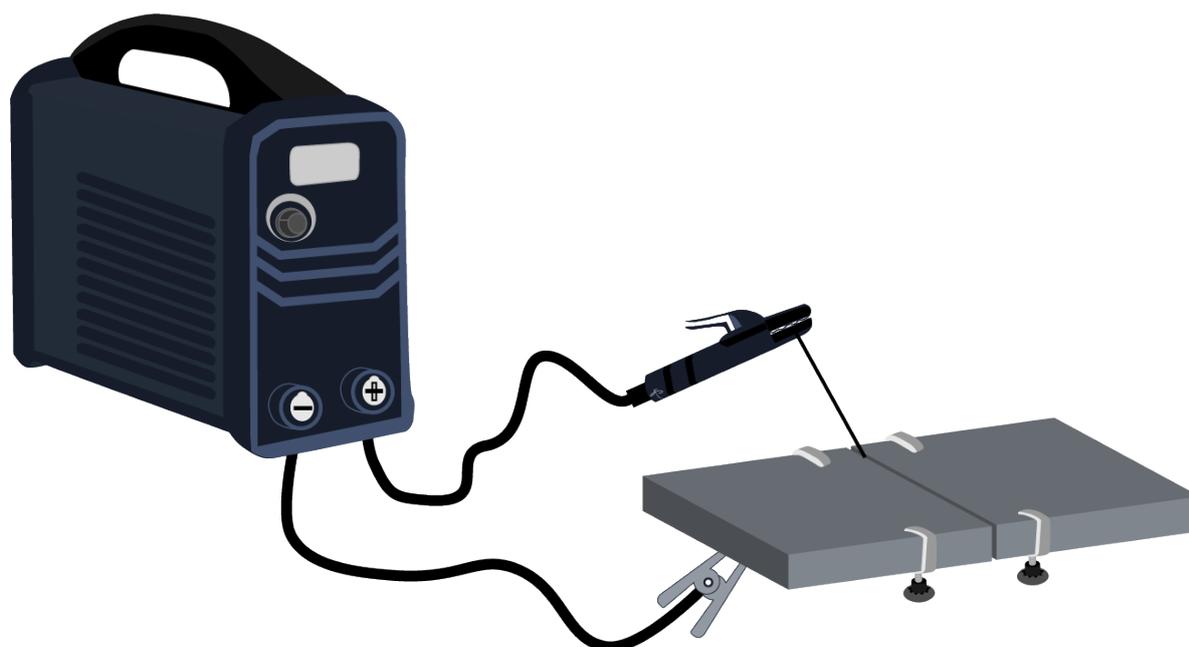
Como qualquer processo de soldagem, o SMAW apresenta algumas limitações, entre as quais destacam-se:

- Alimentação intermitente do eletrodo, exigindo paradas frequentes.
- Baixa taxa de deposição e fator de operação reduzido, especialmente quando comparado ao GMAW.
- Inadequado para ligas de baixo ponto de fusão, como chumbo, estanho e zinco, pois o calor do arco é excessivo para esses materiais.
- Não recomendado para metais reativos (ex.: titânio, zircônio), cuja soldagem exige atmosferas mais rigorosas que a gerada pelo revestimento.
- A corrente utilizada é limitada: percorre todo o comprimento do eletrodo. Amperagens elevadas provocam superaquecimento, danificando o revestimento e comprometendo o arco e sua proteção.
- Produção de escória, exigindo limpeza cuidadosa após a soldagem.

### 3. EQUIPAMENTO

O equipamento necessário para uma operação com o processo SMAW consiste (Figura 2):

- Porta-eletrodo
- Cabos
- Fonte de potência (máquina de solda)



**Figura 2** – Equipamento de soldagem com eletrodo revestido.

#### 3.1 Porta-Eletrodo

O porta-eletrodo tem a função de prender firmemente o eletrodo revestido e transmitir a corrente da máquina para ele, pela ponta não revestido do arame. A especificação desse componente é feita com base em dois critérios principais:

- A faixa de diâmetros de eletrodos (referente ao diâmetro da alma ou arame) que pode acomodar com segurança.
- A corrente máxima que o dispositivo é capaz de conduzir sem superaquecimento.

Além disso, o porta-eletrodo deve ser leve e ergonômico, permitindo ao soldador operá-lo com facilidade e segurança durante o trabalho.

A Figura 3 apresenta exemplos de diferentes tipos de porta-eletrodos utilizados no processo SMAW.



Figura 3 – Porta-eletrodos.

### 3.2 Fonte de Potência – Máquina de Solda

Um dos principais objetivos durante a soldagem é manter o comprimento do arco elétrico constante, a fim de garantir a homogeneidade do cordão de solda. No processo com eletrodo revestido, essa tarefa cabe ao soldador: ele é responsável em manter a distância entre o eletrodo e a peça constante durante a fusão do eletrodo.

Como esse controle é feito de forma manual, é comum que ocorram variações no comprimento do arco ao longo da soldagem. Tais variações afetam diretamente a tensão do arco elétrico, uma vez que essas duas variáveis estão interligadas: quanto maior o arco, maior a tensão; quanto menor o arco, menor a tensão.

Para compensar essas oscilações e garantir maior estabilidade do processo, são utilizadas fontes de potência com característica de saída do tipo corrente constante. Essas fontes são projetadas para manter a corrente praticamente estável, mesmo quando há variações na tensão provocadas pela flutuação do arco. A Figura 4 ilustra a curva característica de saída (também chamada de característica estática) de uma máquina de solda do tipo corrente constante, típica para aplicações com eletrodo revestido.

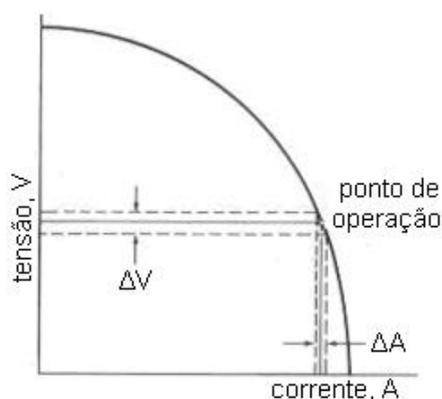


Figura 4 – Curva característica de fontes do tipo corrente constante.

Com esse tipo de fonte, variações no comprimento do arco elétrico, que podem provocar alterações significativas na tensão, são compensadas por pequenas variações na corrente. Mesmo em situações de curto-circuito (quando o eletrodo toca diretamente a peça), o valor da corrente se eleva apenas até um nível relativamente baixo, suportável pela máquina por um curto intervalo de tempo.

Construtivamente, as fontes utilizadas no processo SMAW podem ser classificadas em três tipos principais:

- Transformadores
- Transformadores-retificadores
- Geradores

Quanto ao tipo de corrente fornecida, as fontes podem operar com corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) ou ambas. Cada tipo apresenta vantagens e limitações que devem ser avaliadas cuidadosamente na seleção da fonte, de acordo com a aplicação específica e o tipo de eletrodo revestido a ser utilizado.

Além do tipo de corrente, outros fatores importantes devem ser considerados na escolha da fonte de potência para o SMAW:

- Fator de trabalho (ou ciclo de trabalho)
- Tensão de circuito aberto (tensão em vazio)
- Faixa de corrente de saída

O fator de trabalho (ou ciclo de trabalho) corresponde ao tempo máximo em que o equipamento pode operar continuamente, dentro de um ciclo de 10 minutos, sem exceder seu limite térmico. É expresso em porcentagem e vinculado a uma determinada intensidade de corrente. Por exemplo: se uma fonte suporta 7 minutos de arco contínuo com 250 A, seu fator de trabalho é de 70% para essa corrente.

Durante a soldagem, a tensão do arco é a diferença de potencial entre a ponta do eletrodo e o metal de base. A tensão de circuito aberto ou tensão em vazio é a tensão presente nos terminais da máquina antes do estabelecimento do arco elétrico: o sistema está energizado, mas sem arco elétrico, sem soldagem em andamento.

Essa tensão costuma variar entre 50 e 100 volts, enquanto a tensão do arco oscila entre 17 e 40 volts. Tensão em vazio mais elevada facilita a abertura e manutenção do arco elétrico. Por razões de segurança, a tensão em vazio é geralmente limitada a 100 volts.

Quando o arco é estabelecido, ocorre uma queda abrupta da tensão em vazio para a tensão de arco. Caso o eletrodo toque a peça, essa tensão cai a zero, estabelecendo-se uma corrente de curto-circuito.

Tanto a tensão em vazio quanto a corrente de curto-circuito são características fundamentais da fonte de potência, influenciando diretamente seu projeto e o desempenho durante a soldagem.

A tensão de arco também é determinada por:

- comprimento do arco, e
- tipo de eletrodo revestido utilizado.

Arcos mais longos (maior comprimento do arco) resultam em maior tensão e menor corrente. A intensidade dessa variação de corrente, em função da variação da tensão, depende da inclinação da curva tensão-corrente, como ilustrado na Figura 4, dentro da faixa de operação da fonte.

Por fim, a faixa de corrente de saída indica os valores mínimos e máximos que a fonte pode fornecer. A seleção adequada dessa faixa depende:

- do tipo e diâmetro do eletrodo, e
- da posição de soldagem.

Normalmente, a faixa varia entre 30 e 500 A, conforme a aplicação.

## 4. VARIÁVEIS DO PROCESSO

### 4.1 Corrente de Soldagem

No processo SMAW, pode-se utilizar tanto corrente contínua (CC) quanto corrente alternada (CA). A escolha do tipo de corrente depende, entre outros fatores, do tipo de eletrodo revestido. Ainda que existam eletrodos compatíveis com ambos os tipos de corrente, geralmente apresentam melhor desempenho com CC, devido à maior estabilidade do arco elétrico e à transferência metálica mais suave.

Por outro lado, a utilização de CA no processo SMAW apresenta duas vantagens importantes:

- Ausência de sopro magnético
- Equipamentos mais simples e de menor custo

Durante a soldagem com CA, há uma tendência maior à instabilidade do arco, devido à mudança periódica de polaridade e à queda momentânea da corrente a valores próximos de zero. A abertura e a manutenção do arco elétrico tornam-se mais difíceis, especialmente quando se utilizam eletrodos de pequeno diâmetro, que requerem baixas correntes.

Em compensação, com CA:

- A tendência ao sopro magnético é reduzida, pois o campo magnético se inverte constantemente.
- As quedas de tensão nos cabos também são menores, o que se torna vantajoso ao trabalhar com altas correntes ou em locais afastados da fonte de soldagem.

Na soldagem de aços ferríticos com CC, a presença de campo magnético desequilibrado ao redor do arco elétrico pode provocar sopro magnético significativo, dificultando o controle do arco e da poça de fusão.

Quando a soldagem é feita a longas distâncias da fonte, a corrente alternada se torna mais indicada, pois apresenta menores perdas resistivas nos cabos. No entanto, é importante evitar cabos enrolados, pois podem ocorrer perdas indutivas substanciais.

Para eletrodos revestidos de pequeno diâmetro, operando com baixas correntes, a corrente contínua proporciona melhores características operacionais e arco elétrico mais estável. Isso se aplica, também, à soldagem com pequeno comprimento de arco (baixa tensão), que é mais

facilmente mantido com CC do que com CA.

Nas posições de soldagem vertical e sobre cabeça, CC é frequentemente preferida, pois oferece maior controle do arco e permite o uso de correntes mais baixas, o que favorece o controle da poça de fusão nessas posições.

No entanto, com a seleção adequada do eletrodo revestido, é perfeitamente possível realizar soldas de qualidade em todas as posições utilizando também CA, desde que sejam observadas as recomendações do fabricante e os parâmetros operacionais estejam ajustados às características do consumível.

A corrente contínua apresenta excelente desempenho na soldagem de chapas finas e espessas, especialmente por oferecer maior estabilidade do arco em baixos níveis de corrente. A utilização de corrente alternada na soldagem de chapas finas requer atenção especial, pois o arco pode se tornar menos estável em correntes muito baixas, devido à sua natureza oscilatória.

Ainda assim, com o uso de eletrodos apropriados e parâmetros bem ajustados, a soldagem com CA pode ser realizada com eficiência e qualidade, inclusive em espessuras mais delicadas.

A definição do valor de corrente a ser utilizado durante a soldagem depende, fundamentalmente, do tipo e do diâmetro do eletrodo revestido. De modo geral, os catálogos dos fabricantes de eletrodos indicam:

- A faixa de corrente adequada para cada diâmetro
- O tipo de corrente (CA ou CC)
- A polaridade recomendada
- E a posição de soldagem mais indicada para o eletrodo especificado

## 4.2 Polaridade

Quando o porta-eletrodo está conectado ao polo positivo da fonte de soldagem, tem-se a polaridade reversa ou polaridade positiva, sendo tecnicamente designada como:

- DCEP (*Direct Current Electrode Positive*) ou
- CCEP (*Corrente Contínua Eletrodo Positivo*)

Quando o porta-eletrodo está conectado ao polo negativo da fonte, tem-se a polaridade direta ou polaridade negativa, também conhecida por:

- DCEN (*Direct Current Electrode Negative*) ou
- CCEN (*Corrente Contínua Eletrodo Negativo*)

Essa distinção é ilustrada na Figura 5, que apresenta esquematicamente as duas formas de conexão.

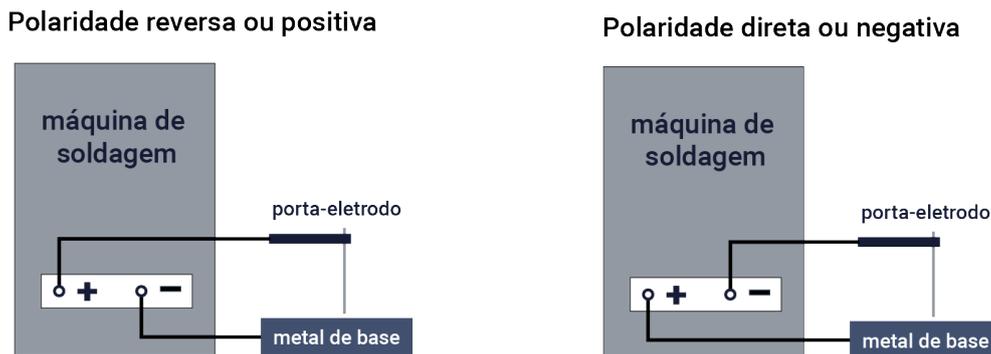


Figura 5 – Polaridade.

A maioria dos eletrodos revestidos apresenta melhor desempenho quando utilizada com polaridade positiva (DCEP). No entanto, existem eletrodos que operam de forma mais eficiente com polaridade negativa (DCEN), dependendo do tipo de revestimento e de suas características específicas.

É comum encontrar, na literatura técnica, a afirmação de que a soldagem com polaridade reversa (DCEP) proporciona maior penetração, enquanto a polaridade direta (DCEN) resulta em maior taxa de fusão do eletrodo. Contudo, essa generalização não se aplica a todos os eletrodos, e certos cuidados devem ser tomados ao interpretar tais afirmações.

Como será apresentado mais adiante, a taxa de fusão de eletrodos E6013 é maior com polaridade direta (DCEN). Para os eletrodos E7018, a taxa de fusão é superior com polaridade reversa (DCEP).

Essas diferenças ocorrem em função da composição do revestimento de cada eletrodo, que influencia diretamente o comportamento térmico e a dinâmica da fusão durante o processo de soldagem.

### 4.3 Comprimento do Arco

O comprimento do arco elétrico corresponde à distância entre a ponta do eletrodo e a superfície do metal de base, conforme ilustrado na Figura 6. Esse comprimento deve ser definido em função de diversos fatores, sendo os principais:

- O diâmetro do eletrodo (alma metálica).
- O tipo de revestimento utilizado.
- A intensidade de corrente aplicada.
- E a posição de soldagem.

No processo SMAW, o controle do comprimento do arco é realizado manualmente pelo soldador, sendo, portanto, altamente dependente de sua habilidade técnica.

De modo geral, recomenda-se que o comprimento do arco não ultrapasse o diâmetro do eletrodo, a fim de garantir estabilidade no arco, boa fusão e proteção adequada da poça de solda.

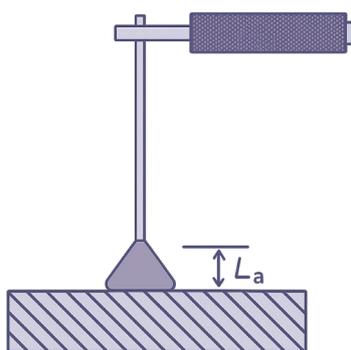


Figura 6 – Comprimento do arco.

#### 4.4 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é definida como a taxa de avanço do eletrodo ao longo da junta a ser soldada. Uma velocidade adequada é aquela que resulta em um cordão de solda com boa aparência, penetração apropriada e características metalúrgicas satisfatórias.

No processo SMAW, a velocidade de soldagem é influenciada por diversos fatores, entre os quais se destacam:

- Tipo de corrente, amperagem e polaridade
- Posição de soldagem
- Taxa de fusão do eletrodo
- Espessura do material de base
- Condições superficiais do metal de base
- Tipo de junta
- Manipulação do eletrodo pelo soldador

Durante a operação, a velocidade de soldagem deve permitir que a poça de fusão seja conduzida suavemente, de forma a garantir a formação adequada do cordão.

Até certo ponto, o aumento da velocidade tende a reduzir a largura do cordão e aumentar a penetração. No entanto, velocidades excessivas podem provocar efeitos indesejáveis, como:

- Cordão estreito, irregular, com índices de falta de penetração e aspecto incompleto.
- Comprometimento da aparência e da integridade do cordão de solda.
- Surgimento de trincas nos contornos do cordão.
- Dificuldade na remoção da escória.
- Porosidade.

