



Apostila de

Eletrodos Revestidos



INTRODUÇÃO.....	3
SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODOS REVESTIDOS	5
ELETRODOS REVESTIDOS PARA A SOLDAGEM DE AÇOS CARBONO.....	6
ELETRODOS REVESTIDOS PARA A SOLDAGEM DE AÇOS DE BAIXA LIGA.....	18
ARMAZENAGEM, TRATAMENTO E MANUSEIO	27
EQUIPAMENTOS	30
BIBLIOGRAFIA	32

*Elaborado, traduzido (parte) e adaptado por
Cleber Fortes – Engenheiro Metalúrgico, M.Sc.
Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR
Revisado por
Cláudio Turani Vaz – Engenheiro Metalurgista, MSc.
Assistência Técnica – ESAB BR
Última revisão em 3 de fevereiro de 2005*

INTRODUÇÃO

Após muitas experiências com a novidade tecnológica da época, um inglês chamado Wilde obteve a primeira patente de soldagem por arco elétrico em 1865. Ele uniu com sucesso duas pequenas peças de ferro passando uma corrente elétrica através de ambas as peças e produzindo uma solda por fusão. Aproximadamente vinte anos depois, na Inglaterra, Nikolas Bernardos e Stanislav Olszewsky registraram a primeira patente de um processo de soldagem, baseado em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada, fundindo os metais à medida que o arco era manualmente passado sobre a junta a ser soldada.

Em 1890, N.G. Slavianoff (Rússia) e Charles Coffin (EUA) desenvolveram, independentemente, a soldagem com eletrodo metálico nu. Dessa forma, durante os anos seguintes, a soldagem por arco foi realizada com eletrodos nus, que eram consumidos na poça de fusão e tornavam-se parte do metal de solda. As soldas eram de baixa qualidade devido ao nitrogênio e ao oxigênio na atmosfera formando óxidos e nitretos prejudiciais no metal de solda. No

início do século XX, a importância da proteção ao arco contra os agentes atmosféricos foi percebida. Revestir o eletrodo com um material que se decompunha sob o calor do arco para formar uma proteção gasosa pareceu ser o melhor método para atingir esse objetivo. Como resultado, vários métodos de revestir os eletrodos, tais como acondicionamento e imersão, foram tentados.

Em 1904, Oscar Kjellberg, um engenheiro sueco, tinha um problema: ele precisava melhorar a qualidade dos trabalhos de reparo em navios e caldeiras em Gothenburg, o que resultou na invenção do primeiro eletrodo revestido, onde o revestimento era constituído, originalmente, de uma camada de material argiloso (cal), cuja função era facilitar a abertura do arco e aumentar sua estabilidade. Logo após, Oscar Kjellberg fundou a ESAB. Em 1907, Oscar Kjellberg patenteou o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido.

Esses esforços culminaram no eletrodo revestido extrudado em meados dos anos 1920, melhorando muito a qualidade do metal de solda e proporcionando aquilo que muitos consideram o mais significativo avanço na soldagem por arco elétrico.

A busca contínua do aumento da produtividade propiciou o desenvolvimento de novos processos de soldagem.

No entanto, ainda nos dias de hoje, é um processo muito empregado graças à sua grande versatilidade, ao baixo custo de operação, à simplicidade dos equipamentos necessários e à possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou sujeitos a ventos.

As desvantagens do processo são a baixa produtividade, os cuidados especiais que são necessários no tratamento e manuseio dos eletrodos revestidos e o grande volume de gases e fumos gerados durante a soldagem.

Mesmo assim, ainda continua a ser um processo de soldagem empregado na fabricação e montagem de equipamentos, na área de manutenção e reparos, em construções no campo, na soldagem por gravidade em estaleiros e de modo mais abrangente, na soldagem em geral de chapas de espessura variando de 3 mm a 40 mm.

SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODOS REVESTIDOS

Definição

“Soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição” (*American Welding Society - AWS*).

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico, é o mais largamente empregado dos vários processos de soldagem. A soldagem é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho (veja a Figura 1). O calor produzido pelo arco funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação. Outras funções do revestimento são proporcionar estabilidade ao arco e controlar a forma do cordão de solda.

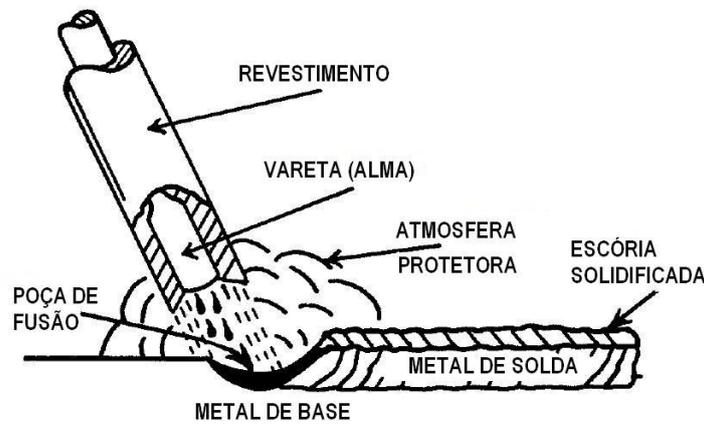


Figura 1 - Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

Capítulo 2

ELETRODOS REVESTIDOS PARA A SOLDAGEM DE AÇOS CARBONO

A fabricação de eletrodos revestidos

Eletrodos revestidos para aços carbono consistem de apenas dois elementos principais: a alma metálica, normalmente de aço de baixo carbono, e o revestimento. A alma metálica contém alguns elementos residuais, porém os teores de fósforo e enxofre devem ser muito baixos para evitar fragilização no metal de solda. A matériaprima para a alma metálica é um fio-máquina laminado a quente na forma de bobinas, que é posteriormente trefilado a frio até o diâmetro adequado do eletrodo, retificado e cortado no comprimento adequado. A alma metálica tem as funções principais de conduzir a corrente elétrica e fornecer metal de adição para a junta.

Os ingredientes do revestimento, dos quais existem literalmente centenas para escolher, são cuidadosamente pesados, misturados a seco — mistura seca — e então é adicionado o silicato de sódio e/ou potássio — mistura úmida — que é compactada em um cilindro e alimentada à prensa extrusora. O revestimento é extrudado sobre as varetas metálicas que são alimentadas através da prensa extrusora a uma velocidade muito alta. O revestimento é removido da extremidade do eletrodo — a ponta de pega — para garantir o contato elétrico, e também da outra extremidade para assegurar uma abertura de arco fácil.

Os eletrodos são então identificados com a marca comercial e sua classificação antes de entrar no forno de secagem, onde eles sofrem um ciclo controlado de aquecimento para assegurar o teor adequado de umidade antes de embalá-los.

Uma das muitas verificações de qualidade feitas durante o processo de fabricação — e também uma das mais importantes — é o procedimento que garante que a espessura do revestimento e a concentricidade da alma do eletrodo sejam uniformes. Na soldagem manual com eletrodos revestidos, a cratera do revestimento, ou a formação de uma taça na ponta do revestimento, que se estende além da alma metálica, realiza a função de concentrar e dirigir o arco (veja a Figura 2).



Figura 2 - Efeito da concentricidade do revestimento.

A concentração e a direção do fluxo do arco é conseguida obtendo-se uma cratera no revestimento algo parecida com o bico de uma mangueira d'água, dirigindo o fluxo do metal de solda. Quando o revestimento não estiver concêntrico com a alma metálica, pode causar a condição **B** da Figura 2. A má direção do arco ocasiona cordões de solda inconsistentes, proteção

deficiente e falta de penetração. O eletrodo queima de modo irregular, deixando uma projeção no lado onde o revestimento é mais espesso. Essa condição é conhecida como unha.

Funções dos revestimentos dos eletrodos

Os ingredientes que são usualmente empregados nos revestimentos podem ser classificados fisicamente, grosso modo, como líquidos e sólidos. Os líquidos são geralmente o silicato de sódio e o silicato de potássio. Os sólidos são pós ou materiais granulados que podem ser encontrados livres na natureza, e necessitam apenas de concentração e redução de tamanho até o tamanho de partícula adequado. Outros materiais sólidos empregados são produzidos como resultado de reações químicas, tais como ligas ou outros compostos sintéticos complexos. O tamanho da partícula do material sólido é um fator importante.

A estrutura física dos ingredientes do revestimento pode ser classificada como cristalina, fibrosa ou amorfa (não-cristalina). Materiais cristalinos como rutilo, quartzo e mica são comumente utilizados. O rutilo é a ocorrência natural do mineral dióxido de titânio (TiO₂), e é largamente empregado no revestimento dos eletrodos. Materiais fibrosos como celulose, e materiais amorfos como sílica e outros compostos orgânicos são também ingredientes comuns dos revestimentos.

As funções do revestimento são:

- **proteção do metal de solda** - a função mais importante do revestimento é proteger o metal de solda do oxigênio e do nitrogênio do ar quando ele está sendo transferido através do arco, e enquanto está no estado líquido. A proteção é necessária para garantir que o metal de solda seja íntegro, livre de bolhas de gás, e tenha a resistência e a ductilidade adequadas. Às altas temperaturas do arco, o nitrogênio e o oxigênio prontamente se combinam com o ferro e formam nitretos de ferro e óxidos de ferro que, se presentes no metal de solda acima de certos valores mínimos, causarão fragilidade e porosidade. O nitrogênio é o mais relevante, visto que é difícil controlar seu efeito uma vez que ele tenha entrado no depósito de solda. O oxigênio pode ser removido com o uso de desoxidantes adequados. Para evitar a contaminação da atmosfera o fluxo de metal fundido precisa ser protegido por gases que expulsem a atmosfera circundante do arco e do metal de solda fundido. Isso é conseguido usando-se no revestimento materiais que gerem gases e que se decomponham durante as atividades de soldagem e produzam a atmosfera protetora.
- **estabilização do arco** - um arco estabilizado é aquele que abre facilmente, queima suavemente mesmo a baixas correntes e pode ser mantido empregando-se indiferentemente um arco longo ou um curto.
- **adições de elementos de liga ao metal de solda** - uma variedade de elementos tais como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e cobre podem ser adicionados ao metal de solda incluindo-os na composição do revestimento. É frequentemente necessário adicionar elementos de liga ao revestimento para balancear a perda esperada desses elementos da vareta durante a atividade de soldagem devido à volatilização e às reações químicas. Eletrodos de aço doce requerem pequenas quantidades de carbono, manganês e silício no depósito de solda para resultar em soldas íntegras com o nível desejado de resistência. Uma parte do carbono e do manganês provém da vareta, mas é necessário suplementá-la com ligas ferro-manganês e em alguns casos com adições de ligas ferro-silício no revestimento.
- **direcionamento do arco elétrico** - o direcionamento do fluxo do arco elétrico é obtido com a cratera que se forma na ponta dos eletrodos (veja a Figura 2a). O uso de aglomerantes adequados assegura um revestimento consistente que manterá a cratera e dará uma penetração adicional e melhor direcionamento do arco elétrico.
- **função da escória como agente fluxante** - a função da escória é (1) fornecer proteção adicional contra os contaminantes atmosféricos, (2) agir como purificadora e absorver impurezas que são levadas à superfície e ficam aprisionadas pela escória, e (3) reduzir a velocidade de resfriamento do metal fundido para permitir o escape de gases. A escória também controla o contorno, a uniformidade e a aparência geral do cordão de solda. Isso é particularmente importante nas juntas em ângulo.
- **características da posição de soldagem** - é a adição de certos ingredientes no revestimento, principalmente compostos de titânio, que tornam possível a soldagem fora de

posição (posições vertical e sobrecabeça). As características da escória — principalmente a tensão superficial e a temperatura de solidificação — determinam fortemente a capacidade de um eletrodo ser empregado na soldagem fora de posição.

