

**GEAN PABLO GONÇALVES DE ATAIDE**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS  
JUNTAS DA GAIOLA DE MINI-BAJA SOLDADAS  
PELO PROCESSO ER**



**UNIVERSIDADE FERERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2018**

GEAN PABLO GONÇALVES DE ATAIDE

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS JUNTAS DA  
GAIOLA DE MINI-BAJA SOLDADAS PELO PROCESSO ER**

**Trabalho de conclusão de curso** apresentado na graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

UBERLÂNDIA - MG

2018

GEAN PABLO GONÇALVES DE ATAIDE

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS JUNTAS DA  
GAIOLA DE MINI-BAJA SOLDADAS PELO PROCESSO ER**

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Tobias Souza Morais  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Doutorando Diego Costa Correia Silva  
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA - MG

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Atailton e Lucilene, pelo incentivo, colaboração e compreensão.

Ao meu irmão, Matheus, pelo incentivo e apoio.

Aos demais familiares, pelo suporte e incentivo.

Aos professores do nível fundamental e médio que colaboraram na formação de conhecimentos básicos e propiciaram meu ingresso no curso.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de fazer o curso e por toda a estrutura fornecida.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica pela competência, auxílio, e participação em minha formação.

Aos professores de outras faculdades da Universidade federal de Uberlândia que foram essenciais em minha formação em competências do ciclo básico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov pelo suporte, correções, incentivos e fornecimento de conhecimento e experiência.

Ao Prof. Hércio Cândido de Queiroz (Corinthiano) pelo auxílio com os testes, pela prestatividade e pelas lições passadas.

Aos técnicos “Chico” e “Lazinho” da FEMEC pelo auxílio com os testes.

Ao amigo Pedro Henrique (Pirex) por auxiliar na preparação dos tubos.

À Equipe Cerrado Baja SAE pela grande influência na formação da minha vida acadêmica, pessoal e profissional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

ATAIDE, G. P. G., **Avaliação da resistência mecânica das juntas da gaiola de mini-baja soldadas pelo processo ER**. 2018. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar a qualidade e avaliar a resistência mecânica de juntas soldadas pelo método de eletrodo revestido em tubos de aço com paredes finas (1,6 mm) e diâmetro de 25,4 mm usados pela Equipe Cerrado Baja SAE da Universidade Federal de Uberlândia. Todos os procedimentos de soldagem foram realizados com a intenção de demonstrar as vantagens e limitações para uma futura aplicação pelos alunos da equipe de mini-baja. Foi feito um comparativo entre eletrodos rutilicos dos tipos E6013 (aço carbono), E308 (aços inoxidáveis) e básicos E7018 (aço estrutural) avaliando penetração, acabamento, facilidade de soldagem e realizando testes destrutivos para avaliação de resistência mecânica e conformidade do processo. Os testes demonstram que os três eletrodos fornecem resultados satisfatórios desde que não haja defeitos no cordão de solda, porém com um tempo relativamente curto de treinamento é possível capacitar um aluno para executar uma solda com a qualidade de cordão aceitável usando o eletrodo rutilico do tipo E308 de diâmetro de 2,5 mm por meio de uma fonte de energia do tipo inversora, que fornece corrente contínua e favorece a estabilidade do processo. Os resultados mostram que a qualidade da solda utilizando eletrodos para aço inoxidável nessa aplicação é satisfatória, bem como a facilidade de extrair tal qualidade do processo, se mostrando o processo mais viável do ponto de vista econômico e de facilidade de manuseio.

ATAIDE, G. P. G., **Evaluation of mechanical resistance of the mini-baja cage joints welded by the ER process**. 2018. 58p. Final Course Assignment, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

## ABSTRACT

The objective of this work was to verify the quality and to evaluate the mechanical strength of welded joints by the shielded metal arc welding method in thin wall tubes (1.6 mm) and 25,4 mm of diameter used by *Equipe Cerrado Baja SAE* of the Federal University of Uberlândia. All welding procedures were performed with the intention of revealing the advantages and limitations for a future application by students of the mini-baja team. A comparison was made between rutile electrodes of types E6013 (carbon steel), E308 (stainless steel) and a basic coating electrode E7018 (structural steel), evaluating penetration, finishing, ease of welding and performing destructive tests for evaluation of mechanical resistance and process compliance. The tests demonstrate that all three electrodes provide satisfactory results as long as there are no weld bead defects, and a relatively short training time can enable a student to perform an acceptable weld quality using the 2.5 mm diameter E308 type rutile electrode by an inverter type power source which provides continuous current and promotes process stability. The results show that the quality of welding using stainless steel electrodes in this application is satisfactory, as well as the ease of extracting such quality from the process, showing itself the most economically viable and easy to handle process.

---

**Keywords:** Mini-Baja; Welding; Thin Wall Tubes; Shielded Metal Arc Welding.

## LISTA DE ABREVIações

AWS	American Welding Society
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEN	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CCEP	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
ER	Eletrodo Revestido
GMAW	Gas Metal Arc Welding (MIG/MAG)
MMA	<i>Manual Metal Arc (Welding)</i>
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
SAE	Society of Automotive Engineers
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding (Eletrodo Revestido)</i>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	15
Figura 2 – Processo ER (Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB, 2005) .....	16
Figura 3 – Efeito da polaridade na geometria da poça de fusão (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) .....	18
Figura 4 – Efeito da orientação do eletrodo na geometria da poça de fusão (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	20
Figura 5 – Posições usuais de soldagem (Cartaz: Posições de soldagem ISO e ASME – ESAB).....	20
Figura 6 – Característica estática da fonte de corrente constante (Prof. Paulo J. Modenese - Fontes de energia para soldagem a arco – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - 2009).....	21
Figura 7 – Hot Start (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) .....	22
Figura 8 – Efeito do Hot Start sobre a porosidade (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) .....	22
Figura 9 – Efeito da excentricidade da alma do eletrodo (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB).....	23
Figura 10 – Classificação de eletrodo revestido para aço ao carbono (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB) .....	28
Figura 11 – Dígitos especiais na classificação de eletrodos revestidos (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB) .....	28
Figura 12 – Características das classes de eletrodos revestidos (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB) .....	29
Figura 13 – Classificação de eletrodos revestidos para aços inoxidáveis e outras classes (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB) .....	29
Figura 14 – Padrões de tecimento (Modenesi – Técnica Operatória da Soldagem SMAW - 1) .....	34
Figura 15 – Reforço Excessivo (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) .....	35
Figura 16 – Falta de preenchimento (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	35
Figura 17 – Falta de fusão (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) ..	36
Figura 18 – Inclusões (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	36
Figura 19 – Porosidade (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) .....	36
Figura 20 – Mordedura (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) .....	37
Figura 21 – Rechupe de cratera (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	37
Figura 22 – Penetração excessiva e furo (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	38
Figura 23 – Aberturas acidentais de arco (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	38
Figura 24 – Deposição insuficiente (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev).....	38
Figura 25 – Sobreposição (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev) ...	39



Figura 26 – Desalinhamento (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)	39
Figura 27 – Respingos (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)	39
Figura 28 – Exemplos de trincas (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)	40
Figura 29 – Orientações de segurança: Incêndio e Ventilação (Regras para Segurança - ESAB)	41
Figura 30 – Serra Fita FRANHO FM20	44
Figura 31 - Esmeril de bancada	44
Figura 32 – Forno de Ressecagem	45
Figura 33 – Fonte de soldagem ESAB LHG 425	45
Figura 34 – Esquemático Fonte de soldagem ESAB LHG 425 (Catálogo ESAB)	46
Figura 35 – Escova de aço e picador	46
Figura 36 – EPI's	47
Figura 37 – Prensa Hidráulica	47
Figura 38 – Máquina para Ensaio de Tração	48
Figura 39 – Eletrodos Revestidos (Catálogo de consumíveis ESAB)	48
Figura 40 – Material de base	49
Figura 41 – Posição de soldagem	50
Figura 42 – Ressecagem	50
Figura 43 – Corpos de prova soldados	51
Figura 44 – Corpos de prova finalizados	51
Figura 45 – Fixação para ensaio de tração	53
Figura 46 – Geração de gráficos	53
Figura 47 – Corpo de Prova Metal de Base	54
Figura 48 – Fratura do metal de base	54
Figura 49 – Corpos de prova fraturados	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do metal de base .....	49
Tabela 2: Propriedades mecânicas do metal de base (fabricante) .....	49
Tabela 3: Ensaio de tração .....	55