Por outro lado, quando a velocidade de soldagem é muito baixa, o cordão tende a se tornar:

- Mais largo e convexo.
- Maior reforço e menor penetração.

Essa baixa penetração ocorre porque o arco elétrico permanece mais tempo atuando sobre a poça de fusão, ao invés de promover seu deslocamento (velocidade de avanço). Consequentemente, há um maior aporte térmico (mais calor por unidade de comprimento), o que leva ao:

- Aumento da zona termicamente afetada (ZTA).
- Redução da taxa de resfriamento do metal.
- E possíveis impactos na microestrutura e nas propriedades mecânicas da solda.

#### 4.5 Diâmetro do Eletrodo

O diâmetro do eletrodo se refere ao diâmetro da arte não revestido do eletrodo: a alma metálica, o arame. A partir desse diâmetro, são definidos os parâmetros de corrente elétrica e velocidade de soldagem adequados para o processo.

A seleção do diâmetro do eletrodo deve considerar, principalmente:

- A espessura do material de base.
- A posição de soldagem.
- E o tipo de junta a ser preenchida.

De forma geral, eletrodos de maiores diâmetros são mais indicados para aplicações em posição plana e para soldagem de materiais espessos, pois permitem maior taxa de deposição.

Nas posições horizontal, vertical e sobre cabeça, a poça fundida tende a escorrer por efeito da gravidade, o que dificulta o controle da soldagem. Para reduzir essa tendência, recomenda-se o uso de eletrodos de diâmetro menor, o que limita o volume da poça e facilita sua condução.

A manipulação adequada do eletrodo e o aumento controlado da velocidade de soldagem ao longo da junta são estratégias importantes para manter o controle da poça de fusão e garantir a qualidade do cordão de solda nessas posições.

#### 4.6 Orientação do Eletrodo

A orientação do eletrodo em relação à junta a ser soldada exerce influência direta na qualidade da solda. Uma orientação inadequada pode resultar em defeitos como aprisionamento de escória, porosidade e trincas, comprometendo a integridade do cordão.

A definição da orientação correta depende de diversos fatores, como:

- Tipo e diâmetro do eletrodo.
- Posição de soldagem.
- E a geometria da junta.

A orientação é determinada por dois elementos principais:

1. Ângulo do eletrodo
2. Sentido de soldagem

O ângulo do eletrodo (ou ângulo de soldagem), depende de duas posições:

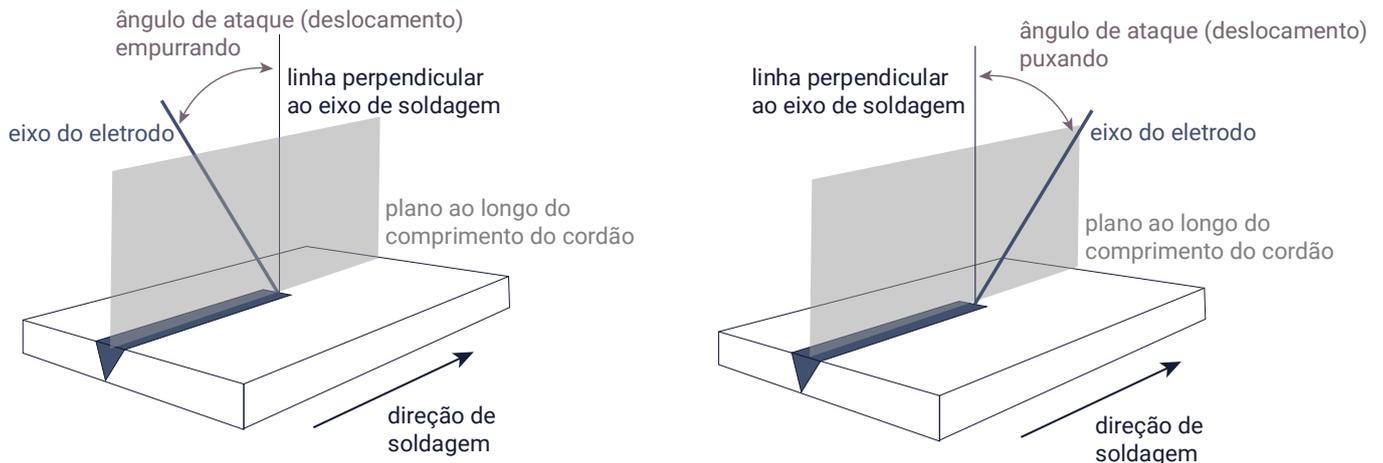
- do ângulo de deslocamento (ataque), e
- do ângulo de trabalho.

O ângulo de deslocamento é o ângulo na direção de soldagem formado entre o eixo do eletrodo e

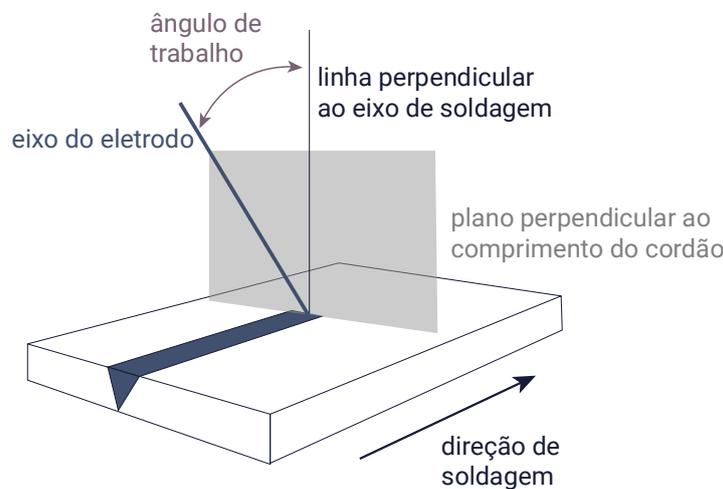
uma linha perpendicular ao eixo de soldagem e no plano ao longo do comprimento do cordão de solda (Figura 7).

- O eletrodo empurra a poça de fusão, ou
- O eletrodo puxa a poça de fusão.

O ângulo de trabalho é o ângulo formado entre o eixo do eletrodo e uma linha perpendicular ao eixo de soldagem e no plano perpendicular ao comprimento do cordão de solda (Figura 8).



**Figura 7** – Ângulo de ataque do eletrodo: empurrando ou puxando a poça de fusão.



**Figura 8** – Ângulo de trabalho.

A escolha do ângulo mais adequado deve considerar o equilíbrio entre penetração, cobertura da escória, controle da poça de fusão e estabilidade do arco, variando de acordo com a posição e o tipo de junta.

#### 4.7 Posição de soldagem

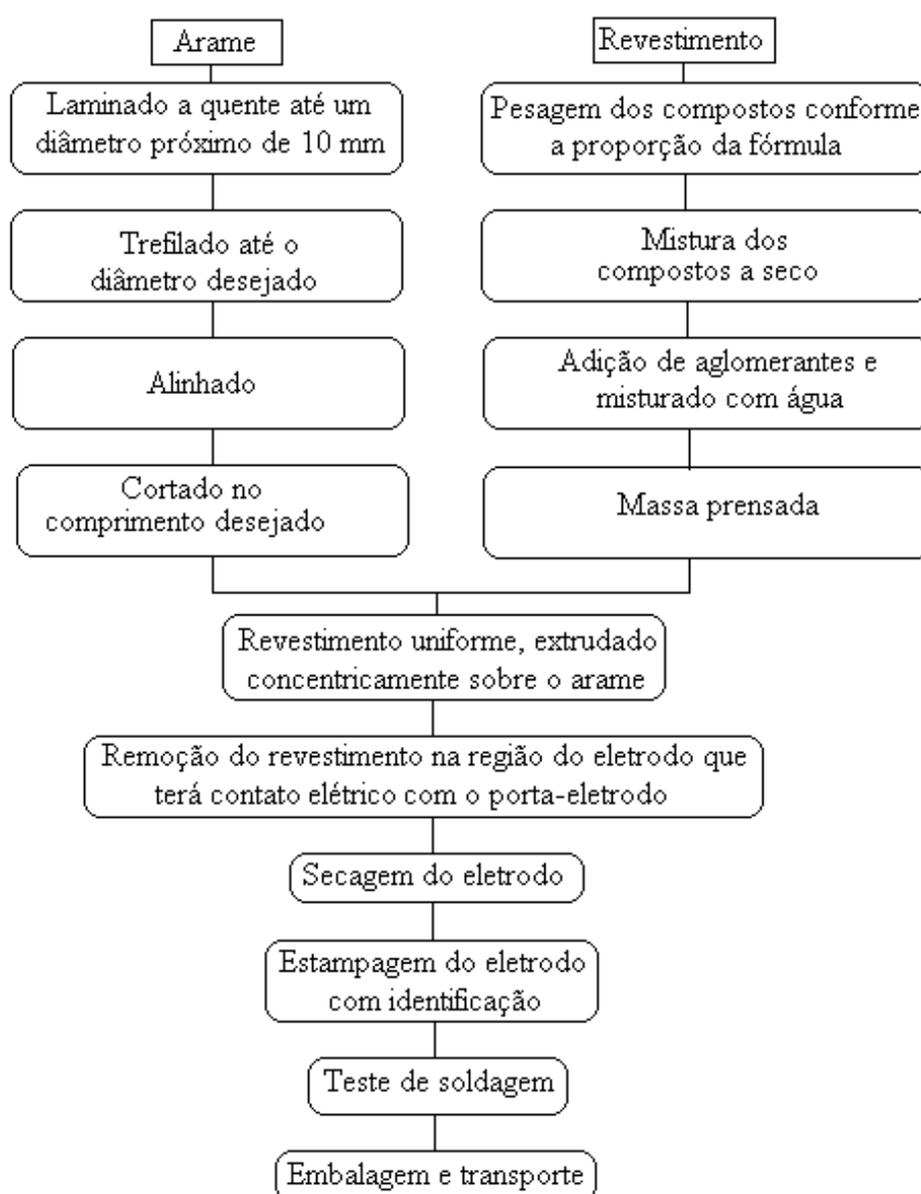
Sempre que possível, a soldagem deve ser realizada na posição plana, pois esta oferece melhor controle da poça de fusão, maior facilidade operacional e maior taxa de deposição. Nas posições fora da plana (horizontal, vertical e sobre cabeça), é recomendado o uso de eletrodos de menor diâmetro, a fim de reduzir o volume da poça fundida e facilitar seu controle.

Destaca-se que, com o processo SMAW, é perfeitamente possível realizar soldas em todas as posições, desde que as variáveis do processo (corrente, polaridade, comprimento do arco, velocidade de soldagem etc.) e o tipo de eletrodo revestido sejam escolhidos de forma adequada, de acordo com as exigências da aplicação e as recomendações dos fabricantes.

## 5. ELETRODO REVESTIDO

### 5.1 Fabricação

A fabricação dos eletrodos revestidos não é simples, devido à grande diversidade dos tipos e das aplicações em soldagem, cada um exigindo considerações especiais. A Figura 9 apresenta um fluxograma que exemplifica as etapas de produção dos eletrodos revestidos.



**Figura 9** – Fluxograma das etapas de fabricação dos eletrodos revestidos.

Um fato importante a ser considerado na fabricação de eletrodos revestidos é a relação entre as áreas transversais do arame e do revestimento, definida como "relação volumétrica do

revestimento ( $RV$ )", sendo determinada por:

$$RV = \frac{(D^2 - d^2)}{d^2} * 100 \text{ (\%)} \quad (1)$$

onde:  $D$  – diâmetro do revestimento (mm);

$d$  – diâmetro do arame (mm);

O revestimento volumétrico exerce forte influência sobre a eficiência de deposição e a taxa de fusão do eletrodo revestido. Valores de  $RV$  elevados, especialmente em eletrodos com alta proporção de pó de ferro no revestimento, podem atingir índices da ordem de 5, possibilitando a deposição de 7 a 9 kg/h de metal de solda, o que representa uma taxa significativamente superior aos eletrodos com menor espessura de revestimento.

O aumento da espessura do revestimento, e conseqüentemente do  $RV$ , pode contribuir para a:

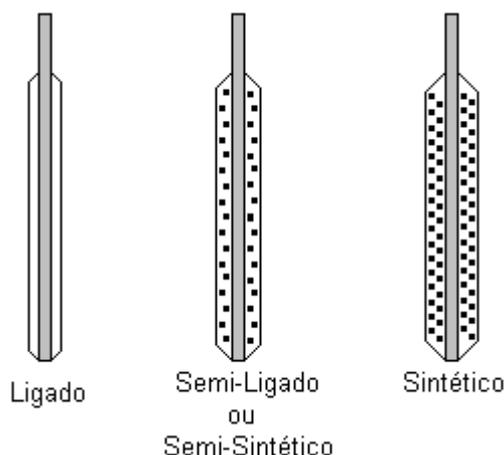
- Melhoria na qualidade do metal depositado.
- Redução do teor de nitrogênio dissolvido, resultando em soldas mais limpas e com melhor desempenho mecânico.

Tanto o valor de  $RV$  quanto a concentricidade do revestimento (uniformidade da extrusão ao redor da alma metálica) têm papel crucial na:

- Estabilidade do arco elétrico, e
- No modo de transferência metálica durante o processo de soldagem com eletrodo revestido.

## 5.2 Características do Arame

Alguns fabricantes de eletrodos podem produzir os arames que compõem o eletrodo revestido de diferentes formas. A Figura 10 exemplifica tais casos.



**Figura 10** – Tipos de arames fabricados para o eletrodo revestido.

No tipo ligado, o arame possui, por si só, as características mecânicas e químicas necessárias ao metal depositado. O revestimento é o mais fino entre os três tipos, pois sua função principal está associada à estabilização do arco, proteção gasosa e formação de escória.

Esse eletrodo gera uma poça de fusão menor, proporciona maior controle sobre o arco e sobre a poça e é adequado para soldagem em todas as posições.

No tipo semi-ligado (ou semi-sintético), o arame fornece parte das características químicas e mecânicas exigidas à solda, e o restante é complementado pelo revestimento. Este é um pouco mais espesso que o do eletrodo do tipo ligado.

Tanto os eletrodos do tipo ligado quanto os semi-ligados não são os mais comuns para soldagem de aço carbono.

No eletrodo sintético, o arame é de aço carbono comum, e todos os elementos de liga necessários para compor as propriedades do metal de solda estão inseridos no revestimento. É o tipo mais amplamente utilizado na fabricação de eletrodos revestidos, especialmente para aço carbono.

Embora os três tipos resultem na mesma composição química final do metal depositado, eles diferem quanto ao processo de fabricação e ao custo. O tipo sintético, por concentrar os elementos no revestimento, permite maior flexibilidade de formulação e viabilidade econômica, tornando-se o mais comum no mercado.

### 5.3 Características e Funções do Revestimento

Independentemente do tipo de arame utilizado, a camada de revestimento extrudada ao redor do arame deve atender aos requisitos fundamentais de qualidade e desempenho. Durante a preparação e a soldagem, o revestimento não pode se deteriorar nem se desprender sob a ação do calor. Também precisa apresentar resistência mecânica adequada para suportar impactos e vibrações durante o armazenamento e transporte.

Ao longo do processo de fabricação, são realizadas inspeções e ajustes contínuos para garantir que o revestimento seja uniforme e concêntrico. Sendo essa concentricidade um dos principais indicadores de qualidade do eletrodo.

O revestimento do eletrodo é composto por uma mistura de materiais, em sua maioria óxidos, combinados em proporções específicas. Importante destacar que um mesmo ingrediente pode exercer várias funções, e substâncias diferentes podem contribuir para a mesma função.

O revestimento exerce múltiplas funções essenciais no processo SMAW, incluindo:

- Fornecimento de elementos de liga, que contribuem para o refino da microestrutura, e o controle da composição química do metal de solda.
- Geração de gases e escória, que protegem o arco elétrico e a poça de fusão, envolvem e estabilizam as gotas de metal fundido durante a transferência e controlam a velocidade de resfriamento do metal depositado.
- Liberação de agentes que facilitam a remoção da escória, permitem a soldagem em várias posições, promovem a ionização do arco elétrico, estabilizam e direcionam o arco e contribuem para o controle da temperatura do eletrodo durante a soldagem, por meio da decomposição térmica dos ingredientes.

A concentração final de elementos químicos no metal de solda depende da quantidade original presente no sistema de soldagem. No processo SMAW, há seis fontes principais de elementos químicos:

1. Revestimento do eletrodo
2. Alma metálica (arame)
3. Metal de base
4. Arco elétrico
5. Superfície do metal de base
6. Superfície do eletrodo

As três primeiras fontes são as mais relevantes para a composição do metal depositado.

O arco elétrico não cria nem destrói elementos químicos, mas as condições operacionais, como o ângulo do eletrodo, influenciam a distribuição dos elementos entre o metal de solda, a escória e o ambiente (fumos, vapores).

As superfícies do metal de base e do eletrodo podem introduzir impurezas indesejadas, especialmente se não forem adequadamente limpas ou preparadas.

Entre todas as fontes, o revestimento é o principal responsável pela definição da composição química final do metal de solda. O seu controle rigoroso é fundamental na fabricação de eletrodos de alta qualidade.

Os elementos presentes no revestimento influenciam diretamente:

- nas propriedades mecânicas do metal de solda,
- na formação de fumos e gases,
- na estabilidade do arco elétrico, e
- nas propriedades da escória.

A Tabela 1 apresenta os principais constituintes do revestimento, suas fórmulas químicas, e suas funções primárias e secundárias no processo de soldagem.