- **controle da integridade do metal de solda** - a porosidade ou os gases aprisionados no metal de solda podem ser controlados de uma maneira geral pela composição do revestimento. É o balanço de certos ingredientes no revestimento que tem um efeito marcante na presença de gases aprisionados no metal de solda. O balanço adequado desses ingredientes é crítico para a integridade que pode ser obtida para o metal de solda. O ferromanganês é provavelmente o ingrediente mais comum utilizado para se conseguir a fórmula corretamente balanceada.
- **propriedades mecânicas específicas do metal de solda** - propriedades mecânicas específicas podem ser incorporadas ao metal de solda por meio do revestimento. Altos valores de impacto a baixas temperaturas, alta ductilidade, e o aumento nas propriedades de escoamento e resistência mecânica podem ser obtidos pelas adições de elementos de liga ao revestimento.
- **isolamento da alma de aço** - o revestimento atua como um isolante de tal modo que a alma não causará curto-circuito durante a soldagem de chanfros profundos ou de aberturas estreitas; o revestimento também serve como proteção para o operador quando os eletrodos são trocados.

Classificação dos ingredientes do revestimento

Os materiais do revestimento podem ser classificados em seis grupos principais:

- **elementos de liga** - elementos de liga como molibdênio, cromo, níquel, manganês e outros conferem propriedades mecânicas específicas ao metal de solda.
- **aglomerantes** - silicatos solúveis como os de sódio e potássio são empregados no revestimento dos eletrodos como aglomerantes. As funções dos aglomerantes são formar uma massa plástica de material de revestimento capaz de ser extrudada e secada no forno. O revestimento final após a passagem no forno deve apresentar uma dureza tal que mantenha uma cratera e tenha resistência suficiente para não se fragmentar, trincar ou lascar. Aglomerantes também são utilizados para tornar o revestimento não inflamável e evitar decomposição prematura.
- **formadores de gases** - materiais formadores de gases comuns são os carboidratos, hidratos e carbonatos. Exemplos dessas substâncias são a celulose, os carbonatos de cálcio e de magnésio, e a água quimicamente combinada como a encontrada na argila e na mica. Esses materiais desprendem dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e vapor d'água (H₂O) às altas temperaturas do arco de soldagem. A umidade livre também é outro ingrediente formador de gases que é encontrado particularmente nos eletrodos do tipo celulósico e faz parte da formulação em quantidades de 2 - 3%. Ela apresenta uma influência marcante no arco e é um ingrediente necessário no eletrodo do tipo E6010.
- **estabilizadores do arco** - o ar não é suficientemente condutor para manter um arco estável, e então se torna necessário adicionar ao revestimento ingredientes que proporcionarão um caminho condutor para a corrente elétrica. Isso é particularmente verdadeiro durante a soldagem com corrente alternada. Materiais estabilizantes são os compostos de titânio, potássio e cálcio.
- **formadores de fluxo e escória** - esses ingredientes são empregados principalmente para encorpar a escória e conferir propriedades como viscosidade, tensão superficial e ponto de fusão. A sílica e a magnetita são materiais desse tipo.
- **plasticizantes** - os revestimentos são frequentemente granulados e, para extrudá-los com sucesso, é necessário adicionar materiais lubrificantes e plasticizantes para fazer com que o revestimento flua suavemente sob pressão. Os carbonatos de cálcio e de sódio são os mais utilizados.

A Tabela I mostra alguns constituintes típicos dos revestimentos e suas funções para dois tipos de eletrodos para aços carbono. Observe que o teor de umidade no eletrodo celulósico E6010 é

muito maior que o do tipo de baixo hidrogênio E7018. A umidade no revestimento do eletrodo E6010 é necessária para produzir as características de atuação do arco e não é prejudicial na soldagem de aços de baixa resistência, visto que a agitação promovida na poça de fusão é muito intensa e permite a liberação de boa parte do hidrogênio. O hidrogênio pode causar problemas na soldagem de aços de alta resistência.

Classe	Composição		Função	Proteção
E6010	celulose (C6H10O5)	35%	formador de gases	40% H ₂ 40% CO + CO ₂ 20% H ₂ O
	rutilo (TiO ₂)	15%	formador de escória -estabilizador do arco	
	ferro-manganês	5%	desoxidante - ferro-liga	
	talco	15%	formador de escória	
	silicato de sódio	25%	aglomerante – agente fluxante	
	umidade	5%		
E7018	carbonato de cálcio	30%	formador de gases – agente fluxante	80% CO 20% CO ₂
	fluorita (CaF ₂)	20%	formador de escória - agente fluxante	
	ferro-manganês	5%	desoxidante - ferro-liga	
	silicato de potássio	15%	aglomerante -estabilizador do arco	
	pó de ferro	30%	agente de deposição	
	umidade	0,1%		

Tabela I - Composição e função dos constituintes do revestimento dos eletrodos.

Tipos de revestimento

Celulósico - O revestimento celulósico apresenta as seguintes características:

- elevada produção de gases resultantes da combustão dos materiais orgânicos (principalmente a celulose);
- principais gases gerados: CO₂, CO, H₂, H₂O (vapor);
- não devem ser ressecados;
- a atmosfera redutora formada protege o metal fundido;
- o alto nível de hidrogênio no metal de solda depositado impede o uso em estruturas muito restritas ou em materiais sujeitos a trincas por hidrogênio;
- alta penetração;
- pouca escória, facilmente destacável;
- muito utilizado em tubulações na progressão descendente;
- operando em CC+, obtém-se transferência por spray.

Rutilico - O revestimento rutilico apresenta as seguintes características:

- consumível de uso geral;
- revestimento apresenta até 50% de rutilo (TiO₂);
- média penetração;
- escória de rápida solidificação, facilmente destacável;
- o metal de solda pode apresentar um nível de hidrogênio alto (até 30 ml/100g);
- requer ressecagem a uma temperatura relativamente baixa, para que o metal de solda não apresente porosidades grosseiras.

Básico - O revestimento básico apresenta as seguintes características:

- geralmente apresenta as melhores propriedades mecânicometalúrgicas entre todos os eletrodos, destacando-se a tenacidade;
- elevados teores de carbonato de cálcio e fluorita, gerando um metal de solda altamente desoxidado e com muito baixo nível de inclusões complexas de sulfetos e fosfetos;
- não opera bem em CA, quando o teor de fluorita é muito elevado;
- escória fluida e facilmente destacável;
- cordão de média penetração e perfil plano ou convexo;
- requer ressecagem a temperaturas relativamente altas;
- após algumas horas de contato com a atmosfera, requer ressecagem por ser altamente higroscópico;

Altíssimo rendimento - O revestimento altíssimo rendimento apresenta as seguintes características:

- adição de pó de ferro (rutílico/básico);
- aumenta a taxa de deposição;
- pode ou não ser ligado;
- aumenta a fluidez da escória, devido à formação de óxido de ferro;
- melhora a estabilidade do arco e a penetração é reduzida, principalmente com alta intensidade de corrente, o que pode minimizar a ocorrência de mordeduras;
- possibilidade de soldar por gravidade (arraste);
- reduz a tenacidade do metal de solda.

Os eletrodos de altíssimo rendimento possuem uma aplicação com altas taxas de deposição, que é a soldagem por gravidade em estaleiros navais com o dispositivo (tripé) mostrado na Figura 3.

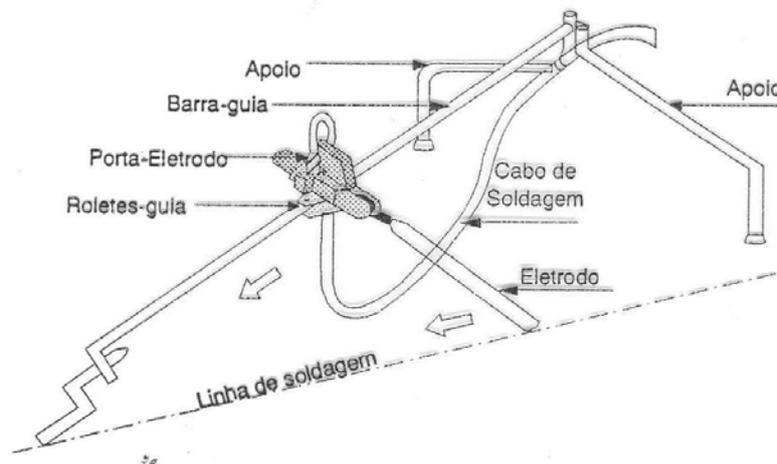


Figura 3 - Equipamento para soldagem por gravidade do eletrodo OK 33.80.

A especificação AWS A5.1

Essa especificação da *American Welding Society (AWS)* foi desenvolvida ao longo dos anos por um comitê composto de membros que representam os fabricantes de consumíveis, como a ESAB, usuários da indústria de soldagem e membros independentes de universidades e laboratórios. Essa equipe equilibrada é necessária para evitar tendências nas especificações.

Os eletrodos para aços carbono são classificados pelos fabricantes de consumíveis, em conformidade com a especificação acima, com base nas propriedades mecânicas (também conhecidas como propriedades físicas) do metal de solda, no tipo de revestimento, na posição de soldagem, e no tipo de corrente (CA ou CC). O sistema de classificação é elaborado para fornecer certas informações sobre o eletrodo e o metal de solda depositado. O significado das designações da AWS é mostrado na Figura 4 e na Tabela II.

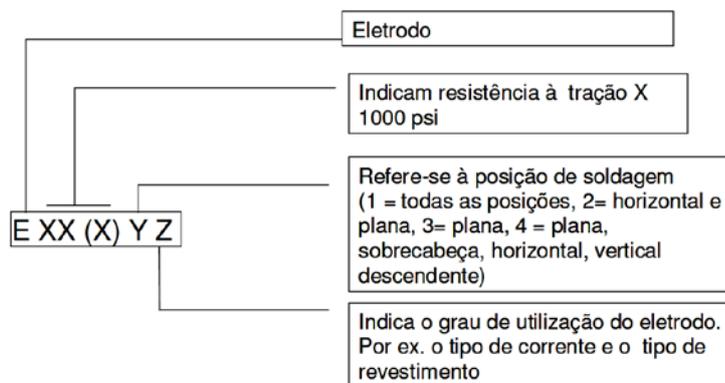


Figura 4 - Classificação de eletrodos revestidos para aços carbono.

Classe	Corrente	Arco	Penetração	Revestimento-escória	Pó de ferro
EXX10	CC+	agressivo	profunda	celulósico-sódio	0-10%
EXX11	CA/CC+	agressivo	profunda	celulósico-potássio	0
EXX12	CA/CC-	médio	média	rutílico - sódio	0-10%
EXX13	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutílico - potássio	0-10%
EXX14	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutílico - pó de ferro	25-40%
EXX15	CC+	médio	média	baixo hidrogênio - sódio	0
EXX16	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - potássio	0
EXX18	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	25-40%
EXX20	CA/CC-	médio	média	óxido de ferro - sódio	0
EXX22	CA/CC-/CC+	médio	média	óxido de ferro - sódio	0
EXX24	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutílico - pó de ferro	50%
EXX27	CA/CC-/CC+	médio	média	óxido de ferro - pó de ferro	50%
EXX28	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	50%
EXX48	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	25-40%

O percentual de pó de ferro é baseado na massa do revestimento

Tabela II - Classificação dos eletrodos para aços carbono.