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	13
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
CAPÍTULO 2 .....	15
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>2.1. Processo de soldagem a arco</b> .....	15
2.1.1. Fundamentos do processo .....	16
2.1.2. Escolha do tipo de corrente .....	17
2.1.3. Escolha da polaridade .....	18
2.1.4. Escolha do comprimento do arco .....	19
2.1.5. Escolha da velocidade de soldagem .....	19
2.1.6. Escolha da orientação do eletrodo .....	19
2.1.7. Posições de soldagem .....	20
<b>2.2. Fontes de Energia</b> .....	21
<b>2.3. Eletrodo Revestido</b> .....	23
2.3.1. Funções do Revestimento .....	24
2.3.2. Composição dos revestimentos .....	25
2.3.3. Tipos de revestimento .....	26
2.3.4. Classificação dos eletrodos .....	28
2.3.5 Seleção do Eletrodo Adequado .....	29
<b>2.4. Manuseio de Eletrodos Revestidos</b> .....	33
<b>2.5. Técnicas de Soldagem</b> .....	34
<b>2.6. Descontinuidades e Defeitos Típicos da Soldagem por ER</b> .....	34
<b>2.7. Segurança na Soldagem</b> .....	40
<b>2.8. Procedimentos Gerais Para Uma Boa Soldagem</b> .....	42
<b>2.9. Vantagens e Limitações do Processo de Soldagem por ER</b> .....	43
CAPÍTULO 3 .....	44
<b>METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS</b> .....	44
<b>3.1. Equipamentos Utilizados</b> .....	44
<b>3.2. Consumíveis</b> .....	48
<b>3.3. Material de base</b> .....	49

	12
<b>3.4. Soldagem por Eletrodo Revestido</b> .....	49
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	52
<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	52
<b>4.1 TESTES PRELIMINARES</b> .....	52
<b>4.2 TESTES FINAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	52
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	57
<b>CONCLUSÃO</b> .....	57
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	58
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	58

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Soldagem é a operação que objetiva a união de duas ou mais peças assegurando a continuidade das propriedades químicas e físicas na junta. (Quites A. M. *et al.*, 2002).

Existem indícios de que processos rudimentares de soldagem já eram utilizados na união de materiais há cerca de quatro mil anos nas regiões dos vales do Nilo e Tigre-Eufrates. Porém, o processo de junção de materiais praticado desde a Pré-História, quando se iniciaram os processos de fabricação com metais, consistia basicamente na soldagem por forjamento. A forja do ferreiro foi responsável pelos processos de soldagem até meados de 1880, desde então o crescimento da indústria e o surgimento das guerras mundiais impulsionaram a criação de novas tecnologias na área. Até a Primeira Guerra Mundial os processos de soldagem por resistência, soldagem à gás e soldagem a arco já haviam sido inventados.

James Joule, em 1856 conseguiu fundir e unir materiais a partir do aquecimento proveniente da resistência elétrica, em 1886 Elihu Thomson criou o primeiro transformador de soldagem e patenteou o processo, desenvolvendo inúmeras máquinas, incluindo o método de soldagem a pontos que é utilizado amplamente na indústria automobilística até os dias atuais.

Edmund Fouche e Charles Picard, por volta do ano de 1900 criaram a primeira chama oxi-combustível apropriada para soldagem, que utilizando o gás acetileno dominou os processos de fabricação e reparo, por meio de corte e solda no início do século XX.

Sir Humphrey Davy, em 1810, conseguiu criar um arco elétrico estável entre dois terminais, sendo este o princípio fundamental para a soldagem a arco. O primeiro método de soldagem por arco elétrico, utilizando um eletrodo de carvão e uma vareta de metal de adição, foi desenvolvido por Nikolay Benardos e apresentado na Feira Mundial de Eletricidade, Paris em 1881.

Em 1890, Nicolai Slavianoff desenvolveu mais ainda o método e ganhou uma patente para o uso de uma vareta de metal como eletrodo consumível, ao invés de carvão, funcionando como eletrodo e metal de adição simultaneamente.

O grande problema de tais processos a arco elétrico é que a poça de solda não era protegida da atmosfera e, em decorrência disso, a qualidade final ficava aquém do que se esperava.

No ano de 1902, o sueco Oscar Kjellberg se formou como Engenheiro Naval pela Escola Técnica de Bremen, no ano seguinte passou por um exame de Eletroengenharia na Escola Naval de Göteborg e trabalhou coordenando o reparo de caldeiras a vapor em navios. Kjellberg observou que o metal de solda apresentava grande porosidade e pequenas aberturas que impossibilitavam conseguir uma solda estanque, se sentindo insatisfeito com os métodos empregados até então.

Em 1907 foi registrada por Oscar Kjellberg a patente que estabelecia os fundamentos para uma era totalmente nova na soldagem a arco elétrico, uma vez que essa tecnologia tornou possível eliminar os gases atmosféricos da poça de fusão, gases estes que representam um efeito maléfico e variam significativamente as propriedades mecânicas e químicas da junta soldada.

Foram desenvolvidos posteriormente outros processos, porém o eletrodo revestido, mesmo sendo o mais antigo de todos os disponíveis, é recomendado para os reparos na gaiola do Mini Baja desenvolvida na FEMEC.

O projeto Baja SAE foi criado pelo Dr. John F. Stevens na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sendo que a primeira competição ocorreu em 1976. No ano de 1991 foram iniciadas as atividades da SAE BRASIL, que, em 1994, lançou o Projeto Baja SAE BRASIL.

O programa oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, provendo uma melhor formação para o mercado de trabalho. Ao participar do projeto, o aluno se envolve com um caso real de concepção, desenvolvimento, construção e testes de um veículo off road, monoposto e robusto.

Os alunos participantes do projeto Baja SAE BRASIL formam equipes que representam a Instituição de Ensino Superior à qual estão ligados. Estas equipes são desafiadas a participar de competições a níveis regional e nacional, que reúne os estudantes e promove a avaliação comparativa dos projetos.

A Equipe Cerrado Baja SAE foi originalmente criada na década de 1990 e refundada no ano de 2012, se engajando no projeto Baja SAE BRASIL. A equipe já apresenta grande evolução projetando e construindo um protótipo recreativo.

Por ser um projeto que demanda confiabilidade se faz necessária uma escolha consciente do processo e dos parâmetros de soldagem a serem empregados na fabricação e reparos na estrutura do protótipo, que no caso da Equipe Cerrado, é constituída por uma gaiola tubular com tubos principais de 31,75 mm de diâmetro externo e 1,6 mm de espessura, e tubos secundários de 24,4 mm de diâmetro externo e 1,25 mm de espessura. A pequena espessura de parede e o formato das juntas tubulares são os grandes desafios a serem vencidos.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O maior desafio do presente trabalho é atingir um cordão de solda aceitável e que garanta a integridade estrutural das juntas soldadas em tubos de parede fina, de forma que o processo permita que treinamento e qualificação do soldador para essa atividade específica seja realizado em um curto prazo. Para atingir esse objetivo é necessário ter conhecimento das variáveis que influenciam o desempenho da soldagem. A seguir serão apresentados e discutidos os conceitos básicos e aplicações da soldagem a arco com eletrodo revestido.

#### 2.1. Processo de soldagem a arco

O processo SMAW, também conhecido como processo ER, MMA ou soldagem manual a arco elétrico, é o processo de soldagem mais utilizado graças à sua versatilidade, baixo custo, simplicidade dos equipamentos e à possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou sujeitos a ventos. O calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho é responsável pela solda, uma vez que funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Para a operação de soldagem por ER (Figura 1) são basicamente necessários uma fonte para ajustar as condições da rede elétrica ao processo, o eletrodo revestido e uma forma de fechar o circuito para que haja a fusão do material de base e do próprio eletrodo promovendo a coalescência da junta.

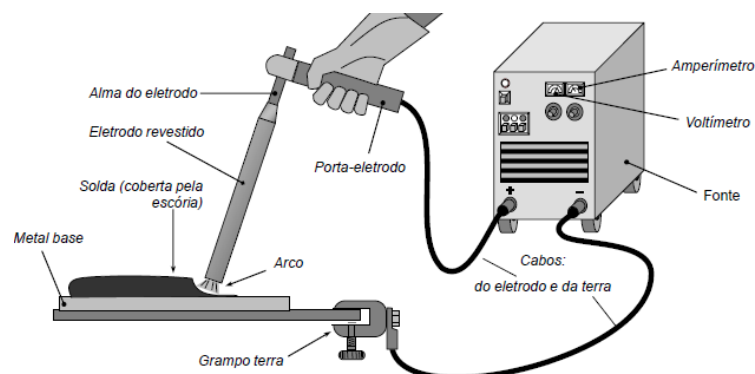


Figura 1 – Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

As variáveis do processo são: Tipo de corrente, polaridade, valor da corrente, comprimento do arco, velocidade de soldagem, diâmetro do eletrodo, orientação do eletrodo, posição de soldagem e tipo de revestimento.