Um elemento adicionado ao revestimento que merece destaque é o pó de ferro. Este tem como principal função aumentar a taxa de deposição de metal na solda. O aumento do teor de pó de ferro no revestimento afeta significativamente as características operacionais do consumível e as propriedades do metal de solda, produzindo os seguintes efeitos:

- Redução progressiva da tensão de arco elétrico, até um limite que inviabiliza a soldagem. Esse fenômeno ocorre quando o teor de pó de ferro atinge valores próximos a 60%.
- Aumento da fluidez da escória, em função da formação de óxidos de ferro durante o processo.
- Com teores acima de 20%, observa-se um aumento no tempo de consumo do eletrodo, devido ao maior volume de material a ser fundido.
- Aumento da eficiência de deposição, especialmente em posições mais favoráveis (como a plana), o que eleva o rendimento do processo.
- Melhora na estabilidade do arco elétrico, entretanto, há uma redução na penetração, principalmente quando se utilizam correntes elevadas. Essa combinação pode ser vantajosa, pois minimiza a ocorrência de mordeduras nas bordas do cordão.
- Redução da tenacidade do metal de solda, o que pode ser crítico em aplicações que exigem maior resistência ao impacto.

Tabela 1 – Principais elementos dos revestimentos.

Elementos	Fórmula	Funções
Alumina	$Al_2O_3$	Formar escória; estabilizar o arco
Argila	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Ajudar na extrusão; formar escória
Cal	$CaO$	Agente fluxante;
Calcita	$CaCO_3$	Controlar a viscosidade da escória
Fluorita	$CaF_2$	Controlar a basicidade da escória;
Celulose	$(C_6H_{10}O_5)_x$	Reduzir a viscosidade da escória
Ferro-Manganês	Fe-Mn	Gerar gases de proteção;
Ferro-Silício	Fe-Si	Ajudar na extrusão
Hematita	$Fe_2O_3$	Controlar a composição química;
Magnetita	$Fe_3O_4$	Promover a desoxidação
Silicato de Lítio	$Li_2SiO_3$	Promover a desoxidação;
Silicato de Potássio	$K_2SiO_3$	Controlar a composição química.
Titanato de Potássio	$2K_2O \cdot 2TiO_2$	Promover a oxidação; formar escória
Feldspar	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	Promover a oxidação; formar escória
Mica	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	Atuar como agente aglomerante
Dolomita	$MgO \cdot CaO \cdot 2(CO_2)$	Estabilizar o arco;
Silicato de Sódio	$Na_2SiO_3$	Atuar como agente aglomerante
Sílica	$SiO_2$	Estabilizar arco; formar escória
Rutila	$TiO_2$	Estabilizar o arco;
Pó de Ferro	-	Formar escória; agente fluxante
Zircônio	$ZrO_2$	Ajudar na extrusão; estabilizar o arco
		Gerar gases; agente fluxante
		Atuar como agente aglomerante;
		Estabilizar o arco
		Formar escória;
		Controlar a viscosidade
		Reduzir a viscosidade da escória;
		Estabilizar o arco
		Aumentar a taxa de deposição e o rendimento do eletrodo; estabilizar o arco
		Estabilizar o arco;
		Facilitar a destacabilidade da escória

É importante destacar que não se deve simplesmente adicionar pó de ferro a um revestimento tradicional. A introdução desse componente exige uma reformulação completa do projeto do consumível, para que suas propriedades operacionais e metalúrgicas sejam preservadas ou aprimoradas.

De modo geral, a adição controlada de pó de ferro é viável em revestimentos do tipo básico, em proporções entre 10% e 25%. E em revestimentos do tipo rutilico, com teores que podem atingir até

60% da massa total do revestimento.

São os tipos de elementos utilizados e as reações químicas que ocorrem durante a soldagem que definem a classificação dos eletrodos revestidos.

#### 5.4 Tipos de Revestimento

Os eletrodos revestidos podem ser classificados, de acordo com a composição química do revestimento, nos seguintes grupos:

- Ácidos
- Oxidantes
- Básicos
- Celulósicos
- Rutílicos

##### **Eletrodos Ácidos**

O revestimento dos eletrodos ácidos apresenta altos teores de óxidos de ferro e manganês, além de silicatos de alumínio e ferro-manganês. A tensão de trabalho desses eletrodos situa-se geralmente entre 20 e 40 V, variando com o diâmetro do eletrodo.

São eletrodos que permitem soldagem em todas as posições. Aqueles com altos teores de sílica e alumina podem ser operados com tensões mais elevadas, proporcionando maior penetração.

A escória gerada é ácida, produzida em grande quantidade, com aspecto poroso e de fácil remoção.

Apesar da boa aparência do cordão de solda, o metal depositado apresenta propriedades mecânicas e metalúrgicas inferiores, com alto teor de oxigênio. Entre todas as classificações, este é o tipo mais susceptível à ocorrência de trincas de solidificação. Por isso, os elementos carbono, enxofre e fósforo devem estar presentes em teores muito baixos, tanto no consumível quanto no metal de base.

##### **Eletrodos Oxidantes**

Os eletrodos oxidantes possuem revestimento composto principalmente por óxido de ferro (na forma de hematita ou magnetita), com ou sem a presença de óxido de manganês, além de silicatos.

A escória gerada é do tipo oxidante, normalmente abundante e de fácil destacabilidade.

O metal de solda produzido apresenta, em geral baixa penetração e baixas propriedades mecânicas, em especial a tenacidade.

Embora não sejam indicados para aplicações estruturais críticas ou de alto risco, esses eletrodos são amplamente utilizados na soldagem subaquática, devido à simplicidade de operação e à facilidade de remoção da escória em ambientes úmidos.

##### **Eletrodo Básicos**

Os eletrodos do tipo básico possuem revestimento com elevado teor de carbonato de cálcio

(CaCO<sub>3</sub>) e fluoreto de cálcio (CaF<sub>2</sub>), este último conhecido como fluorita.

Razões altas de  $\frac{\text{CaCO}_3}{\text{CaF}_2}$  no revestimento são utilizadas em eletrodos destinados à execução de passes de raiz em juntas muito abertas, onde é necessária uma proteção eficiente do metal fundido contra a atmosfera.

Por outro lado, razões baixas dificultam a operação com corrente alternada, em razão da menor estabilidade do arco.

O metal de solda depositado com eletrodos básicos pode apresentar as melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas entre todos os tipos de eletrodos revestidos, com destaque para a tenacidade.

As principais características do cordão obtido incluem:

- Baixo teor de hidrogênio difusível.
- Alta desoxidação.
- Nível de inclusões complexas, como sulfetos e fosfetos, muito baixo.
- Penetração média e perfil de cordão plano ou levemente convexo.

Esses eletrodos são especialmente recomendados para aplicações críticas, como:

- Soldagem de materiais espessos.
- Juntas com alto grau de restrição (travamento).
- Situações em que se exige alta confiabilidade estrutural.

Apesar dessas vantagens metalúrgicas, os eletrodos básicos possuem maior exigência técnica durante a soldagem, sendo menos operacionais que os tipos rúflicos ou celulósicos.

A alta qualidade do metal de solda obtida se deve, principalmente:

- aos efeitos do carbonato e da fluorita na remoção de enxofre e fósforo via escória, e
- à formação controlada de pequenas inclusões não metálicas, que auxiliam no refino da microestrutura.

A escória gerada apresenta-se fluida e de fácil remoção, embora em menor volume que em eletrodos de outros tipos. O revestimento básico é altamente higroscópico, exigindo cuidados rigorosos de armazenamento e manuseio. A ressecagem preventiva deve ser realizada a até 400 °C, sendo um método eficaz para a remoção da umidade absorvida.

Um exemplo clássico de eletrodo básico é o E7018, amplamente utilizado em aplicações estruturais que requerem alto desempenho mecânico e baixa difusão de hidrogênio.

### **Eletrodos Celulósicos**

Os eletrodos do tipo celulósico possuem revestimento com elevado teor de substâncias orgânicas inflamáveis, principalmente celulose, que durante a soldagem se decompõe termicamente, gerando um grande volume de gases. Os principais gases produzidos são:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrogênio (H<sub>2</sub>)
- Vapor d'água (H<sub>2</sub>O)

Esses gases formam uma atmosfera redutora intensa, que atua como proteção eficaz da poça de fusão contra a atmosfera ambiente. Essa é a principal função protetora do revestimento celulósico, dispensando a necessidade de escória espessa.

Os eletrodos celulósicos são caracterizados por:

- Alta penetração do arco.
- Formação mínima de escória, que é fina e de fácil remoção.
- Arco intenso e de grande poder de penetração.

Apesar dos eletrodos celulósicos serem, muitas vezes, indicados para a execução de passes de raiz e soldagem em campo, sua utilização deve ser feita com muita cautela. O nível de hidrogênio difusível no metal de solda produzido é muito elevado, o que os torna inadequados para estruturas que exigem elevada resistência mecânica e em materiais sensíveis à trinca por hidrogênio.

O hidrogênio presente na solda não é proveniente apenas da celulose, mas também da umidade absorvida tanto pela celulose quanto pelo silicato presente no revestimento.

A ressecagem desses eletrodos não deve ultrapassar 100 °C, sob risco de danificar as propriedades operacionais do consumível, especialmente no que se refere à estabilidade do arco e à capacidade de penetração. Além disso, a ressecagem não é efetiva na remoção completa da umidade absorvida, devido à estrutura do revestimento.

Um exemplo típico de eletrodo celulósico amplamente utilizado é o E6010.

### **Eletrodos Rutílicos**

Os eletrodos do tipo rutílico têm como principal componente do revestimento o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), que pode representar até 50% da composição. Algumas formulações também incorporam até 15% de celulose, o que contribui para uma operação mais versátil e arco mais reativo.

Esses eletrodos são amplamente utilizados devido à sua:

- Facilidade de abertura e reabertura do arco.
- Operação estável em todas as posições de soldagem.
- Formação de cordões com bom aspecto superficial.

São particularmente indicados para:

- Cordões curtos em aços de baixo teor de carbono.
- Soldagem em ângulo (filete).
- Chapas finas, onde a baixa penetração e o bom controle da poça são desejáveis.

Características operacionais:

- Baixa geração de respingos
- Velocidade de soldagem razoável
- Penetração média
- Escória de rápida solidificação e fácil remoção

Entretanto, os eletrodos rútilicos são:

- Sensíveis à presença de impurezas no metal de base.
- Propensos à formação de trincas quando utilizados em materiais com teor de carbono elevado.
- Não recomendados para soldagens estruturais críticas, especialmente aquelas que exigem alta tenacidade e resistência mecânica.

Quanto à sensibilidade à umidade, esses eletrodos são pouco higroscópicos, o que os torna mais tolerantes a variações de armazenamento, dispensando cuidados extremos com ressecagem.

Um exemplo clássico de eletrodo rútilico é o E6013, amplamente utilizado na indústria e em aplicações de manutenção devido à facilidade de uso e versatilidade.

### Índice de basicidade

Paralelamente à classificação tradicional dos eletrodos revestidos (ácido, básico, celulósico, rútilico, oxidante), é importante considerar o conceito de basicidade do revestimento, o qual está diretamente relacionado à natureza da escória formada durante a soldagem.

A basicidade do fluxo (revestimento) e, por consequência, da escória, é determinada pela proporção entre os compostos básicos e os compostos ácidos presentes na formulação do revestimento.

Essa relação é expressa pelo chamado índice de basicidade (B), definido como:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 0,5(\text{FeO} + \text{MnO}) + \text{CaF}_2}{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (2)$$

Para:  $B < 1,0$       ð fluxo é quimicamente ácido

$1 < B < 1,5$       ð fluxo é quimicamente neutro

$B > 1,5$       ð fluxo é quimicamente básico

Quando o índice de basicidade é elevado, a escória é classificada como básica e quando o valor é baixo, a escória é considerada ácida.

Essa característica influencia profundamente:

- A capacidade de refino do metal de solda.
- A remoção de impurezas (como enxofre e fósforo).
- A formação de inclusões não metálicas.
- A fluidez e destacabilidade da escória.

- A estabilidade do arco e a possibilidade de soldagem em diferentes posições.

O índice de basicidade também serve como ferramenta complementar na especificação e seleção de eletrodos, especialmente para aplicações que exigem altas propriedades mecânicas ou controle da composição do metal depositado.

Fluxos ácidos tendem a produzir metal de solda com teores mais altos de oxigênio, fósforo e enxofre, o que pode comprometer as propriedades mecânicas da junta, especialmente a tenacidade.

Os fluxos básicos possuem maior capacidade de refino, atuando na remoção ou redução desses elementos indesejáveis, promovendo uma solda com melhor desoxidação, menor nível de inclusões e maior limpeza metalúrgica.

Essa diferença está diretamente relacionada à composição do revestimento e à sua capacidade de reação com as impurezas durante o processo de soldagem.

### **Classificação dos Fluxos Quanto à Influência na Composição do Metal Depositado**

Além da classificação por basicidade, os fluxos também podem ser classificados segundo o grau de influência na composição química do metal de solda, dividindo-se em três grupos:

1. Fluxos Neutros
  - Não alteram significativamente a composição química do metal depositado.
  - São indicados quando se deseja preservar as propriedades do arame ou eletrodo utilizado.
2. Fluxos Ativos
  - Interagem com o metal fundido, promovendo a adição controlada de elementos de liga, como manganês (Mn) e silício (Si).
  - Contribuem para ajustar a composição da solda final, melhorando desoxidação e resistência.
3. Fluxos Ligados
  - Promovem a adição de diversos elementos de liga, além do Si e Mn, como: níquel (Ni), cromo (Cr), molibdênio (Mo), entre outros.
  - São empregados em aplicações especiais, onde o controle fino da composição química e das propriedades mecânicas é essencial.

### **5.5 Ressecagem**

Trincas induzidas por hidrogênio podem surgir quando há a combinação de três fatores críticos:

1. Juntas com elevados níveis de tensões residuais.
2. Microestruturas frágeis como a martensita.
3. Teores elevados de hidrogênio difusível, provenientes do revestimento do consumível.

Essas trincas, também conhecidas como trincas a frio, podem se formar no metal de solda, mas são mais frequentemente observadas na zona termicamente afetada (ZTA).

Uma medida fundamental para evitar as trincas induzidas pelo hidrogênio é justamente minimizando o nível de hidrogênio introduzido pela umidade presente no revestimento do eletrodo.

Há outras fontes de hidrogênio, a citar:

- A decomposição térmica de compostos orgânicos presentes em certos revestimentos, como os dos eletrodos celulósicos.
- A presença de umidade adsorvida, principalmente em eletrodos com revestimento higroscópico, como os do tipo básico (ex.: E7018).

Uma estratégia eficaz para minimizar o problema do trincamento é a substituição do consumível por um eletrodo de baixo hidrogênio difusível. No entanto, estes eletrodos exigem ressecagem adequada antes do uso, justamente por sua tendência natural à absorção de umidade da atmosfera.

Sempre que possível, deve-se seguir rigorosamente as recomendações de tempo e temperatura de ressecagem fornecidas pelo fabricante do consumível. E essa precaução é essencial porque:

- Eletrodos da mesma classe de especificação (ex.: E7018), quando fabricados por diferentes produtores, podem conter:
  - Proporções distintas de componentes químicos;
  - Ou até revestimentos com formulações diferentes, resultando em taxas variáveis de absorção de umidade.

Uma abordagem padronizada de ressecagem pode não ser suficiente, sendo fundamental o respeito às instruções específicas de cada fabricante para garantir a qualidade da solda e evitar falhas relacionadas ao hidrogênio.

Caso se desconheça a informação do fabricante do consumível, a Tabela 2 apresentam sugestões para ressecagem dos principais eletrodos revestidos utilizados para aço carbono.

**Tabela 2** – Sugestões para temperatura e tempo de ressecagem de eletrodos de aço carbono.

Tipo eletrodo	Temperatura de ressecamento	Tempo de ressecamento	Observações
Básico (Ex: E7018)	300–400	60–120	Altamente higroscópico. Armazenar em estufa seca após ressecagem.
Rutílico (Ex: E6013)	100–150 (quando necessário)	30–60	Pouco higroscópico. Ressecagem não é sempre necessária.
Celulósico (Ex: E6010)	Máx. 100	30 (ou conforme especificado)	Muito sensível ao calor. Ressecagem excessiva pode prejudicar o revestimento. 60–120

## 5.6 Transferência Metálica

Na soldagem com eletrodo revestido, a transferência de metal fundido ocorre por meio de gotas que se destacam da ponta do eletrodo e se dirigem à poça de fusão. Junto a essas gotas, também ocorre a transferência de escória. Ambas interagem com o arco elétrico, o que pode influenciar diretamente na estabilidade do arco e na qualidade da solda.

Os principais modos de transferência metálica podem ser classificados em:

1. Globular – Gotas grandes e esporádicas.
2. Curto-Circuito – Contato direto com a poça (raro em SMAW).
3. Spray – Gotas pequenas e em alta frequência, favorecendo transferência contínua.

O modo de transferência metálica dos eletrodos revestidos é essencialmente uma função da composição do revestimento, visto que esta determina quais os parâmetros de soldagem a serem utilizados.