Essas classificações — em conformidade com a especificação AWS A5.1 — são determinadas pelo fabricante de eletrodos de acordo com os resultados dos testes. A American Welding Society não aprova nem reprova eletrodos.

A *American Society of Mechanical Engineers (ASME)* utiliza na íntegra as especificações de eletrodos da AWS adicionando as letras *SF* antes do número da especificação. Então, a

especificação AWS A5.1 transforma-se na especificação ASME SFA5.1. Tanto a classificação quanto os requisitos são os mesmos.

Composição química do metal de solda (AWS A5.1)

A Tabela III mostra os requisitos químicos para eletrodos revestidos aplicáveis aos aços carbono.

Classe	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Mn+Ni+Cr+Mo+V
E6010	-	-	-	-	-	-	
E6011	-	-	-	-	-	-	
E6012	-	-	-	-	-	-	
E6013	-	-	-	-	-	-	
E6020	-	-	-	-	-	-	
E6022	-	-	-	-	-	-	
E6027	-	-	-	-	-	-	
E7014	≤1,25	≤1,90	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,50
E7015	≤1,25	≤1,90	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,50
E7016	≤1,60	≤0,75	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,75
E7018	≤1,60	≤0,75	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,75
E7024	≤1,25	≤0,90	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,50
E7027	≤1,60	≤0,75	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,75
E7028	≤1,60	≤0,90	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,75
E7048	≤1,60	≤0,90	≤0,30	≤0,20	≤0,30	≤0,08	≤1,75

Tabela II - Classificação dos eletrodos para aços carbono.

Propriedades mecânicas (AWS A5.1)

Os ensaios mecânicos (ou físicos) de metal depositado são realizados em todos os corpos de prova na condição como *soldado*. Isso significa que a solda ou o metal de solda não fica sujeito a qualquer tipo de tratamento térmico. Corpos de prova de tração para todas as classificações de eletrodos exceto os de baixo hidrogênio (E7015, E7016, E7018, E7028 e E7048) são envelhecidos na faixa de 95°C a 105°C por 48 horas antes do ensaio de tração. Isso não é considerado um tratamento térmico, pois simplesmente acelera a difusão do hidrogênio do metal de solda nos eletrodos do tipo celulósico ou rutilico.

A Tabela IV mostra as propriedades mecânicas para os eletrodos revestidos aplicáveis aos aços carbono.

Classe	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)	Ch V média (J)	Ch V indiv. (J)	Temp (°C)
E6010	≥331	≥414	≥22	≥27	≥20	-29 °C
E6011	≥331	≥414	≥22	≥27	≥20	-29 °C
E6012	≥331	≥414	≥17	-	-	-
E6013	≥331	≥414	≥17	-	-	-
E6020	≥331	≥414	≥22	-	-	-
E6022	-	≥414	-	-	-	-
E6027	≥331	≥414	≥22	≥27	≥20	-29 °C
E7014	≥399	≥482	≥17	-	-	-
E7015	≥399	≥482	≥22	≥27	≥20	-29 °C
E7016	≥399	≥482	≥22	≥27	≥20	-29 °C
E7018	≥399	≥482	≥22	≥27	≥20	-29 °C
E7024	≥399	≥482	≥17	-	-	-
E7028	≥399	≥482	≥22	≥27	≥20	-18 °C
E7048	≥399	≥482	≥22	≥27	≥20	-29 °C

Tabela IV - Propriedades mecânicas dos eletrodos revestidos para aços carbono.

Características individuais dos eletrodos revestidos

- **eletrodos E6010** foram originalmente desenvolvidos para proporcionar uma atividade de soldagem e um metal de solda melhor. O revestimento é, predominantemente, uma pasta de celulose modificada com silicatos minerais, desoxidantes e silicato de sódio. A quantidade de revestimento desses eletrodos é pequena, cerca de 10-12% em peso. Como a massa de celulose se queima durante a soldagem, a escória é mínima e é normalmente de fácil remoção. O arco tem uma penetração profunda e, com manipulação adequada do arco, cordões de solda de boa qualidade podem ser depositados em todas as posições. A maioria dos navios construídos nos Estados Unidos durante a II Guerra Mundial foi soldada com esses eletrodos. Formulações especiais deles são empregadas na soldagem de dutos na progressão descendente. Soldas razoavelmente íntegras podem ser executadas em juntas de topo com abertura de raiz utilizando esses eletrodos.
- **eletrodos E6011** são similares aos E6010 exceto que compostos de potássio em quantidade suficiente são adicionados ao revestimento para estabilizar o arco e permitir que o eletrodo seja utilizado com corrente alternada. A penetração é ligeiramente menor que a do eletrodo E6010.
- **eletrodos E6012** possuem vários nomes comuns. Na Europa são chamados de eletrodos rútilicos. O revestimento contém grandes quantidades do mineral rutilo (dióxido de titânio, TiO₂). O arco possui baixa penetração, e com manipulação adequada podem ser fechadas grandes aberturas de raiz. Embora a especificação permita a soldagem com CA ou CC, o arco é mais suave e a quantidade de respingos é menor quando é empregada corrente contínua.
- **eletrodos E6013** também contêm um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo - TiO₂) em seu revestimento. Eles são projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que metais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça. O revestimento contém compostos de potássio suficientes para estabilizar o arco na soldagem com corrente alternada (CA).
- **eletrodos E7014** são parecidos com os eletrodos E6013, exceto que foi adicionado o pó de ferro e é aplicado à alma do eletrodo um revestimento mais espesso. Isso resulta em taxas de deposição mais altas com o eletrodo E7024 que com o E6013.
- **eletrodos E7015** foram os primeiros eletrodos de baixo hidrogênio. Eles foram desenvolvidos na década de 1940 para soldar aços temperáveis. Todos os eletrodos previamente analisados têm quantidades consideráveis de hidrogênio em seus revestimentos na forma de água ou de hidrogênio quimicamente combinado em compostos químicos. Quando um aço temperável é soldado com qualquer eletrodo que contenha quantidades consideráveis de hidrogênio ocorre normalmente fissuração a frio. Essas trincas aparecem no metal de base bem abaixo do cordão de solda e paralelas a ele. O calcário e outros ingredientes que são baixos em umidade são empregados no revestimento, eliminando esse hidrogênio que induz à fissuração (trincas ou fissuração induzida pelo hidrogênio — hydrogen induced cracking — HIC). O revestimento é do tipo baixo hidrogênio à base de sódio, o que limita o uso desses eletrodos somente a CC+. Os eletrodos E7015 não estão mais disponíveis no mercado de uma maneira geral, tendo sido substituídos pelos tipos E7016 e E7018.
- **eletrodos E7016** são bem similares ao tipo E7015, exceto que o uso do potássio no

revestimento permite que esses eletrodos possam ser empregados tanto com CA como com CC+.

- **eletrodos E7018** são a versão mais moderna do eletrodo de baixo hidrogênio. A adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento resulta num arco mais suave e com menos respingos. Esse moderno balanço de ingredientes do revestimento resulta numa grande melhoria na estabilidade do arco, na direção do arco e na facilidade de manuseio em todas as posições.
- **eletrodos E6020** possuem um revestimento que consiste principalmente em óxido de ferro, compostos de manganês e sílica. Eles produzem um arco do tipo spray e uma escória pesada que proporciona proteção extra ao metal de solda fundido, que é muito fluido, limitando seu uso às juntas em ângulo nas posições plana ou horizontal.
- **eletrodos E6022** servem para a soldagem de chapas finas sob altas correntes e altas velocidades de soldagem. Não estão mais disponíveis de uma maneira geral.
- **eletrodos E7024** possuem um revestimento similar aos tipos E6012 e E6013, porém apresentam um revestimento muito pesado que contém 50% de pó de ferro em peso. Sob correntes relativamente altas apresenta altas taxas de deposição. As soldas são limitadas às posições plana e horizontal em ângulo. A penetração é relativamente baixa. Podem ser empregadas as correntes de soldagem CA, CC+ e CC-.
- **eletrodos E6027** são também do tipo de alto teor de pó de ferro, consistindo o revestimento de 50% de pó de ferro em peso. As correntes de soldagem podem ser CA, CC+ ou CC-. A penetração é média e os cordões de solda são levemente côncavos com boa fusão nas paredes laterais do chanfro. Como em todos os eletrodos de alto teor de pó de ferro, a taxa de deposição desses eletrodos é alta.
- **eletrodos E7028** são bem semelhantes os do tipo E7018, exceto que o revestimento é mais pesado e contém 50% em peso de pó de ferro. Diferentemente dos eletrodos E7018, são adequados apenas às posições plana e horizontal em ângulo. A taxa de deposição é muito alta.
- **eletrodos E7048** são bem similares aos do tipo E7018, exceto que são desenvolvidos para condições de soldagem excepcionalmente boas na progressão vertical descendente.

Seleção do eletrodo adequado para aços carbono

Muitos fatores devem ser considerados quando se seleciona o eletrodo adequado para uma determinada aplicação. Alguns itens a serem considerados são:

- **tipo do metal de base** - a soldagem de aços carbono ou aços de baixo carbono (teor de carbono inferior a 0,30%) com eletrodos revestidos de alma de aço doce não apresenta problemas na medida em que a resistência à tração do metal de solda normalmente excede a resistência à tração do metal de base. No entanto, a composição química do metal de base também é importante. Soldas realizadas em aços de usinagem fácil que tenham um teor relativamente alto de enxofre serão porosas a menos que sejam feitas com um eletrodo de baixo hidrogênio como o E7018. Algumas vezes são encontrados aços fora de faixa ou aços carbono de composição química duvidosa. Nesses casos a melhor escolha seria um eletrodo revestido de baixo hidrogênio.
- **posição de soldagem** - a posição de soldagem determinará se será empregado um eletrodo para soldagem em todas as posições ou outro para posições plana e horizontal. Correntes de soldagem mais altas e, portanto, maiores taxas de deposição são possíveis durante a soldagem nas posições plana ou horizontal. Sempre que possível, a peça deve ser posicionada levando-se em consideração a facilidade de soldagem a maior velocidade

de soldagem.

- **equipamento disponível** - a escolha do eletrodo dependerá dos equipamentos CA ou CC disponíveis. Se ambos os equipamentos estiverem disponíveis, considere os seguintes fatos gerais:
 - para uma penetração mais profunda empregue CC+
 - para uma penetração menos profunda e maior taxa de deposição empregue CC-
 - para ficar livre de sopro magnético aplique CA
- **espessura da chapa** - durante a soldagem de chapas finas devem ser empregados eletrodos de baixa penetração. Chapas mais espessas podem necessitar de um eletrodo com penetração profunda. Muitas chapas grossas podem necessitar de eletrodos de penetração profunda para o passe de raiz, e de um eletrodo de mais alta taxa de deposição para os passes subseqüentes.
- **montagem** - alguns eletrodos são mais adequados que outros no fechamento de aberturas das peças a serem soldadas. Alguns fabricantes de eletrodos produzem consumíveis especialmente formulados para montagens deficientes.
- **custos da soldagem** - os principais fatores que afetam os custos da soldagem são a mão de obra e indiretos, a taxa de deposição, a eficiência de deposição e o custo dos eletrodos.