### 2.1.1. Fundamentos do processo

O eletrodo é responsável por estabelecer o arco elétrico e fornecer o metal de adição para a solda. Uma escória líquida de densidade menor que a do metal líquido é formada pelos resíduos de revestimento do eletrodo e pelas impurezas contidas no metal de base e cria uma camada que protege o cordão recém soldado de contaminação atmosférica e funciona como uma camada isolante que auxilia no resfriamento mais lento da poça de fusão evitando maior fragilização da solda. O revestimento do eletrodo também exerce funções importantes no processo, como a de facilitar a ionização e estabilizar o arco, formar uma proteção gasosa contra a atmosfera em torno do arco e da poça de fusão, fornecer elementos de liga, elementos desoxidantes, dentre outros. Ver processo detalhado (Figura 2).

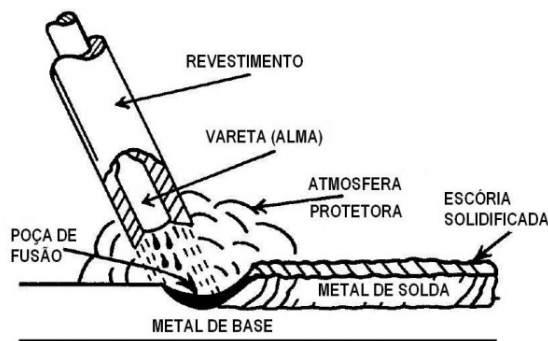


Figura 2 - Processo ER (Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB, 2005)

O processo de soldagem com eletrodo revestido pode ser utilizado para soldar em todas as posições, a maioria dos aços e alguns metais não ferrosos, bem como para a deposição de metal de adição para se obter as propriedades químicas e mecânicas ou as dimensões desejadas, sendo possível a soldagem de materiais dissimilares.

O fornecimento de energia elétrica pode ser tanto por corrente alternada como por corrente contínua, com o eletrodo ligado no polo positivo (CCEP), ou no polo negativo (CCEN).

As vantagens do processo consistem na simplicidade, portabilidade e baixo custo do equipamento, no fato de o metal de adição e os meios de proteção durante a soldagem serem fornecidos pelo próprio eletrodo revestido, na grande flexibilidade de aplicação e na possibilidade de soldagem em todas as posições (o que é muito importante para reparos onde não se pode movimentar a peça ou estrutura). É menos sensível a correntes de ar do que processos que utilizam proteção gasosa, ocupa pouco espaço físico e pode ser utilizado em áreas de acesso limitado. Existe uma extensa variedade de eletrodos comerciais, sendo facilmente encontrados. É um dos



processos de soldagem mais utilizados, particularmente na produção de cordões curtos, em trabalhos de manutenção e reparo e em trabalhos em campo.

O processo, no entanto, possui algumas limitações. A alimentação do eletrodo não é contínua, apresenta baixas taxas de deposição quando comparado com o processo GMAW e um fator de operação baixo. Ligas de baixo ponto de fusão, tais como chumbo, estanho e zinco e suas ligas não são soldados por este processo devido à intensidade do calor do arco ser muito alta para esses materiais, não é adequado para metais reativos como titânio e zircônio, pois a proteção proveniente da queima do revestimento não é adequada para evitar a contaminação da solda pelo oxigênio. A corrente a ser utilizada no processo é limitada para não superaquecer o eletrodo e não danificar o revestimento. Produz escória, exigindo uma limpeza profunda após a soldagem, é essencialmente um processo manual e de baixa produtividade. Existe um desperdício de eletrodos com perdas de 30% a 35%, proveniente do toco junto com a parte descascada do eletrodo, tocos longos descartados pelo soldador ao final de uma operação e ao manuseio errado, podendo danificar o revestimento. Devido a absorção de umidade proveniente do ambiente, é necessário armazenar os eletrodos em local adequado e realizar ressecagem.

### **2.1.2. Escolha do tipo de corrente**

O tipo de corrente empregado no processo afeta as dimensões e a forma da poça de fusão, a estabilidade do arco e a forma como o material de adição é transferido.

CC: Melhor estabilidade do arco e transferência metálica mais suave.

CA: Minimização do sopro magnético e menor custo do equipamento (transformador).

A escolha do tipo de corrente depende do tipo do eletrodo, alguns eletrodos podem ser usados só em CC, enquanto os outros em CC e CA. Caso o eletrodo permita a utilização tanto em CC quanto em CA, a decisão vai depender do tipo de aplicação. Aplicações menos responsáveis (menos críticas) podem ser feitas com CA. Soldagem com eletrodos de pequeno diâmetro e utilizando baixa corrente, soldagem na posição vertical e sobre cabeça, e soldagem de chapas finas devem ser feitas com o uso de CC.

Alguns parâmetros devem ser observados:

- Seleção do eletrodo - o uso de uma fonte de corrente contínua permite o emprego de uma maior faixa 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.

- Posição de soldagem - como CC pode ser operada a correntes de soldagem mais baixas, é mais adequada para a soldagem nas posições sobrecabeça e vertical que a soldagem com CA.
- Sopros magnéticos - quando se solda com CC, campos magnéticos são originados. 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.

### 2.1.3. Escolha da polaridade

A polaridade se refere à conexão do porta-eletrodos em relação aos terminais da fonte que fornece corrente contínua. O efeito da polaridade pode ser observado na forma e nas dimensões da poça de fusão, no modo de transferência do metal de adição e na estabilidade do arco.

Quando utiliza o eletrodo na polaridade positiva o arco é mais estável, os cordões são mais regulares e a penetração é maior. Quando o eletrodo é utilizado na polaridade negativa a penetração é menor, porém a taxa de fusão do eletrodo é maior (Figura 3). Em corrente alternada as características são intermediárias, mas a estabilidade do processo é pior que nos ambos casos. A vantagem da corrente alternada é evitar o sopros magnéticos (deflexão do arco voltaico devido a forças eletromagnéticas), porém é recomendada para eletrodos de grandes diâmetros e para altas correntes, onde os efeitos do sopros magnéticos são mais pronunciados.

No entanto é importante ter em mente que o tipo de revestimento pode alterar o comportamento do processo em relação à polaridade, sendo sempre ideal verificar as indicações do fabricante no catálogo.

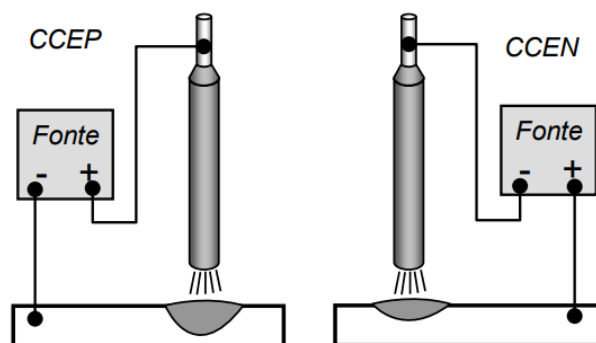


Figura 3 – Efeito da polaridade na geometria da poça de fusão (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

#### **2.1.4. Escolha do comprimento do arco**

Comprimento do arco é distância da ponta do eletrodo ao metal de base. Na soldagem manual, o controle do comprimento do arco é feito pelo soldador, demandando habilidade, conhecimento e experiência. A manutenção de um comprimento do arco adequado é fundamental para a obtenção de uma solda aceitável. Um comprimento muito curto pode causar a extinção do arco e grudar o eletrodo na poça fundida. Um comprimento muito longo causa um arco sem direção e concentração, dissipando muito calor para o ambiente, gerando um grande número de respingos e uma proteção deficiente. O comprimento do arco correto em uma aplicação depende do diâmetro do eletrodo, do tipo de revestimento, da corrente e da posição de soldagem. De forma geral, o indicado é manter o menor arco possível desde que haja uma boa estabilidade do mesmo.

#### **2.1.5. Escolha da velocidade de soldagem**

A velocidade de soldagem adequada deve produzir um cordão com boa aparência e boa penetração. O arco deve ser mantido ligeiramente à frente da poça de fusão. Se a velocidade for excessiva, o resultado é um cordão estreito com um aspecto superficial inadequado, com possibilidade de mordeduras e descontinuidades, penetração inadequada e escória de difícil remoção. Velocidades muito baixas resultam em um cordão largo, muito convexo, reforço excessivo e penetração reduzida. Quanto menor a velocidade de soldagem, maior o aporte térmico, maior a zona termicamente afetada e menor a taxa de resfriamento do material.

#### **2.1.6. Escolha da orientação do eletrodo**

A orientação do eletrodo em relação à junta a ser soldada é importante na qualidade da solda. Orientação imprópria pode resultar em aprisionamento de escória, porosidade e trincas. Sua seleção depende do tipo e diâmetro do eletrodo, da posição de soldagem e da geometria da junta.

Eletrodo puxando a poça de fusão: eletrodo apontado na direção oposta à direção de soldagem, conhecida também como Técnica de arraste. Essa técnica garante um cordão mais estreito e maior penetração uma vez que força a poça para trás e funde melhor o material de base.