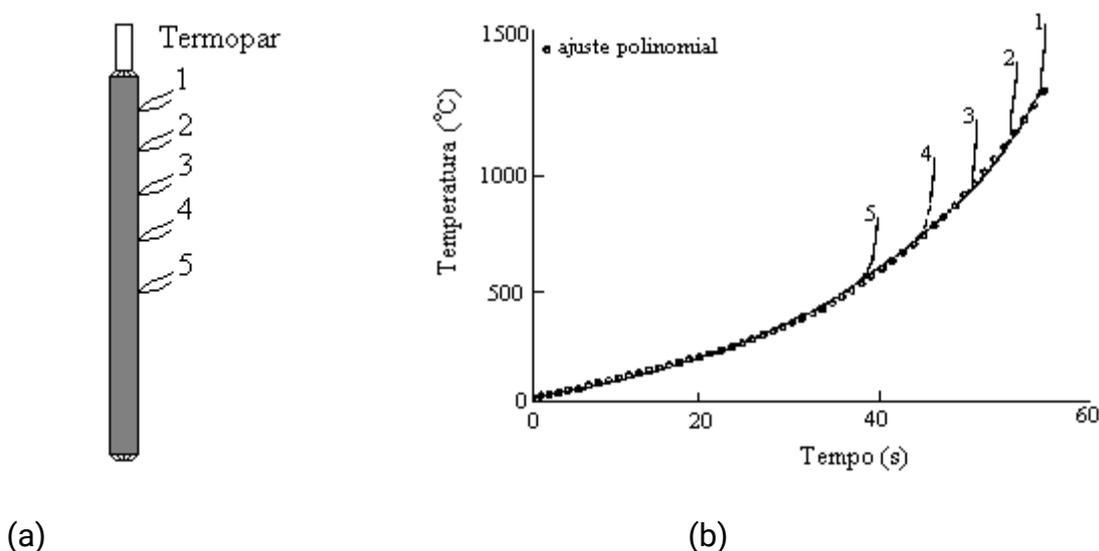
Os eletrodos ácidos e oxidante favorecem o modo spray, com arco mais estável.

Os eletrodos rutilico, também ficam próximo do spray, mas com maior quantidade de escória e menor penetração.

Os eletrodos básicos têm predominância de gotas grandes e transferência menos contínua, mas com alta penetração e propriedades mecânicas superiores.

## 6 AQUECIMENTO DO ELETRODO DURANTE A SOLDAGEM

Experimentalmente, foi comprovado que para um ponto afastado da frente de fusão (arco elétrico), que a temperatura no arame, durante a soldagem, pode variar da temperatura ambiente para mais de 1000°C. Monitorando a temperatura em diversos pontos ao longo do comprimento do eletrodo revestido, conforme indicado, esquematicamente, pela Figura 11(a) e observar que a temperatura do ponto 1, durante a soldagem, se sobrepõe à temperatura dos demais pontos de monitoração, Figura 11(b).



**Figura 11** – Temperatura ao longo do comprimento do eletrodo.

A temperatura do eletrodo revestido aumenta durante a soldagem devido ao calor transferido do arco elétrico, pela interface líquido/sólido na ponta do eletrodo, e ao calor gerado por efeito Joule, devido à resistência do arame à passagem de corrente elétrica. O calor gerado no arco elétrico,  $q_o$ , é definido por:

$$q_o = \eta \frac{IV}{A} \quad (3)$$

Onde:  $\eta$  é o rendimento do processo (%)

$I$  é a corrente de soldagem (A)

$V$  é a tensão do arco elétrico (V)

$A$  é a área transversal do arame ( $m^2$ ).

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

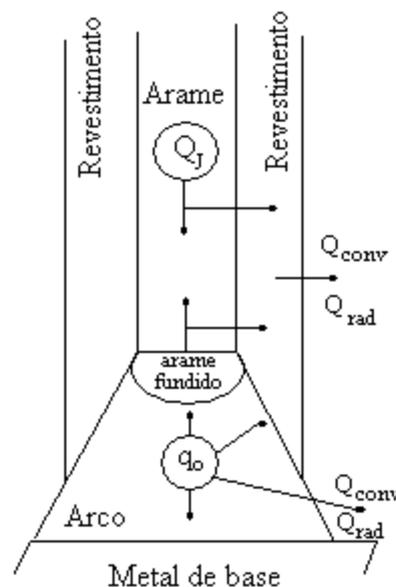
$$Q_J = RI^2 = \frac{\rho_e L}{A} I^2 \quad (4)$$

Onde:  $R$  é a resistência elétrica (W)

$r_e$  é a resistividade elétrica do arame (Wm)

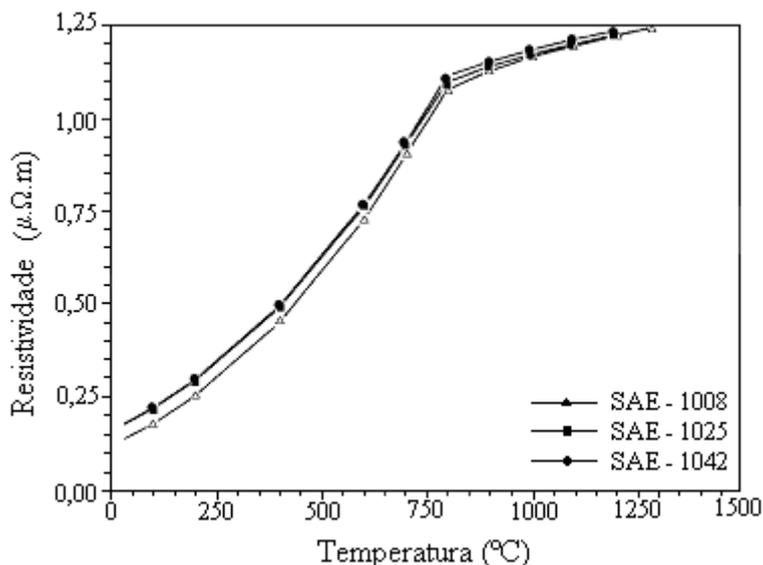
$L$  é o comprimento do eletrodo (m).

A Figura 12 apresenta esquematicamente as energias térmicas transferidas e geradas no eletrodo revestido durante a soldagem.



**Figura 12** – Energias térmicas transferidas e geradas no eletrodo durante a soldagem.

Baseado na Equação (4), pelo fato do comprimento do eletrodo revestido diminuir durante a soldagem, era de se esperar que o calor gerado por efeito Joule também diminuísse. Entretanto, o aumento da temperatura do arame conduz a um aumento de resistividade,  $r_e$ , fazendo com que o aquecimento por efeito Joule continue sendo significativo, mesmo com a diminuição do comprimento do eletrodo. A Figura 13 apresenta a variação da resistividade em função da temperatura para alguns aços de baixo carbono.



**Figura 13** – Resistividade de aço de baixo carbono.

O calor gerado por efeito Joule é o único responsável pelo aumento da temperatura do eletrodo em regiões afastadas da frente de fusão (afastada do arco elétrico). Enquanto o calor transferido do arco elétrico aumenta a temperatura do eletrodo apenas na região próxima à frente de fusão.

No revestimento, o calor gerado por efeito Joule pode ser negligenciado, visto que não há fluxo de corrente passando por ele. O revestimento é aquecido pelo fluxo de calor condutivo do arame.

Uma das principais consequências do aumento da temperatura do eletrodo revestido durante a soldagem é a variação de sua taxa de fusão e consequente variação da sua velocidade de mergulho.

De uma forma simplificada, a taxa de fusão (TF) de um eletrodo pode ser definida pela relação entre a massa consumida do eletrodo ( $m$ ) e o tempo de soldagem ( $t$ ), sendo expressa por:

$$TF = \frac{m}{t} = \frac{(m_i - m_f)}{t} \quad (\text{kg/s}) \quad (5)$$

Onde:  $m_i$  é massa inicial do eletrodo

$m_f$  é a massa final do eletrodo após a soldagem.

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

$$TC = \frac{L_c}{t} = \frac{(L_o - L_r)}{t} \quad (\text{m/s}) \quad (6)$$

Onde:  $L_o$  é o comprimento inicial do eletrodo

$L_r$  é o comprimento restante do eletrodo após soldado.

A taxa de fusão, juntamente com a eficiência de deposição ( $h_d$ ), determinam as características

econômicas dos eletrodos revestidos. A eficiência de deposição ou rendimento de deposição real é a relação entre a taxa de deposição (TD) e a taxa de fusão (TF), expressa por:

$$\eta_d = \frac{TD}{TF} * 100 \quad (\%) \quad (7)$$

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

$$TD = \frac{M_s}{t} = \frac{(M_i - M_f)}{t} \quad (\text{Kg/s}) \quad (8)$$

Onde:  $M_i$  é a massa inicial da chapa

$M_f$  é a massa da chapa após a soldagem.

É importante ressaltar que a taxa de fusão do eletrodo varia com o tempo, porque a temperatura do eletrodo varia e qualquer parâmetro que causa uma variação na temperatura do eletrodo causa, conseqüentemente, uma variação na sua taxa de fusão. Podendo dizer que, em geral, mantendo os demais parâmetros do processo constantes:

- Quanto maior a corrente, maior a temperatura alcançada pelo eletrodo revestido e maior sua taxa de fusão;
- Quando maior o diâmetro da alma do eletrodo, menor a temperatura alcançada pelo mesmo e menor sua taxa de fusão;
- Quanto maior a espessura do revestimento, menor a temperatura alcançada pelo eletrodo e menor sua taxa de fusão.

O revestimento do eletrodo pode ser considerado um isolante elétrico, visto que não há fluxo de corrente passando por ele. Porém, não se trata de um isolante térmico, apesar da condutividade térmica do revestimento ser em geral na ordem de 1,0 W/m°C.

Isto se deve ao fato que mesmo materiais com baixa condutividade térmica, somente atuam como isolantes térmicos se a espessura do revestimento for superior ao valor do raio crítico de isolamento. Este raio pode ser calculado dividindo o valor da condutividade térmica do material pelo coeficiente convectivo de transferência de calor do meio.

Por exemplo: o coeficiente convectivo de transferência de calor do ar pode variar de 22 a 60 W/m<sup>2</sup>°C; considerando o valor mínimo e o valor para a condutividade térmica do revestimento de 1,0 W/m°C; para este revestimento se comportar como um isolante térmico é necessário que sua espessura seja superior a 45 mm.

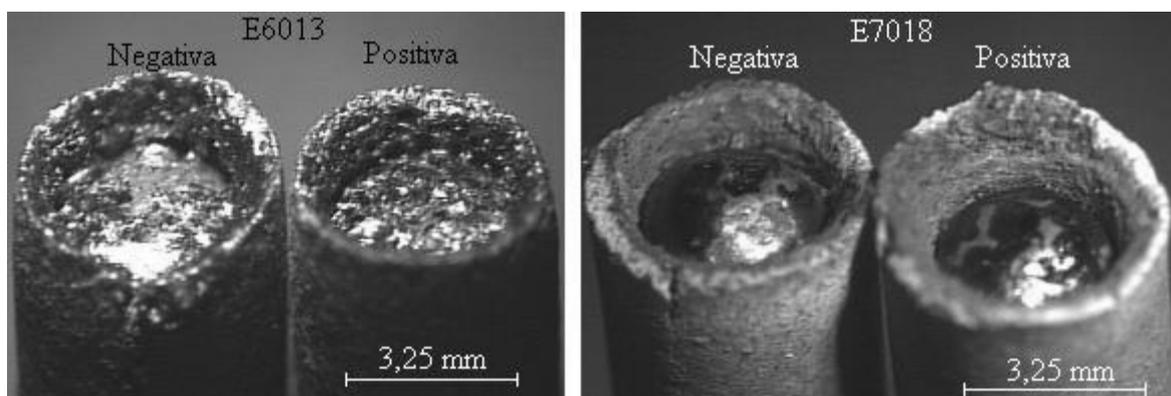
A espessura do revestimento de eletrodos, na sua grande maioria, é inferior a 5 mm. Portanto, quanto maior a espessura do revestimento dos eletrodos revestidos, maior o calor conduzido e perdido por ele para o ambiente, e conseqüentemente, menor a temperatura alcançada pelo eletrodo e menor sua taxa de fusão.

A influência da composição química do revestimento na temperatura do eletrodo é complexa, pois depende das características de cada composto. Por exemplo, fluxos endotérmicos diminuem a temperatura do eletrodo, enquanto fluxos exotérmicos aumentam.

A polaridade, por sua vez, não influencia a temperatura do eletrodo revestido em regiões afastadas da frente de fusão. A influência da polaridade é considerável apenas em regiões próximas à frente de fusão. A influência da polaridade na taxa de fusão dos eletrodos revestidos depende da composição química do revestimento.

As reações que ocorrem no catodo (polo negativo) são mais complexas que aquelas que ocorrem no anodo (polo positivo). O catodo é muito mais sensível a qualquer material que afeta a emissão de elétrons. Normalmente, a queda catódica é maior que a anódica, resultando em altas taxas de fusão, mas em alguns casos envolvendo materiais termiônicos. A taxa de fusão com polaridade negativa pode ser menor que a encontrada com polaridade positiva.

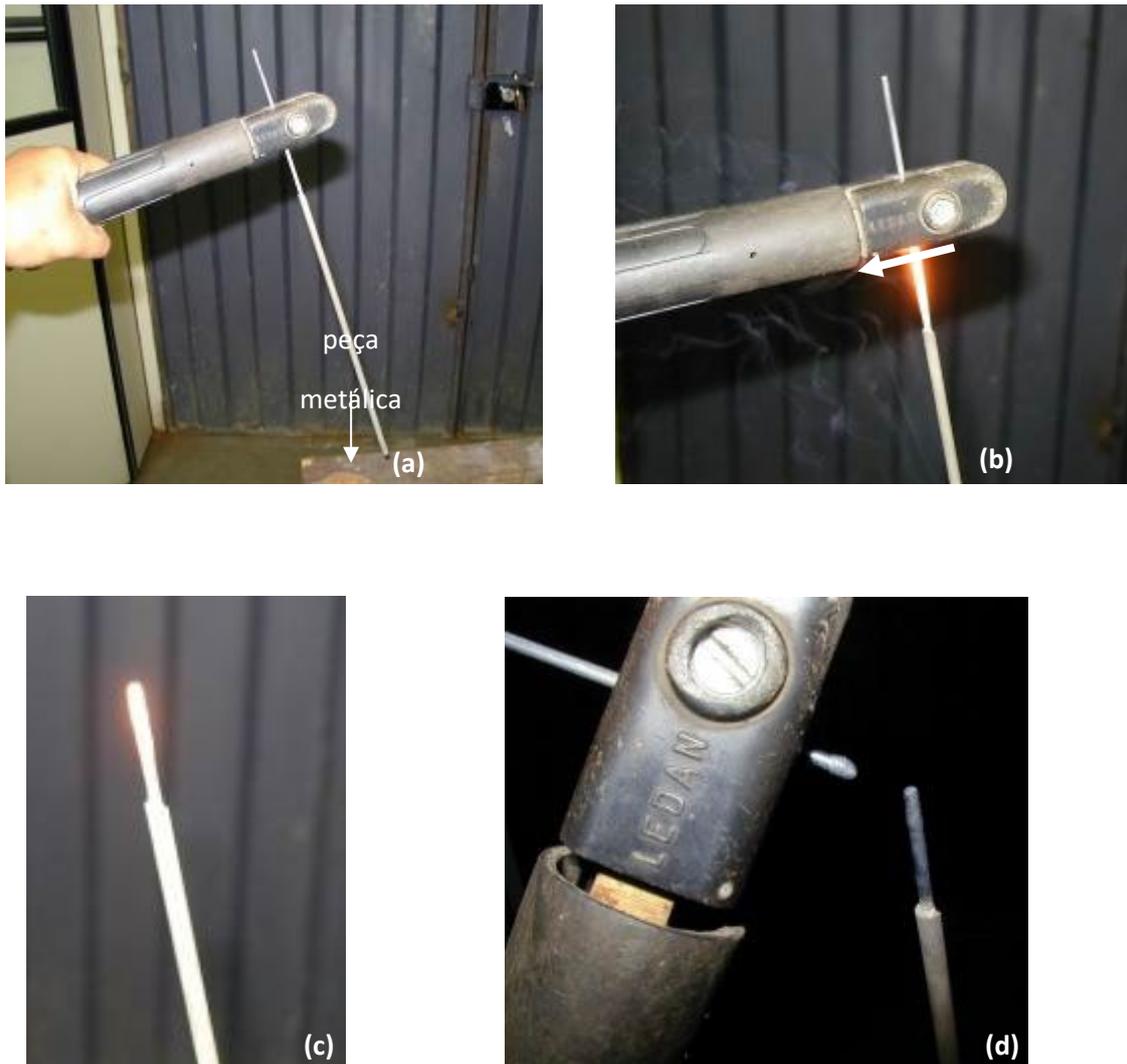
A temperatura alcançada pelo arame é maior que a temperatura do revestimento, resultando em uma fusão mais lenta do revestimento que do arame. Este fato ocasiona a formação de um cone na ponta do eletrodo durante a soldagem (Figura 14). Em geral, quanto maior a taxa de fusão do eletrodo mais profundo é o cone formado. Sendo importante destacar que as temperaturas de fusão do arame e do revestimento são importantes para a definir a altura deste cone.



**Figura 14** – Cones formados na ponta do eletrodo durante a soldagem.

Durante a soldagem com eletrodo revestido, o aquecimento da região não revestida do arame é maior que o aquecimento da região revestida. A região não revestida não funde antes da região revestida devido a influência do porta-eletrodo, que retira uma quantidade considerável de calor dessa região.

Retirando parte do revestimento do eletrodo ao longo de seu comprimento, posicionando o porta-eletrodo nesta região e aquecendo o eletrodo por efeito Joule é possível verificar que a região a fundir é a região do arame posicionada após o porta eletrodo. A Figura 15 apresenta uma sequência de fotografias demonstrando esse fato descrito. Para o procedimento apresentado nesta figura, um eletrodo revestido comercial E7018 de 3,25 mm de diâmetro teve o comprimento da região não revestida alterada de 20 para 100 mm e o porta-eletrodo foi posicionado no ponto médio deste comprimento.