Usos típicos dos eletrodos pela sua classificação

Os eletrodos de classificação **E6010** e **E6011** deveriam ser preferencialmente usados na soldagem de juntas de aço doce na posição vertical com abertura de raiz. Se houver apenas fontes CA (transformadores) disponíveis a escolha deve recair no eletrodo tipo E6011. Muitas vezes é encontrado sopro magnético quando se solda com CC. O emprego de eletrodos E6011 com CA elimina o sopro magnético.

Os eletrodos de classificação **E6012** ainda são muito utilizados nos dias atuais em reparos e na soldagem de estruturas menos críticas. Aços carbono apresentando alguma oxidação podem ser soldados com esse tipo de eletrodo. Pode também ser empregado no fechamento de grandes aberturas. O uso desse eletrodo, contudo, diminuiu consideravelmente nos últimos anos. Antes da chegada dos eletrodos de baixo hidrogênio e de outros processos de soldagem o eletrodo E6012 constituía 60% da produção total de eletrodos.

Os eletrodos de classificação **E6013** foram originalmente desenvolvidos para apresentar baixa penetração e cordões de solda planos. Essas características permitiram a soldagem de chapas finas com esses eletrodos. Hoje em dia muitos eletrodos E6013 são empregados no lugar de eletrodos E6012 graças ao arco mais suave, menos respingos e superfície mais uniforme do cordão.

Os eletrodos de classificação **E7014**, como indicado anteriormente, possuem pó de ferro adicionado à formulação do revestimento dos eletrodos E6013. Essa adição permite que o eletrodo seja soldado sob altas correntes de soldagem, resultando em taxa e eficiência de deposição mais alta. As aplicações do eletrodo E7014 são semelhantes às do eletrodo E6013.

Os eletrodos de classificação **E7016** são, como já foi indicado anteriormente, básicos de baixo hidrogênio. Essa combinação de características permite que esse eletrodo seja utilizado para soldar alguns aços de maior teor de carbono e também alguns aços de baixa liga. Esse eletrodo tem sido menos consumido por causa de sua taxa de deposição mais baixa e também menor eficiência de deposição em relação ao eletrodo do tipo E7018.

Os eletrodos de classificação **E7018** são de baixo hidrogênio com adição de pó de ferro. A quantidade considerável de pó de ferro no revestimento e também uma quantidade de revestimento bem maior permitem que esses eletrodos sejam aplicados sob correntes de soldagem mais altas que as empregadas com os eletrodos E7016. O arco mais suave e a facilidade de soldagem do eletrodo E7018 tornam-no o favorito dos soldadores. Correntes de soldagem relativamente mais altas e adições de pó de ferro fundindo no metal de solda resultam em maiores taxas e eficiências de deposição. O eletrodo básico E7018 deposita o metal de solda de melhor qualidade para a soldagem de aços de baixo carbono. Sua maior desvantagem é que ele precisa ser mantido seco.

Eletrodos que absorveram umidade devido à exposição à atmosfera ou a outras fontes de umidade depositam metal de solda com porosidade. Além disso, os eletrodos E7018 não devem ser aplicados na soldagem de passes de raiz em juntas de topo com abertura para não se correr o risco de porosidade excessiva. Quando os eletrodos E7018 tiverem que ser empregados em passes de raiz de juntas de topo, a raiz deve ser selada por um cobre-juntas.

Os eletrodos de classificação **E7024** recebem grande quantidade de pó de ferro em seu revestimento (aproximadamente 50%). Dessa combinação de mais pó de ferro no revestimento resultam altíssimas taxas de deposição e eficiências de deposição. Esses eletrodos estão limitados às posições plana e horizontal em ângulo. A qualidade do metal de solda depositado por esses eletrodos não é tão boa quanto a dos eletrodos E7018 (por exemplo, a ductilidade do metal de solda depositado por um eletrodo E7024 é menor que a do E7018 (veja a Figura 5).

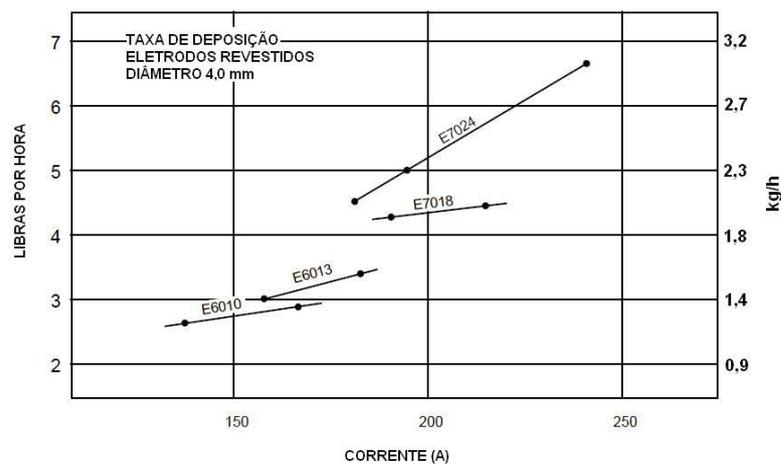


Figura 5 - Taxa de deposição de eletrodos revestidos de diâmetro 4,0 mm.

Taxas de deposição de eletrodos

A *taxa de deposição* de um determinado eletrodo revestido influencia substancialmente o custo total do metal de solda depositado. A taxa de deposição é a massa de metal de solda depositado por unidade de tempo (de arco aberto). Ela aumenta com a corrente de soldagem dentro dos limites de um determinado eletrodo. Como foi mostrado na Figura 5, um eletrodo E7024 de diâmetro 4,0 mm pode depositar mais que o dobro que um eletrodo E6010. É fácil de ver que pode ser alcançada uma economia sensível de mão de obra e custos indiretos se puder ser empregado um dos eletrodos de maior taxa de deposição.

A *eficiência de deposição* de um determinado eletrodo revestido também tem seu efeito nos custos da soldagem. Ela representa a massa de metal de solda depositado comparada com a massa total de eletrodo consumido e é expressa por um percentual (veja a Equação [1], a Tabela V e a Tabela VI).

$$[1] \quad \text{Eficiência de deposição (\%)} = \frac{\text{Massa do metal depositado}}{\text{Massa total do eletrodo}} \times 100$$

Na soldagem com eletrodos revestidos parte da massa do eletrodo é perdida como escória, respingos, fumos, gases e pontas. Se um eletrodo apresenta 65% de eficiência de deposição, isso significa que, para cada 100 g de eletrodo consumido, serão produzidos 65 g de metal depositado. A perda com pontas — a parte do eletrodo que é descartada — não é considerada na eficiência de deposição, visto que o comprimento da ponta varia com o soldador ou com a aplicação. A Tabela VI ilustra como a perda das pontas afeta a eficiência de deposição. Um eletrodo E6010 possui uma eficiência de deposição média real de 71,6% sem considerar a perda da ponta. O descarte de uma ponta de comprimento 50 mm resulta numa queda do metal de solda depositado para 63,8%. De

modo similar, se forem descartadas pontas de comprimento 100 mm, a eficiência de deposição cai para 42,6%.

Classe	Eficiência de deposição média (%)
E6010	63,8
E6011	68,5
E6012	66,9
E6013	66,8
E6014	64,6
E6016	62,8
E6018	69,5
E6020	65,2
E7024	66,8
E7027	68,6
Nota: inclui perda de ponta de 50 mm	

Tabela V - Eficiência de deposição de eletrodos revestidos para aços carbono.

Comprimento da ponta (mm)	Metal depositado E6010	Perda do eletrodo de comprimento 350 mm
50	63,8	36,2
75	58,5	41,5
100	53,2	46,8
125	47,9	52,1
150	42,6	57,4
O eletrodo E6010 tem eficiência de deposição de 71,6%. Perdas devido à escória, respingos e fumos.		

Tabela VI - Perda da ponta dos eletrodos.

Parâmetros de soldagem

A Tabela VII mostra os parâmetros de soldagem recomendados para a soldagem com eletrodos revestidos OK® para aços carbono e suas respectivas taxas de deposição e eficiências de deposição.

Eletrodo	AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	TX. dep. (kg/h)	Ef. dep. (%)
OK 22.45P OK 22.50	E6010	2,5	60 – 80	75	0,7	72
		3,2	80 – 140	100 / 130	0,9 / 1,0	76 / 69
		4,0	90 – 180	140 / 170	1,3 / 1,3	74 / 64
		5,0	120 – 250	160 / 190	1,5 / 1,6	75 / 70
OK 22.65P	E6011	2,5	40 – 75	75	0,6	61
		3,2	60 – 125	120	1,0	71
		4,0	80 – 180	150	1,7	77
		5,0	120 – 230	180	1,9	73
OK 46.00 OK 46.13 OK 43.32	E6013	2,0	50 – 70	50	0,6	73
		2,5	60 – 100	85	0,7	73
		3,2	80 – 150	125	1,0	73
		4,0	105 – 205	140 / 160 / 180	1,2 / 1,4 / 1,6	76 / 74 / 71
		5,0	155 – 300	180 / 200 / 220	1,5 / 1,7 / 1,9	74 / 71 / 73
OK 33.80	E7024	3,2	130 – 170	140 / 180	1,9 / 2,3	72 / 71
		4,0	140 – 230	180 / 210 / 240	2,4 / 2,9 / 3,3	71 / 73 / 69
		5,0	210 – 350	245 / 270 / 290	3,4 / 3,8 / 4,1	69 / 71 / 68
		6,0	270 – 430	320 / 360	4,3 / 5,3	72 / 69
OK 48.04 OK 48.06 OK 48.07 OK 55.00	E7018 E7018 E7018-1 E7018-1	2,5	65 – 105	90	0,8	66
		3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
		4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
		5,0	185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75

Tabela VII - Recomendações de parâmetros de soldagem para os eletrodos revestidos OK® para a soldagem de aços carbono.

Sistemas básicos e ácidos de escória

O tipo de escória produzida pelos eletrodos revestidos tem um efeito determinante na qualidade do metal de solda. Os eletrodos E6010, E6011, E6012, E6013, E7014, E7024 e outros eletrodos celulósicos e rútilicos produzem escórias predominantemente formadas por dióxido de silício (areia, sílica, SiO₂) e apresentam um comportamento ácido. Sistemas ácidos de escória não refinam o metal de solda. Por outro lado, a escória dos eletrodos E7016, E7018 e de outros de baixo hidrogênio é constituída principalmente de cal e fluorita, dois compostos que apresentam comportamento básico. Escórias básicas realizam algum refino do metal de solda, resultando num teor mais baixo de inclusões não metálicas.

Vantagens e desvantagens de eletrodos revestidos para aços carbono

São várias as vantagens do processo de soldagem por eletrodos revestidos. É o processo de soldagem mais simples disponível. Tudo o que se necessita é de uma fonte de energia de corrente constante, dois cabos elétricos e o eletrodo. É o processo de soldagem mais flexível no sentido que pode ser empregado em qualquer posição de soldagem para quase todas as espessuras dos aços carbono.