Eletrodo empurrando a poça de fusão: eletrodo apontado na mesma direção de soldagem, conhecida também como Técnica do avanço. O cordão fica mais largo e com baixa penetração, ideal para chapas finas.

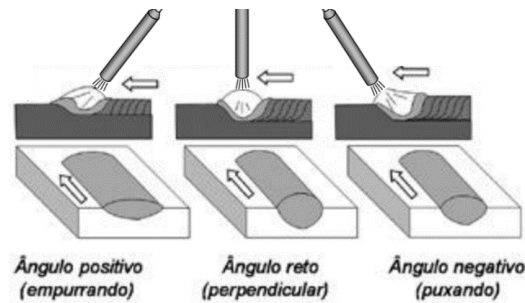


Figura 4 – Efeito da orientação do eletrodo na geometria da poça de fusão (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

### 2.1.7. Posições de soldagem

É possível utilizar soldagem por eletrodo revestido em todas as posições (Figura 5), desde que as variáveis do processo sejam escolhidas corretamente. Sempre que possível é desejável escolher a posição plana, pois esta garante maior facilidade ao processo.

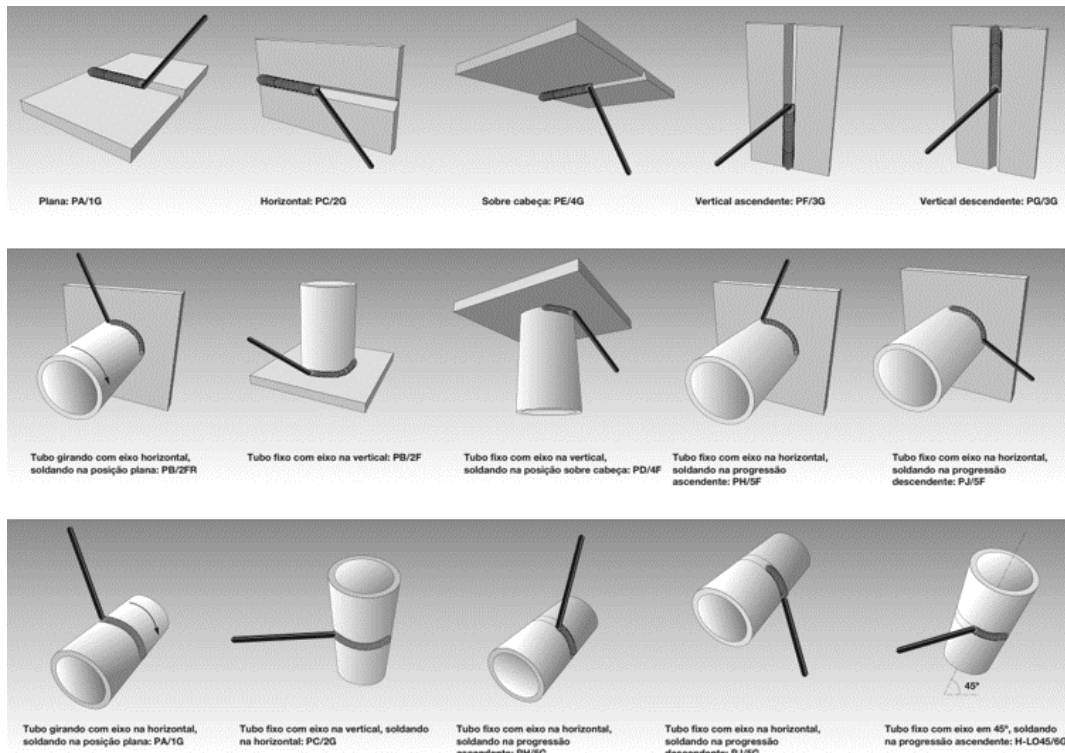


Figura 5 – Posições usuais de soldagem (Cartaz: Posições de soldagem ISO e ASME – ESAB)

## 2.2. Fontes de Energia

Uma fonte de energia para soldagem a arco deve produzir saídas de corrente e tensão a níveis e com características adequadas para o processo de soldagem (baixa tensão e alta corrente), permitir o ajuste adequado dos valores de corrente e/ou tensão para aplicações específicas, controlar a variação e a forma de variação dos níveis de corrente / tensão de acordo com os requerimentos do processo de soldagem e aplicação, estar em conformidade com normas e códigos relacionados com a segurança e funcionalidade, apresentar resistência e durabilidade a ambientes fabris com instalação e operação simples e segura.

A soldagem com eletrodos revestidos pode empregar tanto corrente alternada quanto corrente contínua, porém em qualquer caso a fonte selecionada deve ser do tipo corrente constante (Figura 6). 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.



Figura 6 – Característica estática da fonte de corrente constante (Prof. Paulo J. Modenese - Fontes de energia para soldagem a arco – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - 2009)

Preferencialmente a tensão em vazio do equipamento de soldagem deve ficar na faixa de 50 V a 100 V. Quanto maior for a tensão em vazio, maior será a facilidade de abertura do arco.

A corrente contínua confere melhor estabilidade ao arco. Podendo ser CC+ ou CC-. Na corrente alternada não existe polaridade definida. Há uma tendência a maior instabilidade do arco.

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 tanto corrente contínua e corrente alternada e podem ser portáteis.

Algumas fontes possuem a função de *Hot Start*, que consiste no aumento do valor de corrente de soldagem em 30% a 50% nos 0,5 a 1,0 segundos iniciais da operação (Figuras 7 e 8).

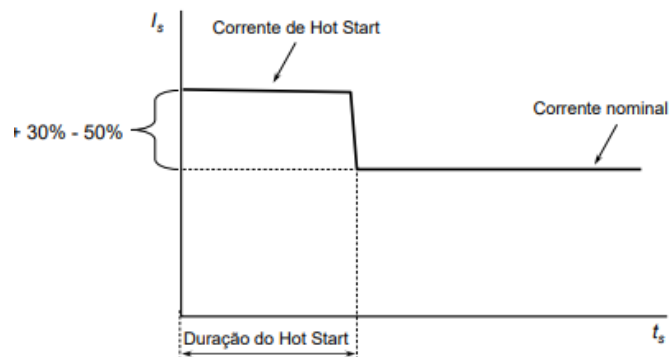


Figura 7 – Hot Start (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

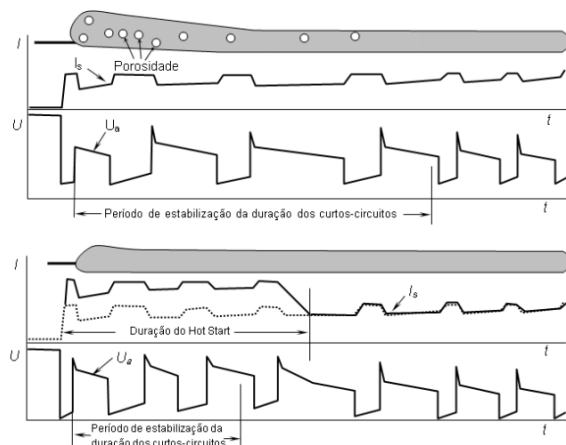


Figura 8 – Efeito do Hot Start sobre a porosidade (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

Esta função facilita a abertura do arco sem colagens do eletrodo. Além disso, melhora-se a geometria da parte inicial do cordão (sem formar um reforço excessivo). Também se reduz a porosidade no início do cordão.

## 2.3. Eletrodo Revestido

Eletrodos revestidos são constituídos por uma alma metálica, normalmente do mesmo material de base a ser soldado, e o revestimento. A alma metálica tem como funções conduzir a corrente elétrica e fornecer metal de adição para a junta, deve ser fabricada de forma a manter os teores de fósforo e enxofre muito baixos evitando assim a fragilização no metal de solda. A matéria prima para a alma é chamada de fio-máquina e é um fio laminado a quente e embobinado, passando posteriormente por um processo de trefilação a frio até o diâmetro adequado do eletrodo, retificado e cortado no comprimento adequado. Os eletrodos são fabricados com comprimentos que possibilitem a soldagem manual de forma eficiente e que não atrapalhe o posicionamento do soldador, também não podem ser muito longos para evitar seu aquecimento excessivo que pode danificar o revestimento e degradar suas propriedades, levando a descontinuidades que podem se tornar defeitos.

Os componentes do revestimento são cuidadosamente pesados, misturados a seco e então é adicionado o silicato de sódio e/ou potássio em forma de mistura húmida que é compactada em um cilindro e entra em uma prensa extrusora. O revestimento é extrudado sobre as almas metálicas que são alimentadas através da prensa extrusora a uma alta velocidade. O revestimento é então retirado da extremidade do eletrodo para garantir a área de contato elétrico, é nivelado à alma na outra extremidade e chanfrado para propiciar a abertura do arco. Depois de prontos, os eletrodos são identificados com as marcas do fabricante e sua classificação, feito isso são mandados para o forno de secagem, passando por um ciclo de aquecimento controlado para assegurar a umidade adequada antes da embalagem.