**Figura 15** – Aquecimento da região não revestida do eletrodo até seu rompimento.

O processo de aquecimento do eletrodo revestido nesse experimento foi exclusivamente por efeito Joule. O aquecimento iniciou no momento que o eletrodo encostou na peça metálica e assim permaneceu, criando um curto-circuito entre o eletrodo e a peça metálica, Figura 15(a). Com aproximadamente 10 segundos, a região imediatamente após o porta-eletrodo entrou no processo de incandescência, enquanto a região antes do porta-eletrodo não, Figura 15(b). Com menos de 15 segundos, ocorreu o rompimento da região não revestida do eletrodo por fusão, Figura 15(c) e (d).

É de fundamental importância conhecer o comportamento térmico do eletrodo revestido durante a soldagem, visto as consequências desse aquecimento. Os efeitos do aquecimento do eletrodo revestido são vários e completamente diferentes no arame e no revestimento. O aquecimento no arame altera as propriedades físicas e elétricas do aço, mas não altera sua composição química, enquanto o revestimento tende a perder umidade quando calor é aplicado. À medida que a temperatura do eletrodo aumenta, o teor de componentes orgânicos no revestimento, responsáveis pela proteção do metal fundido, diminui e, conseqüentemente, as características do metal depositado são piores no final do cordão de solda.

## 7 TIPOS DE ELETRODOS REVESTIDOS

Os principais consumíveis existentes para o processo SMAW são:

- Eletrodos revestidos para aço carbono – A5.1;
- Eletrodos revestidos para aço de baixa liga – A5.5;
- Eletrodos revestidos para aço inoxidável – A5.4;
- Eletrodos revestidos para níquel e suas ligas – A5.11;
- Eletrodos revestidos para cobre e suas ligas – A5.6;
- Eletrodos revestidos para ferro fundido – A5.15;
- Eletrodos revestidos para revestimentos protetores.

Em geral, um consumível é adequadamente escolhido, quando as propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda depositado são pelo mesmo compatíveis com as do material de base. Devem-se também levar em consideração as características operacionais da junta para que sejam as melhores possíveis para as condições do serviço proposto e que a soldagem seja realizada pelo menor custo.

É fundamental que o material de base seja bem conhecido (composição química e espessura), pois ele define as temperaturas de pré e pós-aquecimento a serem adotadas.

### 7.1 Eletrodos Revestidos para Aço Carbono – A5.1

Os consumíveis para soldagem dos aços carbono, segundo a AWS – *American Welding Society* – recebem a seguinte classificação:

#### **AWS E XXYZ**

A letra E simboliza eletrodo revestido.

XX representa a resistência mínima à tração do metal de solda multiplicada por 1.000 psi.

Y determina as posições de soldagem:

- 1 para todas as posições
- 2 para as posições plana e horizontal
- 4 somente para a posição plana

Z indica o tipo de revestimento

- 0 e 1 – celulósico
- 2 a 4 – rutílico
- 5 a 8 – básico
- 9 – óxido de ferro (corrente e demais características operacionais do eletrodo)

A Tabela 3 apresenta as características operacionais dos eletrodos revestidos para aço ao carbono.

**Tabela 3** – Características operacionais de eletrodos revestidos para aço carbono.

Classificação AWS	Tipo de revestimento Característica	Aglomerante (silicato de)	Tipo de corrente	Penetração relativa	Taxa de deposição relativa	Quantidade relativa de escória
E6010	Celulósico	Sódio	CCEP	Alta	Baixa	Fina
E6020	Celulósico	sódio	CA, CC	Média	Média	Fina
E6011	Óxido de ferro Celulósico	Potássio	CA, CCEP	Alta	Baixa	Fina
E6012	Rutílico	Sódio	CA, CC	Média	Baixa	Grossa
E6022	Rutílico	Potássio	CA, CC	Média	Alta	Fina
E6013	Óxido de ferro Rutílico	Potássio	CA, CC	Pequena	Baixa	Média
E7014	Rutílico	Potássio	CA, CC	Pequena	Média	Média
E7024	Pó de ferro Rutílico, Pó de ferro	Potássio-sódio	CA, CC	Pequena	Alta	Média
E7015	Básico, Baixo Hidrogênio	Sódio	CCEP	Média	Baixa	Média
E7016	Básico, Baixo Hidrogênio	Potássio	CA, CCEP	Média	Baixa	Média
E6027	Básico, Óxido e Pó de ferro	Potássio	CA, CC	Média	Alta	Grossa
E7027	Básico, Óxido e Pó de ferro	Sódio	CA, CC	Média	Alta	Grossa
E7018	Básico, Baixo hidrogênio, Pó de ferro	Potássio	CA,CCEP	Média	Média	Média
E7018M	Básico, Baixo hidrogênio, Pó de ferro	Potássio	CCEP	Média	Média	Média
E7028	Básico, Baixo hidrogênio, Pó de ferro	Potássio	CA, CCEP	Média	Alta	Média
E7048	Básico, Baixo hidrogênio, Pó de ferro	Potássio	CA, CCEP	Média	Média	Média
E6019	Rutílico	Potássio	CA, CC	Média	Média	Média
	Óxido de ferro					

O sufixo “M”, indica que o consumível atende a maioria das especificações militares (segundo os padrões norte-americanos, EUA).

Existem os sufixos “1” e “HZ”.

1 Maior tenacidade (E7016-1, E7018-1) e, no caso do E7024-1, também maior ductilidade.

HZ Hidrogênio difusível no metal de solda controlado.

H4, H8 e H16 = máximo de 4, 8 ou 16 ml de H<sub>2</sub> por 100g de metal de solda depositado.

A Tabela 4 apresenta as formulações típicas de revestimento de diversos eletrodos para aço ao carbono. Conhecer esta formulação auxilia a compreensão de vários fenômenos que ocorrem na soldagem. Destaca-se, entretanto, que não é exigido por norma que a proporção e os compostos de revestimentos de uma mesma classe sejam idênticos. Cada fabricante pode optar pela sua própria formulação.

**Tabela 4** – Formulações típicas de revestimentos de eletrodos para aço carbono.

Composto	Proporções (%) nas Classes (AWS E)								
	6010	6012	6020	6027	7014	7016	7018	7024	7028
	6013	6013	6022	7048					
Argila	-	0-10	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-
Carbonato de cálcio	-	0-5	0-5	0-5	0-5	15-30	15-30	0-5	0-5
Celulose	25-40	2-12	1-5	0-5	2-6	-	-	1-5	-
Dolomita	-	-	-	-	-	-	-	-	5-10
Fedspato	-	0-20	5-20	0-5	0-5	0-5	0-5	-	0-5
Ferro-manganês	-	5-10	5-20	5-15	5-10	2-6	2-6	5-10	2-6
Ferro-silício	5-10	-	0-5	0-10	0-5	5-10	5-10	0-5	2-6
Fluorita	-	-	-	-	-	15-30	15-30	-	5-10
Magnetita	-	-	15-45	5-20	-	-	-	-	-
Mica	-	0-15	0-10	-	0-5	-	-	0-5	-
Óxido de manganês	-	-	0-20	0-15	-	-	-	-	-
Pó de ferro	-	-	-	40-55	25-40	-	25-40	40-55	40-55
Rutila	10-20	30-55	0-5	0-5	20-35	15-30	0-5	20-35	10-20
Sílica	-	-	5-20	-	-	-	-	-	-
Silicato de potássio	(a)	5-15(a)	0-5	0-5	5-10	5-10	5-10	0-10	0-5
Silicato de sódio	20-30	5-10	5-15	5-10	0-10	0-5	0-5	0-10	0-5
Titanato de potássio	(a)	(a)	-	-	-	-	0-5	-	0-5

(a) O silicato de potássio é utilizado no lugar do silicato de sódio e o titanato de potássio no lugar da rutila para permitir a soldagem com corrente alternada.

Os catálogos dos fabricantes de eletrodos revestidos costumam trazer, de forma organizada, as informações mais importantes sobre cada tipo de eletrodo. Normalmente, esses dados incluem: composição química do metal de solda, onde o eletrodo pode ser usado, quais são suas propriedades mecânicas, em quais posições pode ser aplicado, o tipo de corrente elétrica que deve ser usada, e as faixas de corrente e a polaridade recomendadas conforme o diâmetro do eletrodo.

A seguir são apresentadas algumas das mais importantes características dos eletrodos revestidos para soldagem de aço carbono, segundo a classificação AWS:

**E6010 e E6011:** arco rígido; transferência metálica do tipo spray; grande penetração; escória facilmente destacável e pouco espessa; pelo fato da escória ser escassa a proteção do metal fundido é realizada principalmente pelos gases gerados pela decomposição do revestimento; cordão com perfil plano em juntas de ângulo; elevado nível de hidrogênio no metal de solda,

proveniente do alto teor de umidade no revestimento (até 7%) e da decomposição do mesmo; soldagem com a corrente no limite superior provoca respingos excessivos; o E6011 pode operar em CA e utilizando CCEP produz menor penetração, quando comparado com o E6010; diâmetros acima de 4,8 mm são melhores utilizados na posição plana ou em ângulo na horizontal; indicados para soldas de multipasses, especialmente nas posições vertical ou sobre-cabeça (em geral sobre tubulações), para uso geral de aços ao carbono, porém também pode ser aplicado em galvanizados e alguns aços de baixa liga.

**E6012:** arco suave e de fácil manipulação; escória densa, envolvendo completamente o cordão, o que pode ocasionar falta de penetração no passe de raiz; cordão com perfil convexo em solda de ângulo; metal de solda produzido apresenta menor ductilidade e maior limite de escoamento que os produzido com os do tipo celulósico; diâmetros acima de 4,0 mm são melhores utilizados nas posições plana e horizontal; diâmetros maiores ainda são empregados na posição horizontal, em passe único com alta velocidade e corrente de soldagem; conveniente para juntas mal posicionadas e/ou com distância de raiz relativamente grande, sobre aços ao carbono.

**E6013:** similar ao E6012, porém a transferência metálica é mais suave; a penetração é ligeiramente menor; opera em CA com corrente e tensão mais baixas; escória é mais facilmente destacável; cordão liso; perfil plano em juntas de ângulo e côncavo em juntas a topo; atende melhor aos requisitos de radiografia que o E6012; nas posições vertical e sobre-cabeça pode operar com as mesmas intensidades de corrente que o E6012; indicado para a soldagem de chapas finas; diâmetros acima 3,2 mm, pode realizar os mesmos trabalhos que o E6012.

**E6019:** revestimento similar ao E6013 e ao E6020, porém a penetração é maior; escória é mais fluida; cordão liso; perfil plano, ou ligeiramente côncavo; metal de solda com maior ductilidade e tenacidade que o produzido pelos eletrodos citados; atende aos requisitos de ensaio radiográfico; diâmetros acima de 4,8 mm devem ser empregados somente nas posições plana e horizontal em ângulo; na posição vertical ascendente, o “tecimento” do eletrodo deve ser limitado, para minimizar a ocorrência de mordedura; indicado para soldagem multipasse de aço ao carbono em espessuras de até aproximadamente 25 mm.

**E6020:** transferência metálica do tipo spray; penetração de média a alta; escória muito densa e facilmente destacável; pelo fato da escória ser produzida em grande volume, a proteção do metal fundido praticamente não depende da geração de gases; cordão com perfil plano ou ligeiramente côncavo em solda de junta em ângulo; fluidez do metal de solda é bastante alta, o que limita a aplicação para as posições plana e horizontal em ângulo; indicado para a soldagem de vasos de pressão, bases de máquinas pesadas e outros componentes estruturais pesados.

**E6022:** similar ao E6020; indicado para soldas em alta velocidade e corrente, em passe único, sobre juntas de topo na posição plana; juntas sobrepostas na posição horizontal e juntas de ângulo de chapas finas; perfil do cordão não é muito uniforme, mas tende a ser convexo.

**E6027 e E7027:** propriedades mecânicas do metal de solda E7027 são superiores as do E6027; revestimento dos dois eletrodos similar ao do E6020, porém a adição de pó de ferro toma sua massa cerca de 50% do total do consumível; transferência metálica do tipo spray; penetração média; poucos respingos; escória densa e facilmente destacável; cordão liso; perfil plano ou ligeiramente côncavo na posição horizontal sobre junta em ângulo; possível o uso de altas correntes; não atende tão satisfatoriamente quanto o E6020 aos requisitos de ensaio radiográfico; alta velocidade de soldagem; indicado para aços ao carbono relativamente espessos.

**E7014:** revestimento similar ao dos eletrodos E6012 e E6013, porém a adição de pó de ferro aumenta a eficiência de deposição do E7014 em relação aos citados; penetração equivalente ao E6012, sendo possível utilizar o E7014 sobre juntas mal posicionadas e com grande distância de raiz; escória com viscosidade alta o suficiente para soldagem em todas as posições; muitas vezes é auto-destacável; cordão liso; perfil plano em juntas de ângulo ou ligeiramente convexo; devido ao pó de ferro, opera com maior intensidade de corrente; indicado para aços carbono e baixa liga.

**E7015:** consumível do tipo baixo hidrogênio; revestimento higroscópico e por este motivo o eletrodo somente será do tipo baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso; escória básica, densa e facilmente destacável; perfil do cordão plano em junta de ângulo e convexo em junta de topo; o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade; diâmetros acima de 4,0 mm devem ser empregados somente para soldagem em juntas de topo na posição plana, ou em ângulo nas posições plana e horizontal; indicado para aço carbono e de baixa liga, para a realização de cordões curtos sobre sessões espessas, as quais podem estar altamente estranguladas, para aços com alto teor de enxofre, onde a escória poderá ser de difícil destacabilidade e a superfície do cordão irregular e para aços esmaltados.

**E7016:** consumível do tipo baixo hidrogênio, com as mesmas características do E7015, além de operar em CA; revestimento higroscópico, e por este motivo o eletrodo somente será do tipo baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso; o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade; classificação E7016-1 indica que o metal de solda deve possuir manganês no limite superior admissível, reduzindo a resistência ao impacto do metal de solda quando comparado ao E7016.

**E7018 e E7048:** consumíveis do tipo baixo hidrogênio; E7048 é excelente para soldagem na posição vertical-descendente; revestimento similar ao E7015, mas com adição de pó de ferro (até 40% da sua massa); arco muito suave; produção de poucos respingos; penetração média; escória densa e facilmente destacável; cordão liso; perfil ligeiramente convexo nas posições plana e horizontal em juntas de ângulo; revestimento higroscópico, e por este motivo o eletrodo somente será do tipo baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso; o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade; indicado para a soldagem de aço carbono, aço de alto carbono, de alta resistência ou de baixa liga; a classificação E7018-1 designa objetivos similares àqueles do E7016-1.

**E7028:** consumível do tipo baixo hidrogênio; revestimento higroscópico, e por este motivo o eletrodo somente será do tipo baixo hidrogênio, quando devidamente ressecado antes do uso; o arco deve ser mantido o mais curto possível, para reduzir o risco de porosidade; revestimento similar ao E7018, porém muito mais espesso, alcançando até 50% da massa do eletrodo, sendo até metade de pó de ferro; elevada taxa de deposição; escória semelhante ao obtido com E7016; indicado para soldagem nas posições plana em junta de topo e horizontal em juntas de ângulo.

**E7024:** revestimento similar ao E6012 e E6013, porém muito mais espesso, alcançando até 50% da massa do eletrodo, sendo até metade de pó de ferro; arco suave; poucos respingos; pequena penetração; cordão liso; perfil do cordão de convexo a plano; convenientes para realizar soldas com alta velocidade sobre junta de ângulo nas posições plana ou horizontal; a classificação E7024-1 indica metal de solda com maior ductilidade e menor temperatura de transição ao impacto que o E7024.

## 7.2 Eletrodos Revestidos para Aço de Baixa Liga – A5.5

O revestimento dos eletrodos revestidos para aço de baixa liga é similar aos dos aços carbono. Entretanto, nesse caso é mais complexa a inter-relação entre o material de base, o consumível, a técnica e as demais condições de soldagem. Esses consumíveis, segundo a AWS – *American Welding Society* – recebem a mesma classificação dos aços carbono, acrescida de sufixos, os quais determinam a composição química do metal de solda depositado:

### AWS E XXXX-ZZ, ONDE “ZZ” pode ser:

- A1 Eletrodos ligados ao molibdênio (para aço carbono-molibdênio);
- BX Eletrodos ligados ao cromo-molibdênio;
- CX Eletrodos ligados ao níquel;
- DX Eletrodos ligados ao manganês-molibdênio;
- NM Eletrodos ligados ao níquel-molibdênio;
- M Eletrodos de alta resistência com exigência militar;
- P Eletrodos ligados ao CrNiMoV, especial para tubulações;
- W Eletrodos ligados ao CrNiMoV, para aços expostos ao tempo;
- G Eletrodos para outros aços de baixa liga, com o metal de solda mínima contendo pelo menos um dos seguintes elementos e na proporção especificada, além de outros requerimentos convencionados entre fabricante e usuário: 1,00% Mn, 0,80% Si, 0,50% Ni, 0,30% Cr, 0,20% Mo, 0,10% V.

Quando for acrescida a letra “L” no final da classificação (por exemplo: AWS E 8018-B2L) indica que o teor de carbono deve ser controlado: máximo de 0,05%.