As desvantagens são que os eletrodos revestidos apresentam taxas de deposição mais baixas que os outros processos, tornando-o menos eficiente. Além disso, o uso de eletrodos revestidos para aços carbono requer mais treinamento dos soldadores novos que os processos de soldagem semi-automáticos e automáticos.

Capítulo 3

ELETRODOS REVESTIDOS PARA A SOLDAGEM DE AÇOS DE BAIXA LIGA

Aços de baixa liga

Aços de baixa liga são aqueles que possuem pequenas quantidades de elementos de liga adicionados com objetivos específicos, ou seja, aumentar a resistência mecânica, a tenacidade, a resistência à corrosão, a resistência à carepa, ou alterar a resposta ao tratamento térmico. Quase todo o fabricante de aços produz uma família de aços de baixa liga vendidos sob marcas comerciais conhecidas pelo mercado. Muitos dos aços são projetados para desenvolver suas propriedades específicas, tais como alta resistência ou tenacidade, na condição laminados a quente e sob condições de resfriamento controladas, dispensando tratamentos térmicos subsequentes. Outras composições de aços de baixa liga são projetadas para atingir suas propriedades específicas após os tratamentos térmicos como, por exemplo, aços que sofrem têmpera e revenimento para atingirem alta resistência com boa tenacidade. Os eletrodos revestidos para a soldagem de aços de baixa liga são desenvolvidos, na maioria dos casos, mais para combinar as propriedades mecânicas que a composição química exata do aço. Exceções a essa regra são os eletrodos ao cromomolibdênio (Cr-Mo), que precisam conter aproximadamente os mesmos teores de elementos de liga do metal de base para atingir as propriedades deste.

Consequências do hidrogênio no aço de baixa liga

Uma das razões pelas quais os aços de baixa liga estão se tornando cada vez mais populares foi a pesquisa extensiva que foi levada adiante para o desenvolvimento dos eletrodos para soldá-los. Embora sejam necessários cuidados e precauções especiais na soldagem dos aços de baixa liga, é possível nos dias atuais soldá-los com alto grau de confiabilidade. Porém, não foi sempre assim. Durante a II Guerra Mundial, quando houve um aumento dramático no uso de aços de alta resistência e baixa liga, houve também um correspondente aumento nos defeitos de soldagem. Percebeu-se rapidamente que os aços temperáveis não poderiam ser soldados da mesma maneira e com os mesmos eletrodos que eram comumente empregados na soldagem dos aços carbono de baixa resistência. Através de muita pesquisa foi descoberto que o hidrogênio aprisionado era o responsável pelos defeitos de solda, e o termo *fragilização pelo hidrogênio* tornou-se sinônimo de um alerta vermelho de desastre iminente.

Quando compostos que contêm hidrogênio como água, minerais, ou produtos químicos estão presentes no revestimento do eletrodo, como é comum em eletrodos para aços carbono, o hidrogênio quimicamente ligado se dissocia em hidrogênio atômico sob a ação do calor do arco. O metal de solda fundido tem a capacidade de dissolver o hidrogênio atômico. No entanto, logo que o metal de solda se solidifica, perde sua capacidade de manter o hidrogênio em solução, e este é expelido para a atmosfera ou se difunde através da região de soldagem. O aço e o metal de solda não são tão sólidos quanto eles aparentam a olho nu, estando cheios de poros microscópicos. Os átomos de hidrogênio podem se mover para fora da região do metal de solda e atingir a zona termicamente afetada, que é uma área da maior importância na soldagem, especialmente nos aços de alta resistência.

A zona termicamente afetada (ZTA, veja a Figura 6) é a região da solda que não se fundiu durante a soldagem, porém sofreu mudanças microestruturais resultantes do calor induzido pela soldagem. Essa região pode se tornar um elo fraco em uma junta soldada que, em condições normais, seria suficientemente resistente. Primeiramente, a estrutura granular da (ZTA) não é tão refinada e, portanto, é mais fraca que o metal de base circunvizinho ou que o metal de solda com estrutura bruta de fusão. Em segundo lugar, se a ZTA se resfriar muito rapidamente em determinados aços, forma-se uma estrutura cristalina frágil e dura conhecida como martensita. Os poros relativamente grandes da zona termicamente afetada são sítios naturais de captura do hidrogênio atômico. Quando dois átomos de hidrogênio se encontram há uma união imediata entre eles para formar o hidrogênio molecular (H_2 , estado gasoso). As moléculas de hidrogênio resultantes são maiores que a estrutura cristalina do metal e podem ficar impedidas de migrarem livremente. À medida que mais e mais átomos de hidrogênio migram até os poros e formam moléculas que permanecem aprisionadas, podem se desenvolver enormes pressões internas. Os aços carbono e os de mais baixa resistência possuem plasticidade suficiente para acomodar as tensões internas resultantes da pressão do hidrogênio de forma que não causem trincas no aço. Por outro lado, aços que possuam alta dureza e alta resistência não apresentam plasticidade suficiente para acomodar a pressão, e se houver muito hidrogênio pode ocorrer fissuração.

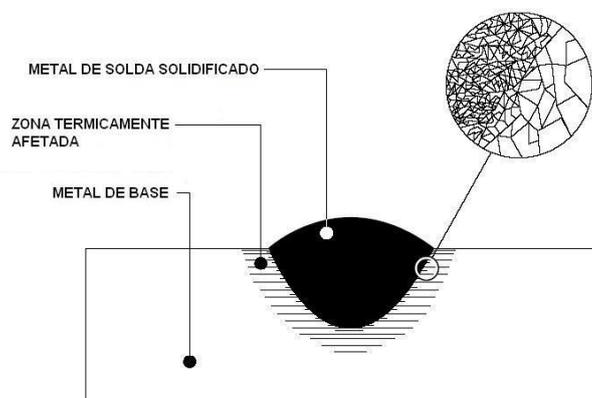


Figura 6 - A zona termicamente afetada.

O defeito causado, conhecido como *fissuração a frio* (veja a Figura 7), inicia-se na ZTA, tornando-se particularmente perigoso porque a trinca não fica imediatamente aparente a olho nu. Ela ocorre depois que o metal resfriou de 200°C até a temperatura ambiente, e é muitas vezes chamada de *trinca a frio*. Esse defeito pode ocorrer logo após o resfriamento até a temperatura ambiente ou pode levar horas, dias, ou mesmo meses antes que aconteça.

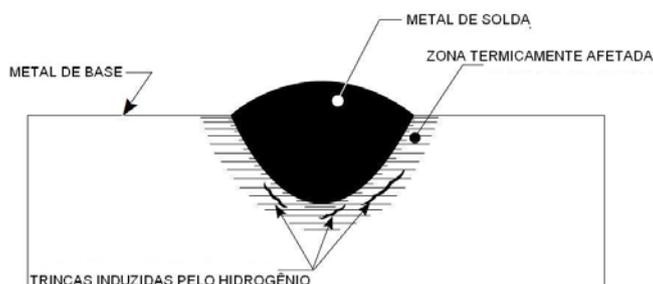


Figura 7 - Fissuração a frio.

Pré-aquecimento

Aços que são fortemente temperáveis por meio de um resfriamento rápido da zona termicamente afetada necessitam de controles de temperatura de pré-aquecimento e entrepasses. Quando o pré-aquecimento é aplicado no aço, a taxa de resfriamento diminui. Manter a temperatura constante entre os passes de solda também ajuda no controle da taxa de resfriamento.

Taxas de resfriamento menores evitam que o aço sofra excessivo endurecimento e, portanto, minimiza a chance de ocorrer fissuração sob cordão. Quando essa técnica é combinada com o uso de eletrodos revestidos de baixo hidrogênio, pode-se esperar um alto grau de confiabilidade das soldas.

A fabricação de eletrodos de baixo hidrogênio

A descoberta de defeitos de solda relacionados ao teor de hidrogênio difusível deu início ao desenvolvimento de eletrodos de baixo hidrogênio. As funções do revestimento em eletrodos de baixo hidrogênio (isto é, proteção contra a atmosfera, estabilização do arco, adição de elementos de liga, etc) são bem parecidas com aquelas descritas no Capítulo 2, mas o revestimento é formulado com ingredientes que não possuem hidrogênio em sua composição química. Isso é principalmente alcançado pela eliminação de compostos orgânicos e químicos com alto teor de umidade. Realmente o controle dos níveis de umidade no revestimento é crítico na fabricação e no emprego de eletrodos de baixo hidrogênio.

Adicionalmente à eliminação do hidrogênio na fórmula do revestimento, o processo de fabricação prevê um ciclo de secagem a alta temperatura. Depois da extrusão do revestimento na alma, da mesma forma que na fabricação de eletrodos revestidos para aços carbono, os eletrodos de baixo hidrogênio são colocados num forno de secagem a baixa temperatura (de 150 °C a 200 °C), e então ressecados num forno separado de alta temperatura (de 420 °C a 480 °C) por um determinado período. Esse procedimento praticamente elimina toda a umidade e, para prevenir contra a reabsorção da umidade naturalmente presente na atmosfera, os eletrodos são imediatamente embalados em latas após a ressecagem a alta temperatura.

Armazenagem e acondicionamento

Todos os eletrodos de baixo hidrogênio absorverão alguma umidade do ar após a abertura da lata. Por isso, os eletrodos que não forem consumidos dentro de um determinado intervalo de tempo, devem ser armazenados em uma estufa e mantidos a temperatura constante.

Diversos códigos estruturais e militares permitem apenas tempos determinados de exposição, que podem variar de 30 minutos até 8 horas dependendo de teor de elementos de liga do eletrodo, da umidade relativa da área de trabalho e do nível crítico da aplicação. Se os eletrodos de baixo hidrogênio ficarem expostos à atmosfera além desses limites, devem ser descartados ou ressecados numa estufa apropriada por um determinado intervalo de tempo a uma certa faixa de temperatura.

As condições de ressecagem e de manutenção recomendadas para os eletrodos OK® de baixo hidrogênio (básicos) estão indicadas na Tabela XVI e na Tabela XVII.

Revestimentos resistentes à umidade

A absorção de umidade merece uma atenção especial de usuários finais como estaleiros navais e fabricantes de oleodutos situados em áreas do mundo que apresentam alto nível de umidade relativa. Quando a temperatura e a umidade relativa aumentam, a probabilidade de absorção de umidade no revestimento do eletrodo de baixo hidrogênio também aumenta. Para combater essa possibilidade, a maioria dos fabricantes de eletrodos desenvolveu nos últimos anos eletrodos de baixo hidrogênio com revestimentos resistentes à umidade. Esses revestimentos reduzem a absorção de umidade em eletrodos que ficaram expostos ao ar por longos períodos, acrescentando um grau extra de confiabilidade aos eletrodos de baixo hidrogênio.

Os gráficos mostrados na Figura 8a, na Figura 8b e na Figura 8c dão uma idéia da efetividade de um revestimento resistente à umidade. O método escolhido para a realização desses testes está descrito na especificação AWS A5.5. Ele foi escolhido porque satisfaz às especificações AWS e é sensível apenas à água, tornando-o um dos mais precisos e confiáveis métodos de determinação de umidade atualmente em uso.