Durante a fabricação é de extrema importância que se garanta a uniformidade na espessura do revestimento e na concentricidade da alma do eletrodo. Caso essa uniformidade não seja alcançada o processo fica prejudicado, uma vez que se forma uma “unha” na cratera do revestimento, que interfere no direcionamento do fluxo do arco, podendo causar cordões inconsistentes, proteção deficiente e falta de penetração. O efeito da excentricidade pode ser observado a seguir (*Figura 9*).

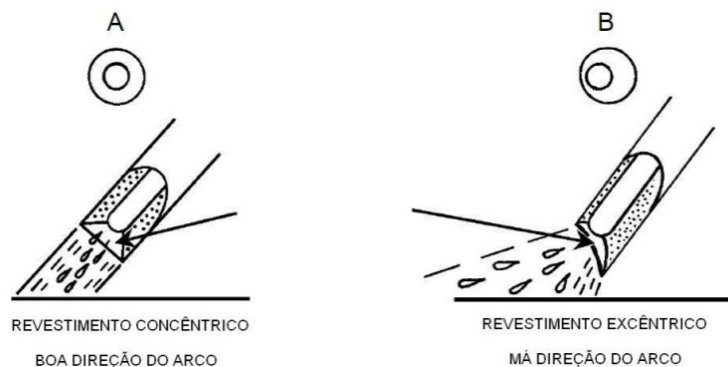


Figura 9 – Efeito da excentricidade da alma do eletrodo (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

### 2.3.1. Funções do Revestimento

Os revestimentos são usualmente feitos a partir de silicato de sódio e silicato de potássio e sólidos granulados que darão as características de cada revestimento. Materiais cristalinos como rutila, quartzo e mica são comumente utilizados. A rutila ou dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) é largamente empregada 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 a gota metálica dos gases atmosféricos, como o oxigênio e o nitrogênio quando ela está sendo transferida através do arco, e enquanto está no estado líquido. Essa proteção é imprescindível para garantir a integridade do metal de solda, minimizando os poros, e mantendo a resistência e a ductilidade adequadas. Devido as altas temperaturas presentes no arco, o nitrogênio e o oxigênio reagem facilmente com o ferro e formam nitretos e óxidos que, se presentes acima de uma concentração crítica, causarão fragilidade e porosidade. O oxigênio pode ser removido com o uso de desoxidantes, mas o nitrogênio uma vez no metal de solda é difícil de prever e controlar seu efeito. Para evitar essa contaminação usa-se no revestimento materiais que geram gases durante soldagem e produzam a atmosfera protetora, expulsando a atmosfera circundante do arco e do metal fundido.

**Estabilidade do arco:** garante a abertura fácil do arco, uma queima suave mesmo a baixas correntes e pode ser mantido empregando-se adequadamente um arco longo ou curto.

**Adição de elementos de liga ao metal de solda:** elementos como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e cobre podem ser adicionados ao cordão de solda através da composição do revestimento. Geralmente é necessário adicionar elementos de liga no cordão de solda para garantir propriedades adequadas como resistência ao impacto em baixas temperaturas, ductilidade, propriedades de escoamento e resistência mecânica, e também a adição de elementos desoxidantes como manganês e silício para controlar a formação de óxidos durante o processo de soldagem.

**Direcionamento do arco elétrico:** o uso correto de aglomerantes adequados garantem o formato da cratera que direciona o arco elétrico garantindo direcionalidade e penetração.

**Produção de escória:** a escória tem como função fornecer proteção à poça de fusão e ao cordão recém soldado contra a atmosfera, absorver impurezas que são levadas à superfície aprisionando-as, e reduzir a velocidade de resfriamento do metal



fundido permitindo o escape de gases e amenizando tensões residuais. A escória também controla a geometria do cordão de solda.

Características da posição de soldagem: a soldagem fora de posição é auxiliada pela adição de ingredientes no revestimento, principalmente compostos de titânio. A tensão superficial e a temperatura de solidificação da escória são os principais fatores que possibilitam um eletrodo ser empregado na soldagem fora de posição.

Isolamento da alma: o revestimento também possui a função de isolar eletricamente e termicamente a alma do eletrodo, servindo como proteção contra a abertura do arco pelas laterais, curtos-circuitos acidentais e perda de calor, aumentando também a segurança do soldador.

### **2.3.2. Composição dos revestimentos**

As propriedades discutidas anteriormente são provenientes dos elementos adicionados à composição dos revestimentos, para cada aplicação específica o revestimento deve conter a quantidade adequada de cada tipo de elemento. A seguir está a classificação dos tipos de ingredientes utilizados nos revestimentos.

Elementos de liga: elementos como molibdênio, cromo, níquel, manganês, vanádio e outros que são adicionados para adequar as propriedades mecânicas do cordão soldado.

Aglomerantes: são utilizados como aglomerantes silicatos solúveis como os de sódio e potássio. A função desses silicatos é formar uma massa que mantenha unidos todos os componentes do revestimento e que possa ser extrudada e secada no forno. Após passar pelo forno o revestimento deve possuir uma resistência que seja capaz de manter a cratera durante a soldagem e que não se fragmente, trinque ou lasque facilmente com o manuseio. Os aglomerantes também são não-inflamáveis, evitando decomposição prematura.

Formadores de gases: são utilizados carboidratos, hidratos e carbonatos, como a celulose, os carbonatos de cálcio e de magnésio, e a água quimicamente combinada como a encontrada na argila e na mica. Nas temperaturas de soldagem esses materiais liberam dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e vapor d'água (H<sub>2</sub>O).

Estabilizadores do arco: materiais estabilizantes são os compostos de titânio, potássio e cálcio. Tais materiais geram um caminho condutor que facilita a continuidade de um arco elétrico uma vez que ele é formado.

Formadores de fluxo e escória: ingredientes como sílica e magnetita são empregados principalmente para encorpar a escória e conferir propriedades como viscosidade, tensão superficial e ponto de fusão.

Plasticizantes: é comum empregar elementos plasticizantes e lubrificantes para facilitar a extrusão dos eletrodos.

### 2.3.3. Tipos de revestimento

Os revestimentos podem ser classificados em quatro tipos, celulósicos, rútfílicos, básicos e de altíssimo rendimento.

Celulósico - O revestimento celulósico apresenta as seguintes características:

- Elevada produção de gases resultantes da combustão dos materiais orgânicos (principalmente a celulose), sendo os principais gases gerados: CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (vapor);
- Alto nível de Hidrogênio depositado, proveniente da umidade absorvida na celulose e no silicato, aumentando o risco de trinca por Hidrogênio;
- Não indicado onde são exigidos altos níveis de resistência mecânica, em estruturas muito constringidas e/ou cujo material seja susceptível a trincas;
- Não devem ser ressecados;
- Grande quantidade de substâncias orgânicas inflamáveis no revestimento;
- Forma uma atmosfera redutora responsável pela proteção do metal fundido da atmosfera ambiente;
- Solda de alta penetração;
- Forma pequena quantidade de escória e de fácil destacabilidade.
- Alto volume de respingos e acabamento ruim;
- Ideal para soldar fora da posição plana;
- Muito utilizado em tubulações na progressão descendente;
- Operando em CC+, obtém-se transferência tipo spray.

Rútfílico - O revestimento rútfílico apresenta as seguintes características:

- Consumível de uso geral;
- Revestimento a base de TiO<sub>2</sub> (mais de 50%);
- Alta estabilidade de arco;
- Excelente acabamento, cordão pouco convexo (alta molhabilidade) e reduzida geração de respingos;
- Menos suscetível às chapas sujas;

- Média penetração;
- Escória de rápida solidificação, facilmente destacável;
- Escória ácida (alto teor de óxidos na solda);
- Aplicados em todas as posições;
- Soldagem de materiais com elevado teor de carbono susceptíveis às trincas;
- O metal de solda pode apresentar um nível de hidrogênio alto (até 30 ml/100g);
- Indicados para a execução de cordões curtos em aços de baixo teor de carbono, em soldagens de ângulo e em chapas finas;
- Não são indicados para a soldagem estrutural onde são exigidas alta tenacidade e resistência;
- São muito pouco sensíveis à umidade;
- 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 mecânicas e metalúrgicas 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;
- Recomendado para soldagem de aços de baixa soldabilidade.
- Indicado para aplicações críticas, para soldagem de grande espessura e de elevado grau de travamento.
- O desempenho durante a soldagem é inferior aos demais tipos de eletrodos.
- Requer ressecagem a temperaturas relativamente altas (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 diminui a ocorrência de mordeduras;
- Possibilidade de soldar por gravidade (arraste);

- Reduz a tenacidade do metal de solda.