## 7.3 Eletrodos Revestidos para Aço Inoxidável – A5.4

Os consumíveis para soldagem dos aços inoxidáveis, segundo a AWS – *American Welding Society* – recebem a seguinte classificação:

### AWS E XXX-XX

Os três primeiros algarismos seguem a norma AISI - *The American Iron and Steel Institute* – para aços inoxidáveis:

- Austeníticos Série 200 e 300;
- Ferríticos Série 400;
- Martensíticos Série 400 e 500.

Além destes três dígitos, podem ser acrescentadas as seguintes siglas:

- L Eletrodo com baixo carbono, inferior a 0,03% (ex.: E 308L-16);
- H Eletrodo com alto carbono, entre 0,04 e 0,08% (ex.: E 310H-15);
- LR Eletrodo com baixo teor de elementos residuais (ex.: E 320LR).

Além desses, quando o eletrodo apresenta um teor mais elevado de algum elemento em relação ao usual, apresentam ainda o símbolo deste elemento como um sufixo, com, por exemplo:

- Mo Eletrodo com adição de molibdênio (ex.: E 309Mo-16);
- MoL Eletrodo com baixo carbono e adição de molibdênio (ex.: E 309MoL-15);
- Cb Eletrodo com adição de nióbio (ex.: E 309Cb-16).

Os dois últimos algarismos indicam o tipo de revestimento e conformação do eletrodo:

- AWS EXXX-15 (1) Eletrodo ligado (5) Revestimento básico;
- AWS EXXX-16 (1) Eletrodo ligado (6) Revestimento rutilico;
- AWS EXXX-17 (1) Eletrodo ligado (7) Revestimento misto;
- AWS EXXX-25 (2) Eletrodo sintético (5) Revestimento básico;
- AWS EXXX-26 (2) Eletrodo sintético (6) Revestimento rutilico.

A combinação desses dois dígitos indica os tipos de corrente, revestimento e demais características operacionais dos eletrodos revestidos:

- **15:** eletrodo recomendado para operar com CCEP; apesar do mesmo ser algumas vezes utilizado com CA, não pode ser qualificado com este tipo de corrente; eletrodos com diâmetros menores que 4,0 mm pode ser utilizado para soldagem em todas as posições; revestimento básico garante uma melhor capacidade de dessulfuração e uma maior resistência à fissuração.
- **16:** revestimento rico em rutila e possui elementos de baixo potencial de ionização, tal como potássio; boa estabilidade do arco; pode ser usado com CA e CC; em soldas de filete na posição horizontal, o perfil do cordão tipicamente varia de plano a levemente convexo; eletrodos com diâmetros menores que 4,0 mm são utilizados para soldagem em todas as posições.
- **17:** revestimento similar ao do sufixo 16, porém parte da rutila é substituída por sílica; pode operar com CA e CC; boa estabilidade do arco; eletrodos com diâmetros superiores a 4,8 mm não são recomendados para soldagem nas posições vertical ou sobre-cabeça, enquanto os de menores diâmetros podem ser utilizados em todas as posições; comparando este eletrodo com o do sufixo 16, tem-se que a poça de fusão tende a se espalhar mais, resultando em um cordão mais largo; transferência metálica tende a ser spray; a taxa de solidificação da escória é menor, com melhor desempenho quando soldada com a técnica de arraste; em soldas de filete na posição horizontal, o perfil do cordão tipicamente varia de plano a côncavo; na posição vertical-ascendente, é necessário realizar um leve “tecimento” do eletrodo, devido à menor taxa de solidificação da escória.
- **25:** revestimento similar, em composição e características operacionais ao do sufixo 15; solda com CCEP; eletrodo é do tipo sintético, a alma do eletrodo pode possuir composição química muito diferente daquela do metal depositado, sendo, em geral, de aço carbono, operando com corrente superior a utilizada com alma de aço inoxidável, com os elementos de liga introduzidos através do revestimento; espessura do revestimento maior que a do sufixo 15; aplicável somente às posições plana e horizontal.
- **26:** revestimento similar, em composição e características operacionais ao do sufixo 16; pode operar CA e CC; eletrodo do tipo sintético, similar ao do sufixo 25.

De forma geral, quando comparados com os aços carbono e de baixa liga, os inoxidáveis possuem diversas características diferentes: maior expansão e menor condutividade térmica, o que aumenta a tendência das soldas apresentarem distorções. Os mesmos também possuem resistência elétrica mais alta, o que resulta numa maior taxa de deposição para uma mesma intensidade de corrente. Por outro lado, a soldagem desses aços pode apresentar típicos problemas, tais como: trinca de solidificação; formação de fase sigma (frágil); crescimento excessivo dos grãos na ZTA (zona termicamente afetada) e precipitação de carbonetos.

Em uma primeira aproximação, os aços inoxidáveis podem ser considerados como um pouco mais difíceis de soldar que aços baixo carbono. Entretanto, esta afirmativa é muito vaga, visto que as dificuldades variam consideravelmente com o tipo de aço inoxidável. Um aspecto fundamental e comum na soldagem de aços inoxidáveis é a necessidade de limpeza para minimizar contaminações que venham a deteriorar a resistência à corrosão. A forma do cordão também é muito importante, uma vez que irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira e início de corrosão. Adicionalmente, as diferenças de propriedades físicas entre os aços comuns e os inoxidáveis, implicam em diferenças nos procedimentos de soldagem. As principais diferenças de propriedades são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5.** – Valores típicos de propriedades físicas dos aços inoxidáveis e dos aços carbono à temperatura ambiente.

Propriedades	Aços inoxidáveis			Aço carbono
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7800-8000	7800	7800	7800
Módulo de elasticidade (GPa)	193-200	200	200	200
Coef. de expansão térmica (mm/m °C)	17-19	11,2-12,1	11,6-12,1	11,7
Condutividade térmica (W/m k)	18,7-22,8	14,4-26,3	28,7	60
Resistência elétrica (nW m)	690-1020	590-670	550-720	120
Faixa de fusão (°C)	1400-1450	1480-1530	1480-1530	1530

Em geral, a soldagem dos aços inoxidáveis não é realizada pela simples seleção de um eletrodo similar ao metal base. Por exemplo, os inoxidáveis ferríticos podem ser soldados com o E430 (ferrítico), ou com austeníticos, ou ligas de níquel. A baixa tenacidade na ZTA dos ferríticos, aliada a dificuldade do eletrodo revestido em transferir alumínio e titânio para o metal de solda, limita o uso de material similar. Portanto, é importante ter um bom conhecimento sobre os aços inoxidáveis para que a seleção do eletrodo revestido mais adequado ao material seja realizada satisfatoriamente.

A classe dos aços inoxidáveis austeníticos inclui, principalmente, ligas Fe-Cr-Ni, embora existam ligas em que parte ou todo o níquel foi substituído por manganês e nitrogênio. Estes aços apresentam estrutura predominantemente austenítica, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Estes aços formam o grupo mais numeroso e utilizado dos aços inoxidáveis, representando cerca de 65 a 70% do total produzido. Contêm cerca de 6 a 26% de níquel, 16 a 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono, com um teor total de elementos de liga de, pelo menos, 26%. Estes aços apresentam, à temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, limite de resistência alto e uma elevada ductilidade. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. São inúmeras as suas utilizações. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em diversos outros casos em que boa resistência à corrosão, facilidade de limpeza e ótimas características de fabricação são necessárias. Os principais aços inoxidáveis austeníticos utilizados na indústria, classificados segundo a AISI são: 301, 302, 303, 304, 308, 309, 310, 316, 317, 321 e 347.

Os aços inoxidáveis austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção dos que contêm adição de enxofre para usinagem fácil. Nos aços com teor de carbono superior a 0,06%, carbonetos podem ser precipitados nos contornos de grão da ZTA, durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência à corrosão. Para minimizar este problema e, também, problemas de distorção, recomenda-se soldar estes aços com uma maior velocidade de deslocamento. Devido à sua menor temperatura de fusão e menor condutibilidade térmica, a

corrente de soldagem é usualmente menor que a usada em aços baixo carbono. O maior coeficiente de expansão térmica torna maior a tendência à distorção na soldagem e torna necessária a adoção de técnicas para a sua redução. Para chapas finas, dispositivos de fixação e ponteamto cuidadoso são, em geral, uma necessidade.

No caso dos inoxidáveis austeníticos, deve-se ressaltar a necessidade do metal de solda conter ferrita delta em diversos casos, sendo que a formação deste micro-constituente é função da composição química e das condições em que a solidificação ocorre. Dependendo da composição química (maior quantidade de elementos gamagênicos), o metal de solda pode solidificar com uma estrutura completamente austenítica, sendo muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Esta sensibilidade é minimizada pela seleção de metal de adição que possibilite a solidificação com uma estrutura austeno-ferrítica e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente. Quando o uso de um consumível deste tipo não for possível, como na soldagem para certos ambientes altamente corrosivos ou em aplicações criogênicas, eletrodos com baixos teores de enxofre e fósforo e uma elevada relação Mn/S devem ser usados junto com um procedimento de soldagem que minimize o nível de tensões na solda.

A ferrita delta minimiza a incidência de trinca de solidificação no metal de solda e aumenta a sua resistência mecânica, porém, por outro lado, afeta adversamente a tenacidade em serviço criogênico e é indesejável em altas temperaturas (500 à 900 °C), pois se transforma na fase frágil sigma, caso permaneça por tempo suficientemente longo neste intervalo. Elementos químicos tais como níquel, carbono, nitrogênio, etc., são formadores de austenita, enquanto cromo, nióbio, molibdênio, etc., promovem ferrita delta.

Aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr predominantemente ferríticas em qualquer temperatura até a sua fusão. Têm de 12 a 30% de cromo e um baixo teor de carbono, em geral, bem inferior a 0,1%. Como não podem ser completamente austenitizados, estes aços não são endurecíveis por têmpera e sua granulação só pode ser refinada por uma combinação adequada de trabalho mecânico e recozimento de recristalização. Estes aços apresentam um baixo coeficiente de expansão térmica e uma boa resistência à corrosão e à oxidação, inclusive a alta temperatura. No estado recozido, com uma granulação fina, sua ductilidade e tenacidade à temperatura ambiente podem ser consideradas satisfatórias. São usados em aplicações envolvendo o ácido nítrico, na fabricação de eletrodomésticos, cubas e utensílios para cozinha e laboratórios, balcões frigoríficos, em aplicações à temperatura elevada, sistemas de exaustão em automóveis, etc. Os principais aços inoxidáveis ferríticos utilizados na indústria, classificados segundo a AISI são: 405, 406, 409, 430, 442, 443, 446.

Durante a soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos, visto que apresentam coeficiente de expansão térmica similar aos aços baixo carbono, possuem menor tendência à distorção que os demais aços inoxidáveis. Apresentam, contudo, sérios problemas de perda de ductilidade e tenacidade e de resistência à corrosão na região soldada devido à formação de uma estrutura de granulação grosseira e de martensita e à precipitação de carbonetos e nitretos. Estes problemas limitam, para a maioria dos aços ferríticos, a utilização da soldagem para aplicações de pequena respondabilidade. Em alguns casos, utiliza-se metal de adição austenítico para restringir estes problemas a ZTA da solda. Novos tipos de aços inoxidáveis ferríticos com teor extra baixo de intersticiais (C+N <0,03%) e adições de Nb ou Ti têm sido desenvolvidos e apresentam um comportamento melhor para a soldagem.

Aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas Fe-Cr-C, contendo 12 a 18% de cromo e de 0,1 a 0,5% de carbono (embora, em alguns casos, pode-se chegar até 1%C) e podem ser

austenitizadas se forem aquecidas a uma temperatura adequada. Devido ao seu elevado teor de liga, estes aços apresentam uma elevada temperabilidade e podem apresentar uma estrutura completamente martensítica em peças de grande espessura mesmo após um resfriamento ao ar calmo. São, desta forma, ligas facilmente endurecíveis por tratamento térmico, sendo usadas, em geral, no estado temperado e revenido. Sua resistência à corrosão tende a ser inferior a dos outros tipos, sendo, contudo, satisfatória para meios mais fracamente corrosivos. São particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência a abrasão ou erosão em ambiente seco ou úmido como, por exemplo, em componentes de turbinas a gás ou vapor, mancais e peças de cutelaria. Os principais aços inoxidáveis martensíticos utilizados na indústria, classificados segundo a AISI são: 403, 410, 414, 416, 431, 420, 440.

Aços inoxidáveis martensíticos de baixo teor de carbono podem ser soldados sem maiores problemas. Aços com teor de carbono acima de 0,15% tendem a ser temperáveis ao ar e necessitam de pré-aquecimento e, freqüentemente, de pós-aquecimento e, mesmo, de tratamento térmico pós-soldagem para garantir propriedades adequadas e prevenir a formação de trincas na junta soldada. A temperatura de pré-aquecimento varia usualmente de 230 a 290°C e o tratamento térmico pós-soldagem varia de 650 a 760°C, seguido de resfriamento lento até a temperatura ambiente. Pré-aquecimento, pós-aquecimento e tratamento térmico deficientes levam à formação de trincas de têmpera na região da solda, potencializadas pela presença de hidrogênio. Quando o pré-aquecimento for impossível, metal de adição austenítico deve ser usado.

Consumíveis de aço inoxidável (principalmente austenítico) são comumente usados na soldagem de outros tipos de aços, na união de aços inoxidáveis com outros aços e na fabricação de revestimentos protetores contra a corrosão ou contra diversos tipos de desgaste. Para agilizar a seleção de eletrodos revestidos inoxidáveis, nos casos mais simples, a Tabela 6 apresentada sugere sugestões convenientes sobre diferentes metais base.

**Tabela 6** – Sugestões de eletrodos revestidos para soldagem de aços inoxidáveis.

Material de base	Condições de serviço	Eletrodo sugerido (AWS E)
<b>Aços Austeníticos</b>		
301, 302, 304, 305, 308 302B, 309, 309S 304L	Como soldada ou recozida Como soldada Como soldada ou tensões aliviadas	308 309 347, 308L
303, 303Se 310, 310S 316 316L	Como soldada ou recozida Como soldada Como soldada ou recozida Como soldada ou tensões aliviadas	312 310 316 318, 316L
317	Como soldada ou tensões aliviadas	317
317L 318, 316Nb	Como soldada ou recozida Como soldada ou estabilizada e tensões aliviadas	317Nb 318
321, 347, 348	Como soldada ou estabilizada e tensões aliviadas	347

Tabela 6 – continuação

<b>Aços Martensíticos</b>		
430, 410, 416, 416Se	Recozida ou endurecida e tensões aliviadas	410
403, 410	Como soldada	308, 309, 310
416, 416Se	Como soldada	308, 309, 312
420	Recozida ou endurecida e tensões aliviadas	420
431	Recozida ou endurecida e tensões aliviadas	308, 309, 310
<b>Aços Ferríticos</b>		
405	Recozida	405Nb, 430
405, 430, 446	Como soldada	308, 309, 310
430F, 430FSe	Como soldada	308, 309, 312
430, 430F, 430FSe	Recozida	430
446	Recozida	446

Além dessas informações, a seguir é apresentada uma breve descrição das mais importantes características dos eletrodos revestidos para soldagem de aço inoxidável, segundo a classificação AWS:

**E209:** composição química nominal 21%Cr, 10%Ni, 5,5%Mn, 2%Mo e 0,20%N; austenítico endurecido com nitrogênio; usado comumente para a soldagem do aço AISI 209; depósito austenítico de alta resistência mecânica e boa tenacidade num amplo intervalo de temperatura devido ao nitrogênio; nitrogênio reduz a capacidade de difusão do carbono e reduz a tendência à precipitação intergranular de carbonetos, apresentando boa resistência à corrosão intergranular; possui alta resistência à corrosão localizada e galvânica nas fendas em meio aquoso clorídrico; possui um teor de elementos de liga suficientemente elevado para ser utilizado na soldagem de metais dissimilares, como aço carbono em inoxidável, e na deposição direta como revestimento resistente à corrosão sobre aço carbono.

**E219:** composição química nominal 20%Cr, 6%Ni, 9%Mn e 0,20%N; austenítico; indicado para a soldagem do AISI Tipo 219; depósito austenítico resistente à corrosão; aplicações similares ao E209.

**E240:** composição química nominal 18%Cr, 5%Ni, 12%Mn e 0,02%N; austenítico; indicado para a soldagem dos AISI Tipos 240 e 241; depósito austenítico resistente à corrosão intergranular; aplicações similares ao E209; também utilizado para revestimento protetor ao desgaste.

**E307:** composição química nominal 19%Cr, 9,8%Ni e 4%Mn; austenítico; usado principalmente na soldagem de metais dissimilares como aço manganês austenítico em aço carbono forjado ou fundido onde se deseja moderada resistência mecânica e elevada resistência à fissuração.

**E308:** composição química nominal 19%Cr e 10%Ni; austenítico; utilizado geralmente na soldagem de metais de mesma composição química, tais como AISI Tipos 301, 302, 304 e 305; apresenta as variações **H**, de maior teor de carbono, no limite superior do intervalo admissível, que é usado para garantir uma maior resistência mecânica à temperatura elevada; **L**, de baixo teor de carbono (0,04% máx.), que é usado para garantir uma melhor resistência à corrosão intergranular, pois reduz a possibilidade de precipitação de carbonetos de cromo nos contornos dos grãos, mesmo sem o

emprego de estabilizantes, tais como nióbio ou titânio, entretanto, o metal de base não deve conter mais do que 0,03% C e a resistência em altas temperaturas é menor que o metal de solda estabilizado com nióbio; **Mo**, de maior teor de molibdênio (2-3%), indicado para a soldagem do aço inoxidável fundido ASTM CF8M, também indicado na soldagem do AISI 316, quando for necessário maior número de ferrita que ao obtido com o E316; **MoL**, de maior teor de molibdênio com baixo carbono, indicado para soldagem do aço inoxidável fundido ASTM CF3M, para a soldagem do AISI 316L, quando for necessário maior número de ferrita que ao obtido com o E316L.