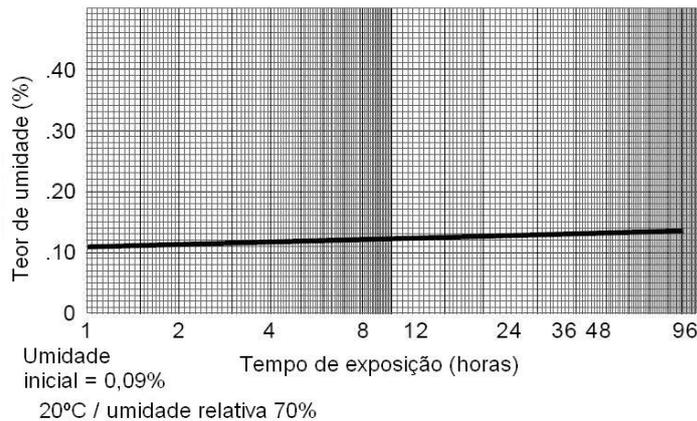


Figura 8a - Efetividade do revestimento resistente à umidade.

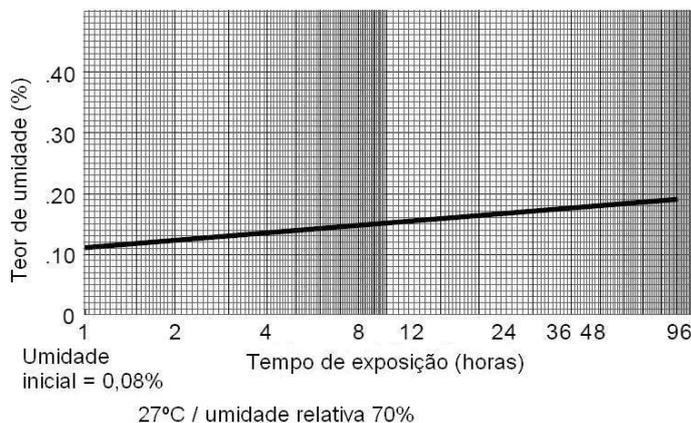


Figura 8b - Efetividade do revestimento resistente à umidade.

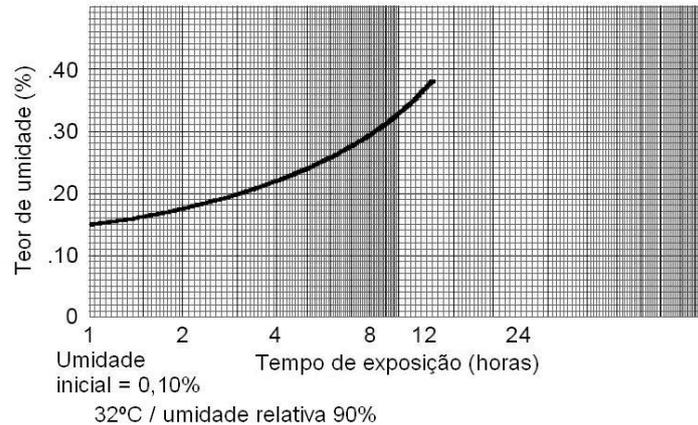


Figura 8c - Efetividade do revestimento resistente à umidade.

O código estrutural AWS e as especificações militares permitem, respectivamente, um máximo de 0,40% e 0,20% de teor de umidade para os eletrodos de baixo hidrogênio E70XX. Conforme já foi exibido na Figura 8, esses eletrodos satisfazem a esses requisitos de baixa umidade até além dos tempos de exposição que são normalmente praticados em campo.

A especificação AWS A5.5

A absorção de umidade merece uma atenção especial de usuários finais como estaleiros navais e fabricantes de oleodutos situados em áreas do mundo que apresentam alto nível de umidade relativa. Quando

Com muito poucas exceções, os eletrodos de baixa liga são feitos adicionando-se ao revestimento os elementos de liga apropriados, e não empregando uma alma de aço ligado que seja compatível com o metal de base de baixa liga. Eletrodos revestidos para aços de baixa liga são classificados em conformidade com a especificação AWS A5.5 da American Welding Society. Esta especificação contém os requisitos de propriedades mecânicas e as condições de alívio de tensões, os requisitos de composição química, e também os requisitos de integridade do metal de solda. Os eletrodos são classificados sob essa especificação em conformidade com as propriedades mecânicas e a composição química do metal de solda, com o tipo de revestimento, e com a posição de soldagem. A classificação do eletrodo é determinada pelo fabricante de acordo com os resultados de seus próprios testes. O fabricante, portanto, garante que seu eletrodo atende aos requisitos da especificação AWS.

As designações alfanuméricas empregadas para as classificações de eletrodos revestidos de baixa liga possuem o mesmo significado dos eletrodos para aços carbono, exceto que o(s) componente(s) principal(is) da liga é(são) indicado(s) por um sufixo alfanumérico.

Por exemplo, a classificação E7018-A1 indica:

- Um eletrodo (letra E);
- Um limite de resistência mínimo de 70 ksi (70); observe que 70 ksi = 485 MPa;
- Soldabilidade em todas as posições (1);
- Baixo hidrogênio com adição de pó de ferro (8);
- Contém normalmente 0,5% de molibdênio (A1).

A lista completa de composições nominais de ligas para essa especificação está na Tabela VIII.

A1	0,5% Mo
B1	0,5% Cr e 0,5% Mo
B2	1,25% Cr e 0,5% Mo
B2L	1,25% Cr, 0,5% Mo e máx. 0,05% C
B3	2,25% Cr e 0,5% Mo
B3L	2,25% Cr, 0,5% Mo e máx. 0,05% C
B4L	2% Cr, 0,5% Mo e máx. 0,05% C
B5	0,5% Cr e 1,1% Mo
C3	1% Ni
C1	2% Ni
C2	3% Ni
D1	1,5% Mn e 0,3% Mo
D2	1,75% Mn e 0,3% Mo
M	Conforme as composições cobertas pelas especificações militares
G	Necessita de um teor mínimo de qualquer um dos seguintes elementos: 1,00% Mn, 0,80% Si, 0,50% Ni, 0,30% Cr, ou 0,20% Mo

Tabela VIII - Designações nominais de liga para a especificação AWS A5.5.

Efeito dos elementos de liga

Molibdênio (Mo) - quando o metal de solda de aço doce sofre alívio de tensões, a tensão limite de escoamento é reduzida em aproximadamente 20 MPa ou mais e da mesma forma para a tensão limite de resistência. Quando 0,5% Mo é adicionado à solda, ambos o limite de escoamento e o limite de resistência permanecem constantes da condição como soldado até a condição com tratamento térmico de alívio de tensões. A presença do molibdênio também aumenta a resistência mecânica do metal de solda.

Cromo (Cr) - quando o cromo é adicionado ao metal de solda, aumentam a resistência à corrosão e à formação de carepa a temperaturas altas. A combinação do cromo e do molibdênio dá ao metal de solda a característica de manter os altos níveis de resistência a temperaturas relativamente altas.

Níquel (Ni) - o metal de solda de aço doce usualmente torna-se frágil a temperaturas abaixo de -30 °C. A adição de 1-3% de níquel ao metal de solda dá a este a capacidade de manter a tenacidade a temperaturas consideravelmente mais baixas. A presença do níquel também torna o metal de solda mais resistente à fissuração à temperatura ambiente.

Manganês (Mn) - a presença de 1,5-2,0% de manganês no metal de solda aumenta a resistência à tração e, quando é adicionado também 0,3% de molibdênio, o metal de solda de alta resistência torna-se também resistente a trincas.

Deve ser observado que a especificação AWS A5.5 cobre não somente os eletrodos de baixa liga e baixo hidrogênio, como também todas as versões de eletrodos do tipo celulósicos, com adições de titanato e de pó de ferro. O significado das designações da AWS está na Figura 9. Uma lista completa de todos os eletrodos cobertos por essa especificação é mostrada na Tabela IX.

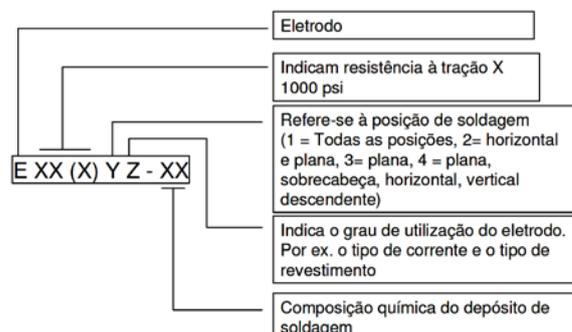


Figura 9 - Classificação dos eletrodos revestidos para aços de baixa liga.

E7010-A1	E8018-B2	E9015-B3L	E11018-M
E7011-A1	E8018-B2L	E9016-B3	E12018-M
E7015-A1	E8015-B4L	E9018-B3	---
E7016-A1	E8016-B5	E9018-B3L	EXX10-G
E7018-A1	E8016-C1	E9015-D1	EXX11-G
E7020-A1	E8018-C1	E9018-D1	EXX13-G
E7027-A1	E8016-C2	E9018-M	EXX15-G
---	E8018-C2	---	EXX16-G
E8016-B1	E8016-C3	E10015-D2	EXX18-G
E8018-B1	E8018-C3	E10016-D2	E7020-G
E8015-B2L	---	E10018-D2	---
E8016-B2	E9015-B3	E10018-M	---

Tabela IX - Classificação dos eletrodos para aços de baixa liga.

Propriedades mecânicas (AWS A5.5)

Tendo em vista que muitos aços de baixa liga necessitam de algum tipo de tratamento térmico para aliviar as tensões internas originadas pelo processo de soldagem, a especificação AWS requer a realização de alguns testes no metal de solda depositado da maioria dos eletrodos de baixa liga após o corpo de prova ter sofrido alívio de tensões. Essa especificação permite apenas aos eletrodos dos tipos E8016-C3, E8018-C3, E9018-M, E11018-M e E12018-M serem testados na condição como soldados durante o processo de classificação.

Propriedades de impacto

Levando em consideração que muitos dos aços de baixa liga são desenvolvidos para serviço a baixa temperatura, as propriedades de impacto do metal de solda selecionado para unir esses aços são muito importantes. Exceto para os tipos já mencionados no item anterior, todos os ensaios de impacto são realizados em corpos de prova que tenham sofrido alívio de tensões. A Tabela X estabelece os requisitos mínimos de valores de energia para os corpos de prova do tipo Charpy-V em conformidade com a especificação AWS A5.5.

COMO SOLDADO	REQUISITO MÉDIO MÍNIMO	ALÍVIO DE TENSÕES
E7018-W1 E7018-W2	27 J @ -18°C	
E7010-P1 E8010-P1	27 J @ -29°C	
E8016-C3 E8018-C3	27 J @ -40°C	
E7018-C3L E8016-C4 E8018-Cr E9018-M E10018-M E11018-M E12018-M	27 J @ -51°C	E8016-D3 E8018-D1 E8018-D3 E9015-D1 E9018-D1 E9018-D3 E10015-D2 E10016-D2 E10018-D2
	27 J @ -59°C	E8016-C1 E8018-C1
	27 J @ -73°C	E7015-C1L E7016-C1L E7018-C1L E8016-C2 E8018-C2
	27 J @ -101°C	E7015-C2L E7016-C2L E7018-C2L
	27 J @ -115°C	E9015-C5L

Tabela X - Requisitos de impacto da especificação AWS A5.5.

Seleção do eletrodo apropriado

Como já foi afirmado anteriormente, eletrodos de baixa liga são frequentemente selecionados levando mais em consideração as propriedades físicas do aço a ser soldado do que sua composição química. Essas propriedades físicas — resistência, tenacidade, resistência à fluência e à corrosão — refletem o tipo de serviço para o qual o aço é designado. O sufixo alfanumérico da classificação do eletrodo fornece uma indicação do serviço. Sempre que possível, o eletrodo deveria ser escolhido com base nos níveis apropriados de resistência e no serviço pretendido para a junta soldada.