### 2.3.4. Classificação dos eletrodos

A especificação da AWS foi desenvolvida por um comitê composto de membros que representam os fabricantes de consumíveis, usuários da indústria de soldagem e membros independentes de universidades e laboratórios. Os eletrodos são classificados com base nas propriedades mecânicas do metal de solda, no tipo de revestimento, na posição de soldagem, e no tipo de corrente (Figuras 10 – 13).

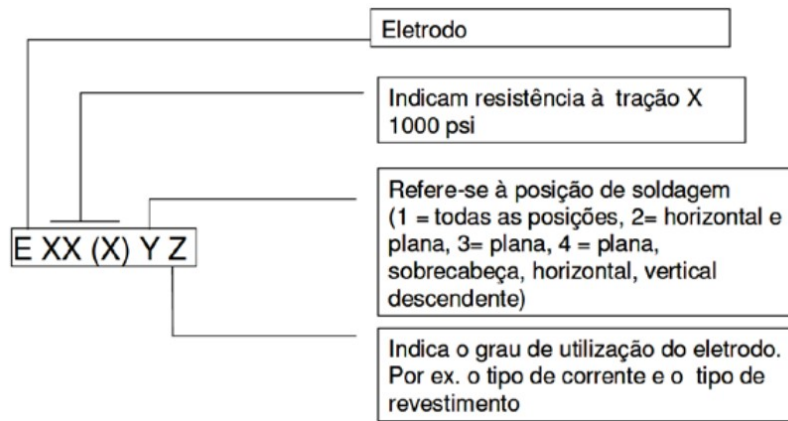


Figura 10 – Classificação de eletrodo revestido para aço ao carbono (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

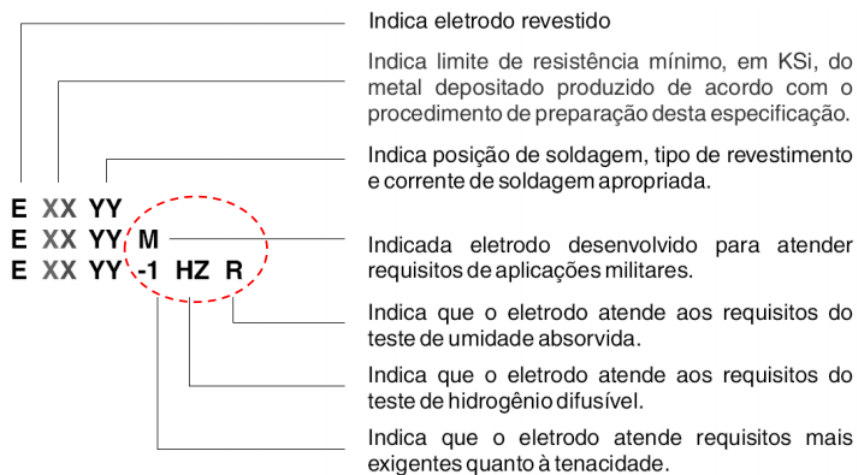


Figura 11 – Dígitos especiais na classificação de eletrodos revestidos (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

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

Figura 12 – Características das classes de eletrodos revestidos (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

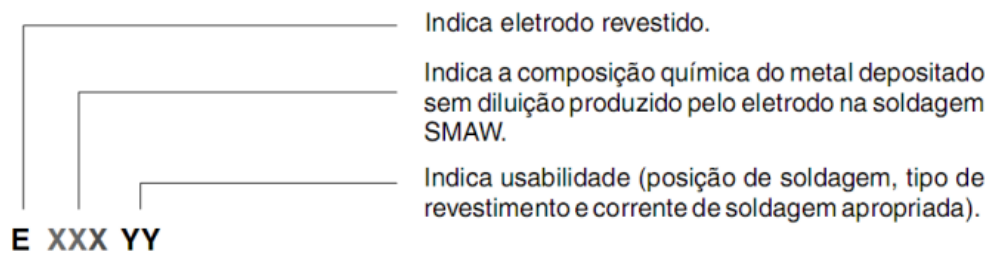


Figura 13 – Classificação de eletrodos revestidos para aços inoxidáveis e outras classes (Apostila de Eletrodos Revestidos - ESAB)

### 2.3.5 Seleção do Eletrodo Adequado

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. Com 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.

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.

Eletrodos E6012 possuem vários nomes comuns. Na Europa são chamados de eletrodos rútilicos. O revestimento contém grandes quantidades do mineral rutilo (dióxido de titânio,  $TiO_2$ ). 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.

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.

Eletrodos E6013 também contêm um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo -  $TiO_2$ ) 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). Foram originalmente desenvolvidos para apresentar baixa penetração e cordões de solda planos. 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.

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 E7014 que com o E6013.

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.

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+.

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.

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. 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.

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-. 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).

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.

Eletrodos inoxidáveis podem ter tipos diferentes de revestimento: básico, rutilico ou um tipo misto rutilico-básico. As diferenças entre eletrodos básicos inoxidáveis e eletrodos rutilicos inoxidáveis não são as mesmas se comparadas com eletrodos de aço carbono básico e rutilico.

Eletrodos E308 são recomendados para aços inoxidáveis de baixo teor de carbono, para a união ou revestimento principalmente do grupo de Aços Inoxidáveis AISI 304-304L, aços de difícil soldagem e juntas de materiais dissimilares aço carbono e aço inoxidável com alta resistência à corrosão Inter cristalina. Excelente desempenho, arco suave, escoria de fácil remoção ou auto destacável, cordão com ótimo acabamento, apresenta elevada resistência ao aparecimento de trincas. Principais Características: Eletrodo de aço inoxidável de revestimento Rutilico; pode ser soldado tanto em AC como CC; excelente soldabilidade, fácil controle de arco; baixa suscetibilidade a trincas a quente; resistente a corrosão intergranular.



## 2.4. Manuseio de Eletrodos Revestidos

A armazenagem dos eletrodos revestidos deve seguir alguns procedimentos e cuidados para que não haja o comprometimento de suas características, principalmente os eletrodos básicos de baixo teor de hidrogênio, que são muito higroscópicos. A umidade excessiva em um eletrodo pode causar porosidade no início ou mesmo em todo o cordão de solda, trincas ao lado e no o cordão, porosidade vermiforme, instabilidade do arco, respingos em grande quantidade e acabamento prejudicado.

Os eletrodos assim que retirados das embalagens originais (latas) deverão ser imediatamente colocados numa estufa apropriada. Idealmente o transporte e armazenagem de eletrodos revestidos deve ser feito por meio de paletes, evitando choques e danos aos mesmos. Dois aspectos deverão ser considerados e bem controlados no local de armazenagem dos eletrodos mesmo em sua embalagem original: a temperatura e a umidade relativa do ar.

A sensibilidade dos eletrodos revestidos à umidade do ambiente implica necessidade de se efetuar uma ressecagem sobre eletrodos úmidos, que sendo negligenciada pode acarretar na degradação do revestimento. 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, além da maior probabilidade de porosidade no cordão.

Os eletrodos celulósicos são pouco higroscópicos e raramente necessitam de ressecagem, além de serem inflamáveis, então a ressecagem é evitada para eletrodos celulósicos. Os eletrodos básicos são os únicos que aceitam ressecagem em temperaturas mais elevadas, permitindo redução drástica no teor de umidade do revestimento sem prejuízo de suas propriedades.

Durante o processo de ressecagem de eletrodos revestidos é importante considerar os seguintes fatores:

- sempre que possível, devem ser seguidas as recomendações do fabricante do consumível;
- ressecagem em fornos adequados, aplicável para eletrodos básicos, de altíssimo rendimento, rúflicos, para ferros fundidos e inoxidáveis;
- controlar adequadamente a temperatura e tempo de ressecagem;
- evitar ressecagem de grandes quantidades;
- não prolongar a ressecagem por tempo além do recomendado pelo fabricante do consumível;
- guardar os eletrodos ressecados em estufas apropriadas;

## 2.5. Técnicas de Soldagem

Acendimento ou “riscamento”: Deve-se evitar marcas de acendimento de arco na superfície do metal de base fora do cordão;

Apagamento e reacendimento do arco para continuar a soldagem: Deve-se realizar a limpeza com picadeira e escova;

Movimento de retorno: É importante para evitar cratera de fim de passe;

Tecimento: Favorece um formato do cordão por facilitar a molhabilidade nas laterais do chanfro (Figura 14).

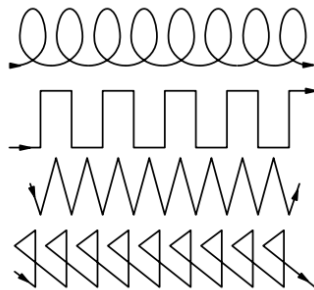


Figura 14 – Padrões de tecimento (Modenesi – Técnica Operatória da Soldagem SMAW - 1)

## 2.6. Descontinuidades e Defeitos Típicos da Soldagem por ER

Toda anomalia que uma junta soldada possa apresentar, que altera ou não o seu desempenho, é considerada uma descontinuidade. Uma descontinuidade pode ser considerada um defeito dependendo das exigências de qualidade e aplicações na qual será utilizada, exigindo assim ações corretivas. Os critérios de aceitabilidade se baseiam na importância do componente, tipo de esforço (estático, dinâmico), condições de serviço (temperatura, meio ambiente), consequências da falha, aspectos de segurança e fatores econômicos. As descontinuidades podem ser dimensionais, estruturais ou por má soldabilidade (AWS – Welding Inspection, 1980).