**E309**: composição química nominal 23,5%Cr, 13%Ni; austenítico; indicado para soldagem de metais similares na condição como trabalhada ou como fundida, na união de aço carbono ao AISI Tipo 304 e revestimento protetor sobre aço carbono, para soldagem do AISI Tipo 304, quando a junta requer superior resistência à corrosão; apresenta as variações **L**, de teor de baixo carbono, melhor resistência à corrosão intergranular, a resistência em altas temperaturas menor que o estabilizado ao nióbio, **Mo**, de maior teor de molibdênio, indicado para soldagem de aços revestidos do tipo AISI 316, ou metais dissimilares como austeníticos inoxidáveis contendo molibdênio em aços carbono; **Cb**, com adição de nióbio e redução do carbono, maior resistência à corrosão intergranular, o nióbio diminui a precipitação de  $C_xCr_y$ , maior resistência mecânica em elevada temperatura de serviço, indicado para a soldagem de aços revestidos com AISI Tipo 347, ou para a soldagem deste com outro aço carbono.

**E310**: composição química nominal 26,5%Cr e 21%Ni; austenítico; indicado para soldagem de aços de composição similar; apresenta as variações **H**: de alto teor de carbono (0,35-0,45%); indicado para soldagem de união ou reparo de fundidos com composição química similar - como os do Tipo HK ("Alloy Castings Institute") - resistentes ao calor e corrosão; não recomendado para serviços cujo ambiente contenha alto enxofre ou que ocorra choque térmico; relativamente longa exposição à temperatura entre 760 e 870 °C pode induzir a formação da fase sigma e carbonetos secundários, resultando em marcante redução da resistência à corrosão e/ou ductilidade; **Cb**: com adição de nióbio e redução do carbono; indicado para soldagem de aços revestidos do tipo AISI 347, ou metais dissimilares, tais como aços ao nióbio em aços carbono.

**E312**: composição química nominal 30%Cr e 9%Ni; austenítico; originalmente projetado para a soldagem de ligas fundidas de composição química similar; também empregado na soldagem de metais dissimilares, dos quais um possui alto teor de níquel; apresenta alta resistência à trinca de solidificação, pois, mesmo com grande diluição, mantém alto o teor de ferrita na matriz austenítica; se empregado em temperaturas que excedem 420 °C, há formação de fases secundárias frágeis.

**E316**: composição química nominal 18,5%Cr, 12,5%Ni e 2,5%Mo; austenítico; indicado para a soldagem do AISI Tipo 316 e similares, e nas uniões em serviço de alta temperatura, com elevada resistência à fluência devido ao molibdênio; a corrosão poderá ocorrer em alta taxa se a ferrita formar uma rede contínua, ou semi-contínua; se a relação cromo/molibdênio for menor que 8,2; se a junta permanecer imersa em um meio corrosivo; apresenta as variações **H**: de alto teor de carbono, no limite superior do intervalo admissível (0,04-0,08%); apresenta maior resistência à fluência e resistência à tração em temperaturas elevadas; indicado para solda de metais base de composição química similar; **L**: de baixo teor de carbono (0,04% máx.); maior resistência à corrosão intergranular, sem o emprego de estabilizantes, tais como nióbio e titânio que a do E316; menor resistência em elevadas temperaturas que a do E316H; indicado para a soldagem de aços austeníticos ao molibdênio de baixo carbono.

**E317**: composição química nominal 19,5%Cr, 13%Ni e 3,5%Mo; austenítico; indicado para a soldagem de metais com composição química similar e cuja junta estará exposta à ambiente

altamente corrosivo; apresenta a variação **L**: de baixo teor de carbono (0,04% máx.); maior resistência à corrosão intergranular, sem o emprego de estabilizantes, tais como nióbio e titânio; menor resistência mecânica em temperaturas elevadas.

**E318**: composição química similar ao E316, exceto pela adição de nióbio, o que fornece maior resistência à corrosão intergranular; utilizado basicamente para a soldagem de metais com composição química similar, austenítico.

**E320**: composição química nominal 20%Cr, 34%Ni, 2,5%Mo e 3,5%Cu, além da adição de nióbio para aumentar a resistência à corrosão intergranular; austenítico; indicado principalmente na soldagem de metais com composição química similar, onde é necessária alta resistência à corrosão, incluindo ácido sulfúrico e seus sais; pode ser utilizado para soldagem de aços laminados ou fundidos de composição química similares, sem a necessidade de tratamento térmico após a soldagem; para a soldagem de fundidos é disponível uma versão sem nióbio para fundidos que não tenham este elemento, sendo necessário tratamento térmico de solubilização após a solda; apresenta a variação **LR**: com baixo teor de elementos residuais C, Si, P e S e teor controlado de Mn e Nb; menor tendência à trinca de solidificação, mantendo a mesma resistência à corrosão, quando comparado com metais de solda completamente austeníticos, apesar da resistência mecânica ser menor que a do E320.

**E330**: composição química nominal 15,5%Cr e 35%Ni; austenítico; indicado em situações que requerem resistência ao calor e à formação de carepas acima de 980 °C, porém em ambientes com alta concentração de enxofre podem afetar adversamente essas características; empregado também em solda de reparos sobre ligas fundidas de composição química similar; apresenta a variação **H**: de alto teor de carbono (0,35-0,45%); utilizado basicamente na união e reparos de ligas resistentes ao calor e corrosão do tipo HT (*Alloy Castings Institute*), podendo ser utilizado em até 1150 °C com atmosfera oxidante, ou 1090 °C se a mesma for redutora, porém em ambientes com alta concentração de enxofre podem afetar adversamente essas características.

**E347**: composição química nominal 19,5%Cr, 10%Ni, com adição de nióbio, ou nióbio e tântalo, para estabilizar a precipitação de carbonetos, aumentando assim a resistência à corrosão intergranular; austenítico; indicado geralmente na soldagem de metais com composição química similar, estabilizados com nióbio ou titânio; não são disponíveis eletrodos revestidos que depositem titânio, devido à elevada perda desse elemento, quando o mesmo é transferido através do arco elétrico com eletrodo revestido; o metal depositado pode apresentar uma maior tendência à formação de trincas a quente (número de ferrita muito baixo ou excessivamente alto).

**E349**: Composição química nominal 19,5% Cr, 9%Ni, 1%Nb, 0,5%Mo e 1,4%W; austenítico; geralmente empregado na soldagem dos aços AISI Tipos 651 e 652, de composição química similar; metal de solda apresenta alta resistência à fratura em temperaturas elevadas e é pouco susceptível à trinca de solidificação, como consequência do elevado teor de ferrita delta.

**E383**: composição química nominal 28%Cr, 31,5%Ni, 3,7%Mo e 1%Cu; austenítico; metal de solda austenítico; indicado para a soldagem de aços de composição similar, ou com outros aços inoxidáveis; metal de solda apresenta alta resistência a ambientes contendo ácidos sulfúrico e fósforo, com baixos teores de C, Si, P e S, reduzindo a susceptibilidade à trinca de solidificação.

**E385**: composição química nominal 20,5%Cr, 25%Ni, 5%Mo e 1,5%Cu; austenítico; geralmente empregado na soldagem do AISI Tipo 904L, em vasos contendo ácido sulfúrico e cloretos; ou esse metal base em outros aços inoxidáveis; ou, ainda, o Tipo 317L para melhor resistência à corrosão;

os elementos C, Si, P e S são mantidos em baixos níveis, reduzindo a susceptibilidade à trinca de solidificação.

**E410:** composição química nominal 12%Cr; martensítico endurecido ao ar; depósito temperável ao ar, sendo necessário pré- e pós-aquecimento para que o metal de solda alcance adequada ductilidade; indicado na soldagem de metais de composição química similar e revestimentos resistentes à corrosão, erosão ou abrasão; apresenta a variação **NiMo**: de composição química modificada do E410 para eliminar a ferrita da microestrutura, pois a mesma afeta adversamente as propriedades mecânicas; tratamento térmico após a soldagem não deve exceder a 620 °C, pois temperaturas mais altas podem causar re-endurecimento devido à martensita não revenida na microestrutura, quando do resfriamento; indicado principalmente na soldagem do fundido ASTM CA6NM, ou similares, assim como sobre chapas finas dos AISI 405 (ferríticos), 410 e 410S (ambos martensíticos).

**E430:** composição química nominal equilibrada, para que o metal de solda contenha de 15 a 18%Cr; ferrítico; possui adequada resistência à corrosão para aplicações usuais, com suficiente ductilidade após tratamento térmico.

#### 7.4 Eletrodos Revestidos para Níquel e suas Ligas – A5.11

Cuidados especiais são necessários para a soldagem com eletrodo revestido deste grupo. Como o metal fundido possui pouca fluidez, o mesmo não preenche a junta tão facilmente quanto o de aço e deve ser posicionado exatamente no local que o requer, com pequeno balanço do eletrodo. Caso a poça de fusão exiba largura maior que três vezes o diâmetro do eletrodo, isso é indicação de possível exposição da mesma à atmosfera. Por outro lado, a tentativa de se compensar a relativa falta de fluidez através da elevação da intensidade de corrente, leva ao excessivo aquecimento do eletrodo e resulta em perda da estabilidade do arco e proteção da poça de fusão, pois o revestimento se separa da alma antes de alcançar a extremidade em que se encontra o arco elétrico. As principais características de cada classe deste eletrodo são:

**ENi-1:** o metal de solda depositado é de níquel quase puro, com 1-4% de titânio no revestimento para desoxidá-lo e eliminar porosidade; metal de solda altamente resistente a ataques corrosivos de álcalis cáustico, gases halógenos secos, etc.; indicado para soldagem de níquel comercialmente puro (ASTM A461 Grs. B160, B161, B162 e B163) empregado nos equipamentos de processamento de alimentos e transporte de materiais cáusticos, entre outros; também indicado para soldagem ou revestimento de aço com níquel; opera com CCEP; para diâmetros menores que 3,2 mm, aplicado em todas as posições e para maiores diâmetros, somente nas posições plana e horizontal.

**ENiCu-7:** metal depositado do tipo monel (Ni-Cu); apresenta boas combinação de resistência à corrosão e alta tenacidade; empregado na soldagem de união de ASTM A461 Grs. B127, B163, B164 e B165, além de ligas Ni-Cu com aços; apresenta as mesmas características operacionais que o ENi-1.

**ENiCrFe-1:** depósito apresenta resistência à oxidação em temperaturas elevadas, mantendo boas propriedades mecânicas; utilizado em acessórios de fornos para tratamento térmico e processamento de alimentos; devido à sua elevada resistência à corrosão sob tensão, corrosão por água de alta pureza e íon cloro, o mesmo é também empregado em reatores nucleares; indicado para soldagem dos ASTM A461 Grs. B163, B166, B167 e B168; apresenta as mesmas características operacionais que o ENi-1.

**ENiCrFe-2:** amplamente utilizado na soldagem de ligas dissimilares, tais como aços ferríticos em austeníticos, ligas com alto teor de níquel em aços austeníticos e para a soldagem dos ASTM A461 Grs. B163, B166, B167 e B1688; apresenta as mesmas características operacionais que o ENi-1.

**ENiCrFe-3:** versão com alto manganês, com aplicação específica na área nuclear; manganês diminui a resistência à corrosão do depósito em meios que não sejam a água quente, porém, a tendência à trinca é minimizada na soldagem de juntas altamente estranguladas; utilizado na soldagem de ligas Ni-Cr-Fe no lado revestido por estas ligas em aços e revestimento protetor, além de ser empregado sobre ASTM A461 Grs. B163, B166, B167 e B168; apresenta as mesmas características operacionais que o ENi-1.

**ENiCrFe-4:** desenvolvido com o objetivo de soldar aços com 9%Ni, tipicamente ASTM A333, A334, A353, A522 e A533; opera em CA e CC, com o depósito possuindo maior resistência mecânica que o ENiCrFe-2.

**ENiMo-1:** utilizado na soldagem de ligas Ni-Mo; lado de aço revestido com essa liga; sobre outras ligas de níquel; tipicamente sobre aços ASTM B333, B335, B619, B622 e B626; posição de soldagem usual é a plana.

**ENiMo-3:** empregado na soldagem de metais dissimilares entre ligas de níquel, cobalto e ferro; geralmente opera somente na posição plana.

**ENiMo-7:** utilizado na soldagem de ligas Ni-Mo; lado revestido de juntas de aço com materiais tais como ASTM B333, B335, B619, B622 e B626; opera na posição plana.

**Grupo ENiCrMo:** utilizados para a soldagem de ligas NiCrMo, com ligas Hastelloy do tipo C, F, G e X; realizam soldas no lado revestido com níquel de aços, de chapas assim revestidas com aço, ou com ligas à base de níquel; geralmente operam somente em CC e na posição plana, com exceção do ENiCrMo-6, o qual solda com CA e CC, em todas as posições com diâmetros de até 3,2 mm e nas posições plana e horizontal para diâmetros maiores; tipicamente, esses consumíveis são utilizados nos seguintes metais base: ENiCrMo-1, sobre ASTM B581, B582, B619, B622 e B626; ENiCrMo-2, sobre ASTM B435, B572, B619, B622 e B626; ENiCrMo-3, sobre ASTM B443, B444 e B446; ENiCrMo-4, sobre ASTM B574, B575, B619, B622 e B626; ENiCrMo-5, sobre ASTM B334, B336 e B366; ENiCrMo-6, sobre aços com 9%Ni, tais como ASTM A333, A334, A353, A522 e A553; ENiCrMo-7, sobre ASTM B574, B575, B619, B622 e B626; ENiCrMo-9, sobre ASTM B581, B582, B619, B622 e B626.

## 7.5 Eletrodos Revestidos para Cobre e suas Ligas – A5.6

Na descrição dos consumíveis a seguir, as composições químicas (principais elementos adicionados além do cobre) bem como as durezas discriminadas são dos metais de solda depositados sem diluição.

**ECu:** cobre puro desoxidado; dureza de 20 a 40 HRF; indicado para soldagem de materiais de base deste tipo, similares e cobre eletrolítico; também indicado para reparos destes materiais, ou revestimentos protetores de ferros fundido e aços, sendo que sobre soldas de revestimento, este reparo deve ser realizado com a mínima diluição possível.

**ECuSi:** 3%Si, com baixos teores de manganês e estanho; dureza de 80 a 100 HB (carga de 500 kg); opera em CCEP; freqüentemente empregado em revestimento protetor à corrosão, além de união

de latões, cobre, metais dissimilares - incluindo alguns ferrosos - e bronze de silício.

**ECuSnA e ECuSnC:** -A com 4-6%Sn e -C com 7-9%Sn, ambos contendo 0,05-0,35%P; dureza -A entre 70 e 85 HB e -C entre 85 e 100 HB (carga de 500 kg); opera em CCEP; produz uma poça de fusão pouco fluída e geralmente a soldagem somente é possível com alto pré-aquecimento do metal base; deve-se evitar a absorção de umidade pelo revestimento, sempre é necessário realizar ressecagem antes da soldagem; utilizado principalmente para soldagem do bronze; também empregados sobre latões, entre si e com aço carbono e ferro fundido e na produção de revestimentos protetores e reparos de fundidos.

**ECuNi:** 29-33%Ni e 1-2,5%Mn; dureza de 60 a 80 HB (carga de 500 kg); pode operar em todas as posições, nos diâmetros de 2,4 e 3,2 mm com CCEP; utilizado na soldagem de laminados ou fundidos de ligas cobre-níquel tipo 70/30, 80/20 e 90/10; geralmente não é realizado pré-aquecimento no metal base.

**ECuAl-A2:** 7-9%Al e 0,5-5%Fe; dureza de 130 a 150 HB (carga de 3000 kg); opera com CCEP e na posição plana; utilizado para soldagem de bronzes de alumínio de composição similar, de ligas cobre-zinco de alta resistência mecânica, de bronzes de silício, de bronzes de manganês, de algumas ligas de níquel, de diversas ligas ferrosas, de metais dissimilares e revestimento protetor de mancais.

**ECuAl-B:** 8-10%Al e 2,5-5%Fe; dureza de 140 a 180 HB (carga de 3000 kg); metal de solda apresenta maiores dureza, resistência à tração e limite de escoamento que o depositado pelo ECuAl-A2, porém de menor ductilidade; opera com CCEP na posição plana; utilizado no reparo de fundidos e revestimento protetor em mancais.

**ECuNiAl:** 4-6%Ni, além de manganês e ferro; dureza entre 160 e 200 HB (carga de 3000 kg); opera com CCEP e na posição plana; indicado para união ou reparo de laminados e fundidos de bronzes níquel-alumínio, revestimento protetor à corrosão, erosão e cavitação em águas levemente salgadas.

**ECuMnNiAl:** 1-2,5%Ni, 11-13%Mn, 5,5-7,5%Al, além de ferro; dureza entre 160 e 200 HB (carga de 3000 kg); opera com CCEP e posição plana; empregado na união ou reparo de fundidos e laminados de bronzes manganês-níquel-alumínio; revestimento protetor que requeira excelente resistência à corrosão, erosão e cavitação.