Condições de serviço

A grande "família" dos aços que são comercializados na condição laminado e com controle de resfriamento possuem um limite de escoamento mínimo de 345 MPa e um limite de resistência mínimo de 485 MPa. Os eletrodos que depositam um metal de solda de baixo hidrogênio com esses níveis de resistência são empregados para soldar esses aços.

Alguns dos aços de alta resistência são designados para uso a temperaturas subzero. Eletrodos à base de níquel (tipos C1, C2, C3) estão disponíveis para tais aplicações de baixa temperatura.

Aços de baixa liga ao cromo-molibdênio são empregados em condições de serviço de temperaturas moderadamente altas. Tubulações, caldeiras, etc. que são utilizadas extensivamente em usinas de geração de energia são fabricadas desses aços. Eletrodos de baixo hidrogênio ao cromo-molibdênio (tipos B1, B2, B3, etc.) são produzidos para soldar esses aços.

Muitas estruturas de pontes e outras expostas às intempéries são fabricadas de aços resistentes à corrosão atmosférica. Esses aços de baixa liga, quando expostos às condições atmosféricas, desenvolvem uma camada fina e aderente de óxido (a pátina, daí denominarem-se aços patináveis) que evita a continuação do processo de oxidação e elimina a necessidade de pintura. Para a soldagem desses aços estão disponíveis eletrodos revestidos de baixa liga com adições de cromo, níquel e cobre.

Aços de baixa liga temperados e revenidos normalmente apresentam alta resistência mecânica e boa tenacidade. Esses tipos de aço são empregados onde é importante a redução de peso da estrutura. Esses aços são frequentemente utilizados em aplicações militares como, por exemplo, na fabricação de cascos resistentes de submarinos nucleares e de navios de guerra. A série M de eletrodos de baixo hidrogênio e alta resistência é fabricada para a soldagem desses aços.

Oleodutos e gasodutos de aços de alta resistência são atualmente fabricados com mais frequência que antigamente. Eletrodos celulósicos de baixa liga de classificação E7010, E8010 e E9010 são usados na soldagem no campo.

Projetos de junta

Durante a soldagem de juntas em ângulo em aços de alta resistência temperados e revenidos, frequentemente ocorrem trincas de canto ao longo dos cordões de solda (veja a Figura 10). A trinca de canto ocorre na zona termicamente afetada durante a contração do metal de solda porque este apresenta limites de escoamento e de resistência maiores que os do metal de base. A solução para esse problema é usar um eletrodo que produza um metal de solda de escoamento e resistência menores e aumentar o tamanho da perna para atender aos requisitos de resistência mecânica da junta soldada.

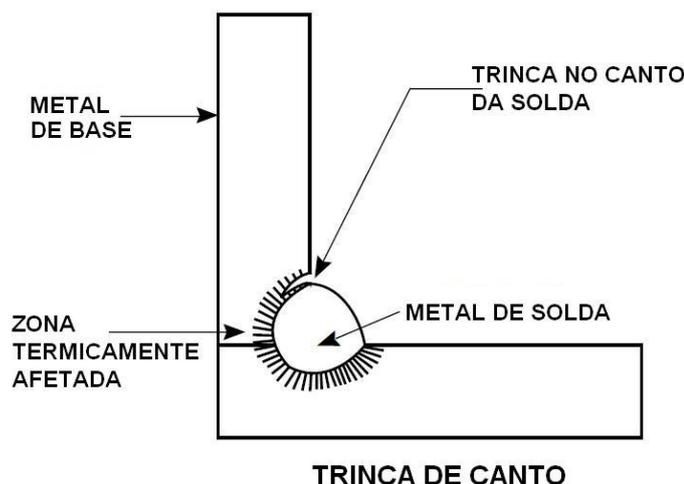


Figura 10 - Trinca de canto em junta em ângulo.

Com um metal de solda bem menos resistente, seu limite de escoamento é atingido durante a contração do resfriamento, de modo que ele se deforma sem sobrecarregar a zona termicamente afetada do metal de base e não há formação de trincas.

Parâmetros de soldagem

A Tabela XI mostra os parâmetros de soldagem recomendados para a soldagem com eletrodos revestidos OK[®] para aços de baixa liga e suas respectivas taxas de deposição e eficiências de deposição.

Eletrodo	AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	Tx. dep. (kg/h)	Ef. dep. (%)
OK 22.46P	E7010-G	3,2	80 – 140	100 / 130	0,9 / 1,0	76 / 69
OK 22.47P	E8010-G	4,0	90 – 180	140 / 170	1,3 / 1,3	74 / 64
OK 22.48P	E9010-G	5,0	120 – 250	160 / 190	1,5 / 1,6	75 / 70
OK 22.85P	E7010-A1					
OK 73.03	E7018-W1	2,5	65 – 105	90	0,8	66
OK 73.45	E8018-G	3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
OK 74.55	E7018-A1	4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
OK 75.60	E9018-M	5,0	185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75
OK 75.75	E11018-G					
OK 76.18	E8018-B2					
OK 76.28	E9018-B3					
OK 74.75	E9018-D1	3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
OK 75.65	E10018-G	4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
OK 78.15	E9018-G	5,0	185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75
		2,5	65 – 105	90	0,8	66
OK 75.77	E12018-G	3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
		4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74

Tabela XI - Recomendações de parâmetros de soldagem para os eletrodos revestidos OK[®] para a soldagem de aços de baixa liga.

Tipos de corrente

O eletrodo escolhido funcionará apenas com a fonte apropriada. A Tabela XII relaciona o tipo de corrente para o qual cada eletrodo foi desenvolvido.

Classificação AWS	Corrente
EXX10-X	CC+
EXX11-X	CA ou CC+
EXX13-X	CA ou CC+ ou CC
EXX15-X	CC+
EXX16-X	CA ou CC+
EXX18-X	CA ou CC+
EXX20-X	CA ou CC- (horizontal em ângulo) CA ou CC+ ou CC- (plana)
EXX27-X	CA ou CC- (horizontal em ângulo) CA ou CC+ ou CC- (plana)

Tabela XII - Requisitos de corrente para diversas classes AWS de eletrodos.

Capítulo 4

ARMAZENAGEM, TRATAMENTO E MANUSEIO

Devem ser tomadas certas precauções na armazenagem dos eletrodos revestidos, principalmente os eletrodos básicos de baixo teor de hidrogênio, que são muito higroscópicos e necessitam de cuidados especiais para que suas características não sejam afetadas.

Um eletrodo úmido poderá causar inúmeros defeitos na solda: porosidade no início ou mesmo em todo o cordão de solda, trincas ao lado e sob o cordão, porosidade vermiforme, arco instável, respingos abundantes e acabamento ruim.

É importantíssimo, pois, que todos os usuários saibam cuidar convenientemente dos eletrodos revestidos.

As latas, por ocasião de sua abertura, ficam inutilizadas para posterior armazenagem dos eletrodos remanescentes, os quais deverão ser imediatamente colocados numa estufa apropriada.

A forma ideal de se transportar e armazenar eletrodos revestidos é em paletes. Tal sistema evitará choques e danos às embalagens, garantindo sua estanqueidade original. As latas deverão ser sempre guardadas na posição vertical, com as pontas de pega voltadas para baixo, visando preservar as pontas de arco, parte mais sensível dos eletrodos revestidos.

É recomendável que a abertura seja feita pela remoção do fundo da lata; assim, ficará bem mais fácil pegar os eletrodos na lata, pois a ponta de pega estará a descoberto, bem como a tampa remanescente será aquela que identifica o conteúdo em tipo, diâmetro, comprimento e número de produção.

O local de armazenagem dos eletrodos em suas embalagens originais deverá ser adequadamente preparado para permitir a manutenção das suas propriedades.

Dois aspectos deverão ser considerados e bem controlados: a temperatura e a umidade relativa do ar.

As condições de armazenagem recomendadas para os eletrodos revestidos OK® podem ser observadas na Tabela XIII.

	Umidade relativa	Temperatura
Celulósicos	70% máx.	+18 °C a +50 °C
Demais tipos	50% máx.	+18 °C mín.

Tabela XIII - Condições de armazenagem dos eletrodos revestidos OK®.

Identificação de eletrodos revestidos úmidos

A sensibilidade dos eletrodos revestidos à umidade do ambiente, não sendo de pleno conhecimento dos usuários, implica na deterioração do revestimento, e na conseqüente necessidade de se efetuar uma ressecagem sobre eletrodos úmidos.

Durante a soldagem com eletrodos muito úmidos pode ser visto um vapor de condensação branco. Se a soldagem com um eletrodo úmido for interrompida, pode surgir uma trinca longitudinal no revestimento, partindo da extremidade do arco.

A forma ideal de analisar a umidade do revestimento de um eletrodo é realizar sua verificação em laboratório; existem vários métodos, sendo mais difundido aquele preconizado na especificação AWS A5.1, onde, por exemplo, são ensaiados os eletrodos básicos de baixo hidrogênio a temperaturas da ordem de 1.000 °C.

Nos eletrodos que contêm componentes orgânicos os ensaios são realizados normalmente a temperaturas em torno de 100 °C, sendo conveniente, e mesmo necessário, um teor de umidade superior a 1%, tendo em vista a boa aplicabilidade do eletrodo. Nos celulósicos o teor de umidade adequado situa-se entre 3% e 7%.

A ressecagem de eletrodos revestidos

Os eletrodos celulósicos não são muito higroscópicos e, como admitem teores mais elevados de umidade, dificilmente acarretam formação de porosidades, razão pela qual raramente necessitam de ressecagem. É o caso dos eletrodos celulósicos, cuja ressecagem deve ser evitada.

Os eletrodos básicos são os únicos que aceitam ressecagem em temperaturas mais elevadas, permitindo redução drástica no teor de umidade do revestimento devido à diminuição da água molecular de seus componentes sem prejuízo de suas propriedades.

Alguns pontos importantes deverão ser considerados na ressecagem de eletrodos básicos:

- não prolongar a ressecagem por tempo além do recomendado pelo fabricante do consumível;
- controlar adequadamente a temperatura / tempo de ressecagem;
- evitar ressecagem de grandes quantidades;
- guardar os eletrodos ressecados em estufas apropriadas;
- a ressecagem minimiza o hidrogênio proveniente da umidade do revestimento em eletrodos de baixo hidrogênio;
- sempre que possível, devem ser seguidas as recomendações do fabricante do consumível;
- ressecagem em fornos adequados, aplicável para eletrodos básicos, de altíssimo rendimento, rutilicos, para ferros fundidos e inoxidáveis;
- para celulósicos, a ressecagem deve ser evitada;
- manutenção da ressecagem em estufas próprias.

Hidrogênio difusível

O teor de hidrogênio difusível é normalmente medido em um volume do gás hidrogênio (em ml) nas condições normais de temperatura e pressão para cada cem gramas (100 g) de metal depositado.

Os teores de hidrogênio difusível para os diversos tipos de eletrodos revestidos OK® podem ser vistos na Tabela XIV.