As descontinuidades dimensionais são facilmente detectáveis em inspeção visual ou dimensional e são caracterizadas por distorção ou desalinhamento, dimensões incorretas ou perfil incorreto do cordão.

As descontinuidades estruturais nem sempre podem ser identificadas facilmente, havendo necessidade de testes e ensaios para serem descobertas. São

descontinuidades estruturais: Porosidade, inclusões de escória, falta de fusão, falta de penetração e mordedura.

As descontinuidades por má soldabilidade também são de difícil identificação, necessitando de testes e análises químicas. Tais descontinuidades são caracterizadas por anomalias nas propriedades químicas e metalúrgicas.

A seguir serão apresentados e discutidos os principais defeitos de soldagem típicos do processo por eletrodo revestido.

**Reforço excessivo:** O aumento do reforço implica em um aumento da convexidade do cordão formando um ângulo mais acentuado no pé da solda, esse ângulo atua como concentrador de tensão podendo levar a falha da junta sob algum carregamento (Figura 15).

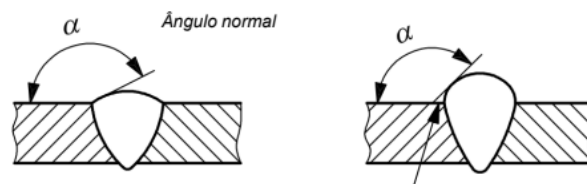


Figura 15 – Reforço Excessivo (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Falta de penetração:** Preenchimento insuficiente do espaço na junta, seja na espessura ou na profundidade. Pode ser causado por baixa corrente, alta velocidade de soldagem ou preparação inadequada da junta (Figura 16).

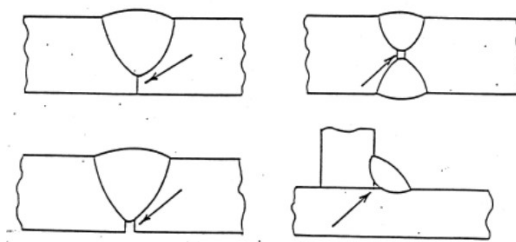


Figura 16 – Falta de preenchimento (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Falta de fusão:** É a não solubilização do metal fundido com o metal de base, apresentando gotas frias em algumas regiões (Figura 17). Pode ser ocasionado pelo desvio do arco por efeito de sopro magnético, limpeza indevida da junta (óxidos, graxa, óleo), movimento incorreto dos eletrodos (não aquecendo as laterais do cordão), comprimento de arco muito pequeno dificultando o acesso e o aquecimento das laterais, alta relação entre material depositado por unidade de comprimento e energia de soldagem.

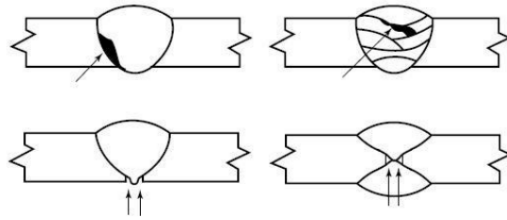


Figura 17 – Falta de fusão (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Inclusões:** São causadas por condução ou inclinação inadequada do eletrodo (sobreposição do metal líquido sobre a escória solidificada), chanfros de pouca abertura ou formatos de cordão muito convexas (dificulta retirada de escória), limpeza incompleta da junta, contaminação da solda com revestimento não fundido de eletrodo, dimensionamento da poça, levando a um resfriamento muito rápido e impedindo o escape da escória (por exemplo, na posição sobrecabeça onde um resfriamento mais rápido é requerido) (Figura 18).

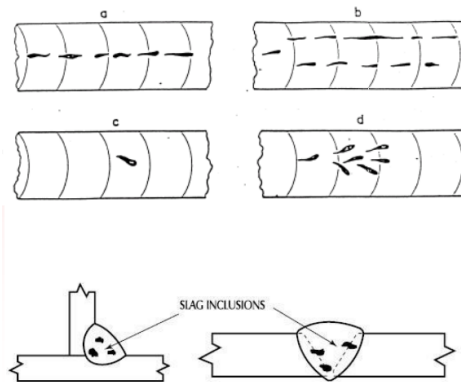


Figura 18 – Inclusões (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Porosidade:** A porosidade consiste em poros de gás encontrados no cordão de solda solidificado. Esses poros podem variar em tamanho e são geralmente distribuídos numa forma aleatória. Entretanto, é possível que a porosidade possa ser encontrada apenas no centro da solda. Os poros podem ser superficiais ou subsuperficiais (Figura 19).

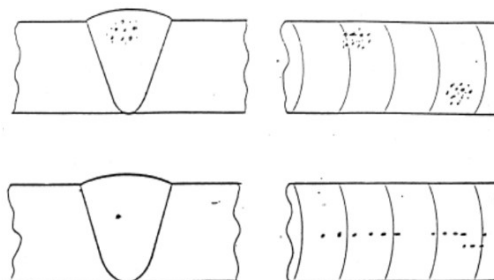


Figura 19 – Porosidade (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

As causas de porosidade são diversas, como o comprimento de arco elevado (deterioração da proteção gasosa), umidade na peça de trabalho, nos fluxos, eletrodos ou nos gases de proteção, limpeza insuficiente de metais impregnados durante o serviço (óleo, graxa, tinta, etc.), contaminação do gás de proteção (ar, água de refrigeração), instabilidade do arco (procedimento errado, polaridade), velocidade de soldagem elevada em relação à intensidade de corrente (resfriamento rápido do metal fundido), formato da junta, com ângulo de abertura estreito, quantidade de desoxidantes não compatível com a de elementos geradores de gases.

**Mordedura:** Mordedura é um defeito que aparece como um entalhe no metal de base ao longo das bordas do cordão de solda. É muito comum em juntas em ângulo sobrepostas, porém pode também ser encontrada em juntas de topo e em ângulo (Figura 20).

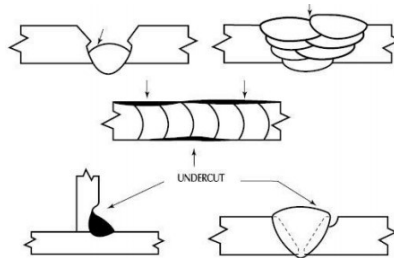


Figura 20 – Mordedura (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

Ocorrem quando a tensão de arco é elevada (grande comprimento de arco), corrente de grande intensidade (podendo gerar furos), parâmetros de soldagem não compatíveis (tipo e diâmetro de eletrodo), sopro magnético ou outra instabilidade, manuseio incorreto do eletrodo (fusão do metal de base sem preenchimento com metal de adição).

**Rechupe de cratera:** É uma cavidade formada no final de um cordão ou na interrupção da soldagem, provocada pela contração de solidificação e falta do metal depositado. Pode ser causada pelo incorreto apagamento do arco não permitindo o enchimento do vazio provocado pela contração da solda e a depressão provocada pela ação do arco (Figura 21).

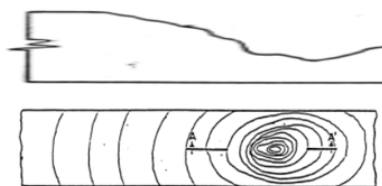


Figura 21 – Rechupe de cratera (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Penetração excessiva e perfuração:** Penetração Excessiva consiste na solidificação do metal além do limite da raiz da solda, manifestado por um excesso de material no verso da solda. Perfuração é vazamento do metal fundido pelo lado oposto a que se está executando a soldagem. As causas possíveis de ambas as discontinuidades estão relacionadas com excesso de corrente, velocidade de soldagem inadequada, comprimento de arco muito curto, abertura da junta exagerada (Figura 22).

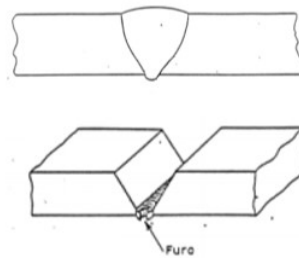


Figura 22 – Penetração excessiva e furo (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Aberturas acidentais de arco:** Pequenos pontos sobre a chapa, com características de rechupes, devido a abertura do arco (Figura 23). São pontos de concentração de tensões ou podem esconder micro trincas (região de fusão e resfriamentos muito rápidos). Causados quando o arco é aceso fora da junta, soldador esbarra na chapa com cabos, conectores ou eletrodos energizados.