## 7.6 Eletrodos Revestidos para Ferro Fundido – A5.15

Esses eletrodos podem ser apresentados em quatro grupos:

### Primeiro Grupo - Ferro Fundido

A alma deste eletrodo revestido é de ferro fundido (3,5%C; 3%Si; 0,70%Mn; 0,60%P), sendo designado ECI (CI para *Cast Iron* – ferro fundido). A escória é relativamente fina, apesar do revestimento ser espesso. Dependendo do porte da peça pode ser necessário pré-aquecer a mesma entre 200 e 650 °C, com o propósito da dureza do depósito não ultrapassar 200 HB.

### Segundo Grupo - Ligas de Níquel

Com estes consumíveis, desde que seja pequena a diluição, as soldas realizadas sem pré-

aquecimento são usináveis. Uma única camada pode resultar em dureza tão alta quanto 350 HB, enquanto multicamadas devidamente controladas apresentam de 175 a 200 HB. Os seguintes eletrodos revestidos compõem esse grupo:

**ENi-CI:** alma de níquel puro; utilizado na reconstituição e reparo de fundidos e na união dos mesmos com outras ligas ferrosas e não-ferrosas; soldagem de união pode ser realizada sobre juntas não muito tensionadas, ou quando o metal de base apresentar baixo teor de fósforo; metal de solda apresenta relativamente baixa resistência e ductilidade, sendo este eletrodo somente empregado quando há necessidade de máxima usinabilidade, caso contrário, o eletrodo ENiFe-CI deve ser preferido.

**ENi-CI-A:** similar ao ENi-CI, porém possui maior teor de alumínio no revestimento (até 3%); enquanto este elemento pode melhorar as características da escória, o mesmo também reduz a ductilidade do metal de solda.

**ENiFe-CI:** alma de ferro-níquel; utilizado em situações similares ao ENi-CI, porém de menor custo; deve ser preferido na soldagem do ferro fundido nodular, do ferro fundido com teor de fósforo acima de 0,20%, em seções altamente estrangidas e do ferro fundido de alta resistência mecânica.

**ENiFe-CI-A:** similar ao ENiFe-CI, porém contendo alumínio no revestimento (até 3%); enquanto este elemento pode melhorar as características da escória, o mesmo também reduz a ductilidade do metal de solda.

**ENiFeMn-CI:** deposita um metal de solda com até 14% de manganês, o que pode ser benéfico para sua fluidez e propriedades mecânicas; indicado para união de ferro fundido nodular de alta resistência mecânica e como revestimento protetor ao desgaste.

**ENiCu-A e ENiCu-B:** -A pode conter até 45%Cu e -B até 35%Cu; devem ser empregados de modo a produzir pequena diluição, pois caso contrário se formam trincas no metal de solda; aplicações similares às recomendadas para o ENiFe-CI, ENiFe-CI-A e ENiFeMn-CI.

### Terceiro Grupo – Aço Carbono

Uma interessante característica da Norma AWS para este eletrodo revestido, é que a análise química requerida se refere à alma do eletrodo (e não do metal de solda depositado sem diluição, como em todos os outros casos), sendo a mesma de aço de baixos teores de carbono e silício. Por outro lado, o seu revestimento difere do empregado nos eletrodos para soldagem de aço carbono, principalmente considerando o relativamente baixo ponto de fusão que apresenta. O eletrodo pode operar em todas as posições, com CCEP ou CA e é geralmente empregado no reparo de pequenas trincas e falhas de fundidos. Os cordões devem ser curtos e bastante separados entre si, com um leve martelamento sendo aplicado imediatamente após o término de cada um. O pré-aquecimento somente deve ser utilizado quando for necessário prevenir o desenvolvimento excessivo de tensões em outras partes da peça. As soldas em uma única camada podem apresentar dureza tão elevada quanto 350 HB, tornando-as de difícil usinabilidade. Quando utilizado na soldagem de grandes descontinuidades, é recomendável o emprego de pinos que “ancorem” o metal de solda ao metal de base. Estes pinos devem ser enroscados numa profundidade mínima igual ao seu diâmetro (o qual varia geralmente entre 6 e 16 mm), projetando-se cerca de 5 mm acima da superfície a ser soldada e posicionados além da ZTA. A área total da seção transversal dos pinos deve se situar entre 25 e 35% da superfície que será soldada.

## Quarto Grupo – Ligas de Cobre

Os eletrodos revestidos mais utilizados na soldagem dos ferros fundidos são os ECuSn-A, ECuSn-C e ECuAl-A2, descritos anteriormente.

### 7.7 Eletrodos Revestidos para Revestimentos Protetores

Uma das mais inteligentes aplicações da engenharia da soldagem é o revestimento de superfícies com propriedades de resistência a específicos agentes, tais como, entre outros, desgaste por fricção; impacto; abrasão; erosão; cavitação e oxidação. Os consumíveis para revestimentos protetores podem ser empregados tanto na fabricação de novas peças, quanto no reparo e extensão da vida útil de componentes que já se encontram em serviço. Devido ao grande número de aplicações e necessidades diversas de proteção, esses eletrodos são agrupados por propriedades, as quais são as seguintes:

#### Aços Ferramenta

Disponíveis como EFe5-A, EFe5-B e EFe5-C, com teores decrescentes de carbono (0,7-1,0% na primeira classificação e 0,3-0,5% na última) e todos contendo tungstênio, cromo, molibdênio e vanádio. As propriedades do metal de solda destes eletrodos são similares entre si, com as classes -A e -B empregadas em corte e usinagem, visto que mantém o fio e quinas, enquanto o do tipo -C desempenha melhor as funções que requerem maior tenacidade e nos trabalhos a quente. Algumas típicas aplicações são: ferramenta de corte; lâminas de corte; matrizes; brochadeiras e guias. O depósito possui, ainda, as seguintes propriedades gerais: dureza à temperatura ambiente de 60 HRC, diminuindo para 47 HRC a 587 °C e cerca de 30 HRC a 642 °C; melhor resistência ao impacto como soldado, com significativo aumento da mesma após adequado revenimento; baixa resistência à oxidação, necessitando uma conveniente atmosfera quando sofrer tratamento térmico; alta resistência à corrosão atmosférica; oferece resistência à abrasão muito mais alta que a apresentada pelos aços carbono, mas ainda assim não é considerado um revestimento adequado para esse tipo de desgaste; alta resistência à deformação até a temperatura de 587 °C; alta resistência mecânica em até 587 °C; baixo coeficiente de fricção e elevada resistência ao desgaste metal-metal, especialmente em altas temperaturas.

#### Aços Austeníticos ao Manganês

O metal de solda depositado contém de 11 a 16% de manganês, sendo que adicionalmente o EFeMn-A possui entre 2,75 a 6,0% de níquel (exibindo maior alongamento) e o EFeMn-B de 0,6 a 1,4% de molibdênio (com maior limite de escoamento). Algumas características importantes do metal de solda depositado por estes eletrodos são: a sua microestrutura é composta principalmente por austenita quase saturada por carbono, sendo que a mesma não é completamente estável e, em temperaturas intermediárias, ou durante deformação, carbonetos de ferro e manganês serão precipitados; o EFeMn-A apresenta maior resistência à fragilização ao aquecimento até 425 °C que o EFeMn; a dureza do metal como soldado se encontra entre 170 e 230 HB, elevando-se para 450 a 550 HB após sofrer trabalho a frio; o reaquecimento prolongado acima de 250 °C pode causar fragilização, devido à precipitação de carbonetos e a resistência à oxidação e à corrosão é similar à dos aços carbono. Por estes motivos, este consumível não deve realizar trabalho a quente, sendo o mesmo próprio para aplicações envolvendo: altas tensões e impactos repetitivos em geral; impacto e desgaste metal-metal; moagem de rochas; trilhos de estrada de ferro, nos cruzamentos e desvios (EFeMn-B). Também por estes motivos o metal de solda deve resfriar rapidamente, e, caso o metal de base seja aço manganês, o mesmo deve

permanecer abaixo de 250°C numa distância de cerca de 50 mm do cordão pois, caso contrário, pode ocorrer precipitação de carbonetos. Além disso, o depósito não deve ser realizado diretamente sobre aços carbono ou de baixa liga, devido à possibilidade da formação de uma zona de transição de baixo manganês do tipo martensítica, extremamente frágil e que pode até provocar separação da solda quando em serviço. Neste caso, deve ser previamente realizado um revestimento (“amanteigamento”) sobre o metal base, empregando um aço inoxidável austenítico, por exemplo.

### **Ferro Fundido Austenítico de Alto Cromo**

O metal de solda depositado pelo eletrodo EFeCr-Al possui de 3 a 5%C e 26 a 32%Cr, além de alto manganês, molibdênio e silício. A maior aplicação do mesmo, é recobrir superfícies para resistir à erosão e abrasão em baixa tensão, tais como em: calhas de deslizamento de coque; guias de laminadores; componentes de jato de areia; peças de máquinas em olarias e peças de implementos agrícolas, notavelmente relha e arado, não sendo indicado onde ocorra impacto, como arar em solo rochoso. Algumas características do metal de solda são: a dureza à temperatura ambiente se encontra entre 52 a 60 HRC (dependendo do teor de carbono), decrescendo lentamente conforme aumenta a temperatura até 425-480 °C, sendo que neste ponto ocorre uma súbita aceleração na sua redução e a mesma toma-se sujeita à fluência; a resistência à oxidação até cerca de 980 °C é elevada; a resistência à corrosão não é alta, nem o mesmo é inoxidável, sendo bastante baixa em meio líquido, devido ao relativamente pequeno teor de cromo na matriz austenítica. O metal de solda não é comercialmente usinável, sendo muito difícil de ser retificado. A microestrutura do mesmo é composta de carbonetos duros (cerca de 2000 VPN) do tipo Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, dispersos numa matriz austenítica, a qual é estável quando o resfriamento é lento.

### **Ligas à Base de Cobalto**

São três os eletrodos classificados nessa categoria. O ECoCr-A apresenta o menor teor de carbono e tungstênio, com dureza na temperatura ambiente entre 23 e 47 HRC, dependendo da diluição do depósito. Esse consumível encontra aplicações onde são requeridas resistências ao calor; corrosão e oxidação, ou seja, tipicamente nos componentes em contato direto com exaustão de motores à explosão, ou em assentos de válvulas. Os metais de solda depositados pelos eletrodos ECoCr-B e ECoCr-C possuem, nessa ordem, maiores teores de carbono e tungstênio, exibindo dureza na temperatura ambiente entre 34 e 47 HRC e 43 a 58 HRC, respectivamente. Os mesmos são utilizados quando a resistência à abrasão e maior dureza são necessárias, porém apresentam menor tenacidade. De forma geral, o metal de solda depositado por estes eletrodos possui elevada resistência mecânica e dureza em altas temperaturas. Acima de 650 °C é considerado superior aos outros revestimentos pois, por exemplo, um depósito realizado pelo ECoCr-C apresenta dureza média de 49 HRC na temperatura ambiente; à 345 °C 41 HRC; à 565 °C 35 HRC, enquanto que à 650 °C ainda exhibe 29 HRC, retornando para seu valor original quando novamente na temperatura ambiente. Entre as temperaturas de 540 °C e 650 °C as vantagens são discutíveis e dependem da aplicação específica, sendo que abaixo de 540 °C geralmente outro tipo de revestimento pode ser o mais indicado.

### **Cobre e suas Ligas**

Estes eletrodos são utilizados em revestimentos de mancais e superfícies em geral, as quais devem ser resistentes à corrosão e ao desgaste. As seguintes classes se enquadram nesse grupo, além daquelas mencionadas nos itens anteriores: ECuAl-A2, para superfícies de sustentação e resistência à corrosão, com dureza entre 130 e 190 HB; ECuAl-B e ECuAl-C, para superfícies de

sustentação, com dureza entre 140 e 290 HB; ECuAl-D e ECuAl-E, para superfícies de sustentação e resistentes ao desgaste, com dureza entre 230 e 390 HB, tais como engrenagens, cames e roldanas; ECuSi, para superfícies resistentes à corrosão; ECuSn-A e ECuSn-C, para superfícies de sustentação que requerem baixa dureza; resistência à corrosão e, ocasionalmente, resistência ao desgaste. Estas ligas de cobre possuem as seguintes características gerais: não são recomendadas para uso em temperaturas relativamente elevadas, com a dureza sofrendo grande redução acima de 205 °C; a resistência ao impacto mais alta é a do ECuAl-A2, com esta propriedade decrescendo com o aumento do teor de alumínio; o ECuSi possui boa resistência ao impacto, mas não ao desgaste metal-metal; os depósitos do ECuSn-A e -C apresentam a menor resistência ao impacto; possuem, em geral, boa resistência à oxidação e à corrosão, mas não são recomendados para serviços com severa abrasão; em aplicações como mancais, uma pequena porosidade superficial é aceitável pois, por exemplo, certos depósitos de bronze possuem chumbo na sua composição, o qual propositadamente produz poros, os quais retêm óleo, promovendo lubrificação adicional.

### Ligas Níquel-Cromo-Boro

Os depósitos das três classes (ENiCr-A, -B e -C) apresentam boa resistência ao desgaste, à abrasão de baixa tensão, à corrosão e retém dureza em elevadas temperaturas. A resistência ao impacto que produz deformação plástica é baixa, pois tem como consequência trincas no depósito do ENiCr-C e prováveis trincas nas outras duas classes. Devido ao alto teor de níquel (maior do que 60%), estas ligas são resistentes à oxidação até cerca de 980 °C, mas há o perigo de ocorrer fusão incipiente próximo à esta temperatura e não é recomendável o emprego das mesmas acima de 945 °C. Em geral, os depósitos possuem alta resistência à corrosão, sendo excelente a sua resistência ao desgaste metal-metal.

### Eletrodo Compósito

Este consumível é geralmente composto por tubo de aço efervescente, com o interior preenchido por elementos de liga em pó e revestido exteriormente com fluxo. Raramente estes tubos são utilizados sem revestimento. As classes de interesse possuem carboneto de tungstênio, além das já apresentadas (EFe5-A; EFe5-B; EFe5-C; EFeMn-A; EFeMn-B; EFeCr-Al). As cinco classificações dependem da granulometria dos grãos do carboneto de tungstênio, sendo: EWC12/30; EWC-20/30; EWC-30/40; EWC-40 e EWC-40/120. Os depósitos realizados por estes eletrodos exibem as mais altas resistências à abrasão, entre todos aqueles obtidos por soldagem. São tipicamente empregados naquelas aplicações onde não é importante a rugosidade superficial, mas sim a resistência à abrasão, tais como em dentes de brocas de rochas, superfícies de desgaste em minas, equipamentos para escavação, entre outros. O depósito possui matriz com alto carbono e tungstênio (de alta dureza) a qual suporta grânulos de carbonetos de altíssima dureza. A microdureza de um depósito WC com 6,1%C possui 1880 Knoop ( $K_{100}$ ) no carboneto, matriz com 30 HRC (granulometria 40-60) depositada por arco elétrico e até 60 HRC, quando oxiacetileno com chama carburante é empregado. A dureza destes depósitos se mantém até a temperatura em tomo de 540 °C, reduzindo-se para 40 HRC à 640 °C. Estes depósitos não são comercialmente considerados usináveis, apresentando pequena resistência à oxidação e corrosão desgaste metal-metal.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.1/A5.1M: Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. Miami: AWS, 2020.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook: Welding Processes. 8. ed. Vol. 2. Miami: AWS, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12942:2007 – Consumíveis para soldagem – Classificação dos eletrodos revestidos para aço carbono e aço de baixa liga. Rio de Janeiro, 2007.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering. Vol. 6. Materials Park, Ohio: ASM International, 1993.

BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; SANTOS, V. R.; MONTEIRO, M. J.; RIZZO, F. C.; PACIORNIK, S.; REPPOLD, R.; DOMINGUES, J. R.; VIEIRA, L. A. Comparative study of commercial electrodes for underwater wet welding. Soldagem & Inspeção, v. 15, p. 325-335, 2010.

BRACARENSE, A. Q. Apostila e anotações de aula. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

ESAB. Catálogo técnico de produtos e consumíveis para soldagem. Disponível em: <<https://www.esab.com>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

FELIZARDO, I.; BRACARENSE, A. Q. Desenvolvimento de eletrodos revestidos do tipo baixo hidrogênio impermeáveis. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM – CONSOLDA, 2010, Recife. Anais [...]. São Paulo: ABS, 2010.

FELIZARDO, I.; VAZ, C. T.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P. Estudo da microestrutura e propriedades do metal de solda depositado por eletrodos revestidos impermeáveis do tipo baixo hidrogênio. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM – CONSOLDA, 2010, Recife. Anais [...]. São Paulo: ABS, 2010.

FELIZARDO, I. Apostila e anotações de aula. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

FELIZARDO, I. Estudo experimental e numérico do aquecimento de eletrodos revestidos durante a soldagem. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2003.

FRASCATI MANUAL. Guidelines for collecting and reporting data on research and experimental development. Paris: OECD Publishing, 2015.

INSTITUTO SENAI DE TECNOLOGIA EM SOLDAGEM. Materiais técnicos e apostilas sobre processos de soldagem. Belo Horizonte: SENAI, 2023.

LINCOLN ELECTRIC. Manual de soldagem. 2. ed. Cleveland: Lincoln Electric, 2022.

MACHADO, I. G. Soldagem e técnicas conexas: processos. Porto Alegre: [s.n.], 1996.

MARQUES, P. V. S.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Fundamentos da soldagem: processos e metalurgia. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

MODENESI, P. J. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. Osasco: SENAI, 2002. Vol. 1.

PESSOA, E. C. P.; LIU, S. The state of the art of underwater wet welding practice: Part 1. Welding Journal, v. 100, n. 4, p. 132S-141S, 2021.