Tipo de eletrodo	Teor de hidrogênio difusível
Celulósico	acima de 30 ml/100 g
Rutilico	entre 15 e 30 ml/100 g
Básico	abaixo de 10 ml/100 g

Tabela XIV - Teor de hidrogênio difusível dos eletrodos revestidos OK®.

O *International Institute of Welding (IIW)* classifica os teores de hidrogênio difusível nos diversos níveis exibidos na Tabela XV.

Classificação <i>IIW</i>	Teor de hidrogênio difusível
muito baixo	0 a 5 ml/100 g
baixo	5 a 10 ml/100 g
médio	10 a 15 ml/100 g
alto	acima de 15 ml/100 g

Tabela XV - Classificação de níveis de hidrogênio difusível (*IIW*).

Ressecagem

A Tabela XVI mostra a faixa de temperatura efetiva e o período de tempo real recomendado para a ressecagem de eletrodos revestidos OK®.

Tipo de eletrodo	Temperatura efetiva no pacote de eletrodos (°C)	Tempo real à temperatura efetiva (h)
Básicos	325 ± 25	1,5 ± 0,5
Altíssimo Rendimento	275 ± 25	1,5 ± 0,5
Rutílicos	80 ± 10	1,5 ± 0,5
Ferro Fundido	80 ± 10	1,5 ± 0,5
Inoxidáveis Rutílicos	275 ± 25	1,5 ± 0,5
Inoxidáveis Básicos	225 ± 25	1,5 ± 0,5

Tabela XVI - Recomendações de ressecagem de eletrodos revestidos OK®

Manutenção

A Tabela XVII apresenta a faixa de temperatura efetiva na estufa de manutenção e na estufa portátil (cochicho) recomendadas para os eletrodos revestidos OK®.

Tipo de eletrodo	Temperatura efetiva na estufa de manutenção (°C)	Temperatura efetiva no cochicho (h)
Básicos	125 ± 25	115 ± 35
Altíssimo Rendimento	110 ± 10	100 ± 20
Rutílicos	60 ± 10	60 ± 10
Ferro Fundido	60 ± 10	60 ± 10
Inoxidáveis	110 ± 10	100 ± 20

Tabela XVII - Recomendações de manutenção dos eletrodos revestidos OK®.

Capítulo 5

EQUIPAMENTOS

Uma das razões para a grande aceitação do processo SMAW é a simplicidade do equipamento necessário. O equipamento de soldagem consiste na fonte de energia, no porta-eletrodos (tenaz) e nos cabos e conexões (veja a Figura 11)

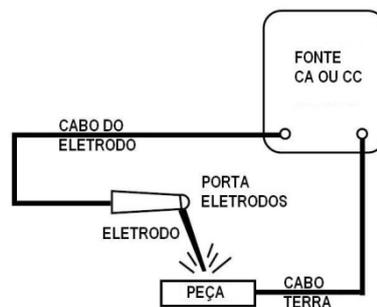


Figura 11 - Circuito de soldagem para o processo com eletrodos revestidos.

Porta-eletrodos - O porta-eletrodos (ou tenaz) conecta o cabo de solda e conduz a corrente de soldagem até o eletrodo. O punho isolado é usado para guiar o eletrodo sobre a junta de solda e alimentá-lo até a poça de fusão à medida que ele é consumido. Porta-eletrodos estão disponíveis em diferentes tamanhos e seus preços dependem de sua capacidade de suportar a corrente de soldagem.

Terminal terra - O terminal terra é utilizado para conectar o cabo terra à peça. Pode ser conectado diretamente à peça ou à bancada ou dispositivo ao qual a peça está posicionada. Fazendo parte do circuito de soldagem, o terminal terra deve ser capaz de suportar correntes de soldagem sem superaquecer devido à resistência elétrica.

Cabos de solda - O cabo do eletrodo e o cabo terra são partes importantes do circuito de soldagem. Eles devem ser muito flexíveis e ter um bom isolamento resistente ao calor. As conexões no porta-eletrodo, o terminal terra e os terminais da fonte de energia devem ser soldados ou bem prensados para assegurar baixa resistência elétrica. O diâmetro do cabo deve ser suficiente para conduzir a corrente elétrica com um mínimo de queda de tensão. O aumento no comprimento do cabo torna necessário o aumento em seu diâmetro para diminuir a resistência elétrica e a queda de tensão. A Tabela XVIII lista os diâmetros de cabo sugeridos para diversas correntes de soldagem e comprimentos de cabo.

Faixa de corrente de soldagem (A)	Comprimento total do cabo (m)								Queda de tensão para
	≤ 15		≤ 30		≤ 75		≤ 150		
	Cabo	Queda de tensão	Cabo	Queda de tensão	Cabo	Queda de tensão	Cabo	Queda de tensão	
20 a 180	#3	1,8	#2	2,9	#1	5,7	#0	9,1	180 A
30 a 250	#2	1,8	#1	2,5	#0	5,0	#0	9,9	200 A
60 a 375	#0	1,7	#0	3,0	#00	5,9	#000	9,3	300 A
80 a 500	#00	1,8	#000	2,5	#0000	5,0	#0000	9,9	400 A
100 a 600	#00	2,0	#0000	2,5	---	---	---	---	500 A

Quedas de tensão não incluem quedas causadas por conexões, porta-eletrodos ou peça de trabalho deficientes

Tabela XVIII - Queda de tensão nos cabos de solda em função das correntes de soldagem e dos comprimentos dos cabos.

Outros equipamentos

As ferramentas de limpeza são a picadeira, a escova de aço, a escova rotativa, a lixadeira e a maquina. O equipamento de proteção individual consiste nas máscaras, nos óculos, no casaco, no avental, nas mangas, nas luvas, nas polainas e no gorro.

Fontes de energia

A soldagem com eletrodos revestidos pode empregar tanto corrente alternada (CA) quanto corrente contínua (CC), porém em qualquer caso a fonte selecionada deve ser do tipo corrente constante. Esse tipo de fonte fornecerá uma corrente de soldagem relativamente constante independentemente das variações do comprimento do arco causadas pelas oscilações da mão do soldador. A corrente de soldagem determina a quantidade de calor proveniente do arco elétrico e, desde que ele permaneça relativamente constante, os cordões de solda serão uniformes em tamanho e em forma.

Tensão em vazio (fontes CA) - A tensão em vazio do equipamento de soldagem deve ficar preferencialmente na faixa de 50 V a 100 V. Quanto maior for a tensão em vazio, maior será a facilidade de abertura do arco.

Tipos de corrente - A corrente contínua confere melhor estabilidade ao arco. CC+ significa polaridade reversa, isto é, o eletrodo é ligado ao pólo positivo e a peça ao negativo. CC- é polaridade direta, isto é, o eletrodo é ligado ao pólo negativo e a peça ao positivo.

Na corrente alternada não existe polaridade definida. Há uma tendência a maior instabilidade do arco e a perda nos cabos é menor.

Tipos de fontes - Os transformadores fornecem somente corrente alternada. Os retificadores transformam a corrente alternada da rede em corrente contínua disponível para a soldagem. Os geradores podem fornecer corrente contínua ou corrente alternada. Os inversores fornecem corrente contínua e podem ser portáteis.

Seleção de fontes de energia

O emprego de uma fonte CA, CC ou CC/CA depende do tipo de soldagem a ser realizada e dos eletrodos utilizados. Os seguintes fatores devem ser considerados:

- **seleção do eletrodo** - o uso de uma fonte CC permite o emprego de uma faixa maior de tipos de eletrodos. Enquanto a maioria dos eletrodos é designada para ser utilizada com CC ou CA, alguns só funcionarão apropriadamente com CC.
- **espessura do metal de base** - fontes CC podem ser utilizadas para a soldagem tanto de seções espessas quanto de peças finas. Chapas finas são soldadas mais facilmente com CC porque é mais fácil abrir e manter o arco a níveis baixos de corrente.
- **distância à peça** - se a distância da peça à fonte for grande, CA é a melhor escolha, visto que a queda de tensão pelos cabos é menor que CC. Mesmo que os cabos sejam fabricados de cobre ou de alumínio (ambos bons condutores), a resistência neles torna-se maior quando seu comprimento aumenta. Em outras palavras, uma leitura de tensão tomada entre o eletrodo e a peça será bem menor do que a leitura tomada nos terminais de saída da fonte. Esse fenômeno é conhecido como queda de tensão.
- **posição de soldagem** - como CC pode ser operada a correntes de soldagem mais baixas, é mais adequado para a soldagem nas posições sobrecabeça e vertical que a soldagem com CA. Esse tipo de corrente pode ser empregado para a soldagem fora de posição se forem selecionados eletrodos adequados.
- **sopro magnético** - quando se solda com CC, campos magnéticos são originados através da solda. Em soldas que apresentam variações na espessura e formas irregulares esses campos magnéticos podem afetar o arco tornando-o fora de controle em termos de direção. Essa condição é especialmente incômoda quando se soldam cantos. CA raramente causa esse problema por causa do campo magnético com rápida reversão produzido.

Combinações de fontes que produzam ambas CA e CC estão disponíveis e proporcionam a versatilidade necessária para selecionar a corrente de soldagem adequada para a aplicação.

Quando se emprega uma fonte CC aparece a questão do uso da polaridade negativa ou positiva. Alguns eletrodos funcionam com CC+ e com CC-, e outros somente com CC+ ou somente com CC-. A corrente contínua flui numa direção no circuito elétrico, e esse fluxo unidirecional e a composição do revestimento do eletrodo terão um efeito preciso no arco e no cordão de solda. A Figura 12 mostra as conexões e os efeitos das polaridades direta (CC-) e reversa (CC+).

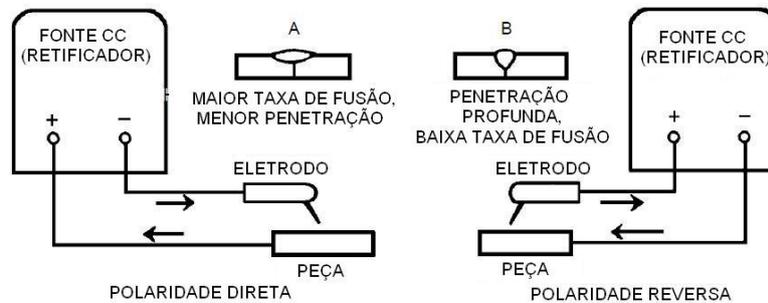


Figura 12 - Conexões e efeitos da corrente contínua

O eletrodo no pólo negativo (CC-) produz soldas com menor penetração; no entanto, a taxa de fusão do eletrodo é alta. O cordão de solda é largo e raso como mostrado em A na Figura 12. Por sua vez, o eletrodo no pólo positivo produz soldas com maior penetração e um cordão de solda mais estreito como mostrado em B na Figura 12.

Enquanto a polaridade afeta a penetração e a taxa de queima, o revestimento do eletrodo também apresenta forte influência nas características do arco.

BIBLIOGRAFIA

The ESAB Filler Metal Technology Course – ESAB Welding and Cutting Products, 2000.

- Tecnologia da Soldagem, Paulo Villani Marques

Belo Horizonte – MG
 São Paulo – SP
 Rio de Janeiro – RJ
 Porto Alegre – RS
 Salvador - BA

vendas_bh@esab.com.br
 vendas_sp@esab.com.br
 vendas_rj@esab.com.br
 vendas_pa@esab.com.br
 vendas_sa@esab.com.br



FORTE COM VOCÊ
www.esab.com.br