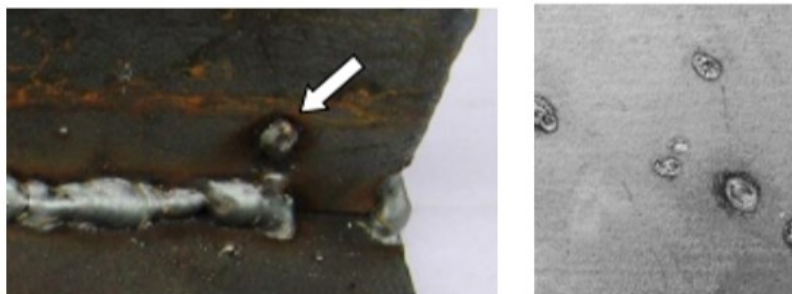


Figura 23 – Aberturas acidentais de arco (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Deposição insuficiente:** Falta de material no cordão de solda (Figura 24).

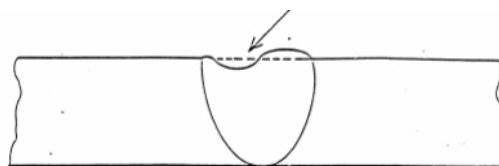


Figura 24 – Deposição insuficiente (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Sobreposição:** Excesso de metal da zona fundida sobreposta ao metal de base, na margem da solda, sem estar fundido ao metal de base (Figura 25). Causada pelo tecimento inadequado, não aquecendo a lateral, condução ou inclinação inadequada do eletrodo, limpeza incompleta da junta, comprimento de arco muito pequeno dificultando o acesso e o aquecimento das laterais.

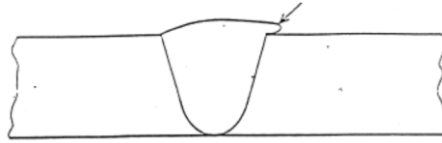


Figura 25 – Sobreposição (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Desalinhamento, embicamento e deformação angular:** Se caracteriza pelo desnivelamento, emborcamento ou empenamento de juntas soldadas de topo ou em ângulo (Figura 26). São causados por acúmulo de tensões residuais que podem ser agravados pela má preparação da peça, excesso de aporte térmico e solda desigual.

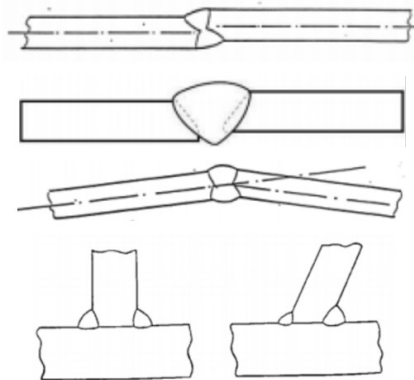


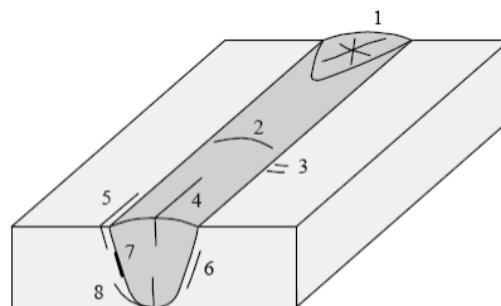
Figura 26 – Desalinhamento (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Respingos:** partículas de metal expelidas durante a soldagem que não fazem parte da solda (Figura 27). São causados por alta corrente, problemas com revestimento, transferência metálica por curto-circuito, indutância da fonte baixa demais e sopro magnético.



Figura 27 – Respingos (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

**Trincas:** São descontinuidades planares caracterizadas por uma geometria com ponta aguda e uma alta razão comprimento/espessura (Figura 28). Podem ser ocasionadas por vários motivos e são iniciadas ou propagadas pela concentração de tensão em regiões susceptíveis. São consideradas um dos tipos mais graves de descontinuidade em uma junta soldada. Formam-se quando tensões de tração se desenvolvem e um material fragilizado, incapaz de se deformar plasticamente para absorver estas tensões.



Classificação do tipo de fissuração de acordo com a localização da trinca<sup>(3-4)</sup>:  
 (1) Fissuração na cratera, (2) fissuração transversal na ZF, (3) fissuração transversal na ZTA, (4) fissuração longitudinal na ZF, (5) fissuração na margem da solda, (6) fissuração sob o cordão, (7) fissuração na linha de fusão e (8) fissuração na raiz da solda.

Figura 28 – Exemplos de trincas (LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

## 2.7. Segurança na Soldagem

Na execução de qualquer atividade relacionada à soldagem, englobando eletrodos revestidos e outros processos, devem ser respeitadas as normas vigentes de segurança, tanto as normas específicas da ABNT quanto as estabelecidas pelo MTE. Fatores como risco de incêndio, choque elétrico, inalação de componentes tóxicos, ruídos excessivos, temperatura de trabalho, entre outros devem ser sempre levados em consideração. Devendo sempre ser observadas as regras relativas ao local de trabalho, relativas ao pessoal e relativas ao equipamento.

Relativamente ao local de trabalho é imprescindível se atentar acerca de risco de incêndio e explosões. Sempre que possível todos os procedimentos de soldagem devem ser realizados em local previsto para essa atividade contando com um sistema adequado de combate a incêndio. Devem ser eliminadas das proximidades possíveis causas de incêndio, como líquidos ou gases inflamáveis (gasolina, tintas, solventes, acetileno, cilindros de gases) e sólidos combustíveis (madeiras, papel, embalagens em geral). Quando a operação for realizada em campo ou locais não previstos para soldagem devem ser instaladas barreiras mecânicas que impeçam a passagem de faíscas, respingos, escória e irradiação térmica e luminosa, visando proteger a integridade de materiais e pessoas que estejam em volta. Nunca soldar recipientes



fechados que não tenham sido devidamente esvaziados, limpos e secados, pois há o risco de explosão ou toxicidade do material no interior.

O local de trabalho deve possuir ventilação adequada de forma a eliminar os gases, vapores e fumos gerados pelo processo (Figura 29).



Figura 29 – Orientações de segurança: Incêndio e Ventilação (Regras para Segurança - ESAB)

As regras de segurança relativas ao pessoal englobam os riscos de choque elétrico, a presença de campos eletromagnéticos, proteção da visão, proteção da pele e proteção da audição.

Os riscos de choque elétrico presentes nas operações de soldagem, podem ser fatais e devem ser evitados. É importante nunca tocar em partes eletricamente carregadas. Todo equipamento deve ser instalado de acordo com o manual fornecido pelo fabricante. Todas as conexões elétricas devem estar apertadas, limpas e secas, o local de trabalho deve permanecer limpo e seco. Ao soldar devem ser retirados quaisquer acessórios metálicos e o soldador deve trabalhar em cima de uma plataforma isolante.

Em toda operação de soldagem devem ser usadas máscaras com vidro ou dispositivo de opacidade adequado ao processo, a tabela a seguir mostra os filtros adequados para cada aplicação.

Em toda operação devem ser usados óculos de segurança com proteções laterais devido o despregamento de escória e partículas devido a contração do metal de solda ou durante a limpeza. Qualquer pessoa dentro de um raio de 20 metros deve estar com a visão protegida.

Não deve também permanecer em local de soldagem com a pele descoberta. O soldador deve utilizar roupa resistente ao calor, como jaqueta, avental, gorro, luvas e perneiras, usar calçado longo e estreito para evitar penetração de respingos e fagulhas, manter bolsos, mangas e colarinhos abotoados.

Relativamente ao equipamento, a fonte deve ser sempre ligada a uma chave geral com tranca e etiqueta de identificação e utilizar um plug para desligamento rápido de emergência. Nunca operar equipamentos defeituosos, não operar com a máquina em ambientes corrosivos ou molhados e após o término da operação, sempre desligar o aparelho e isolá-lo da linha de alimentação.

## **2.8. Procedimentos Gerais Para Uma Boa Soldagem**

Algumas práticas são aconselhadas para garantir um melhor aproveitamento do processo de soldagem por eletrodo revestido, garantindo basicamente qualidade, segurança e minimamente a funcionalidade do processo.

O material a ser soldado deve estar tão limpo quanto possível, livre de escórias, carepas e oxidações em geral. Toda a graxa, óleo e lubrificantes devem ser removidos, mantenha os EPI's limpos, livres de graxas e óleos.

Ao soldar por ambos os lados numa chapa, ou onde não houve penetração total do primeiro passe no material de base, certifique-se que o segundo passe penetrará profundamente no primeiro. Quando o primeiro passe tiver penetrado completamente, ou quando for empregada uma abertura na raiz, é prática comum esmerilhar o outro lado para limpar o metal de solda antes que seja aplicado o segundo passe.

Evite condições de soldagem nas quais o metal de solda fundido passe à frente da poça de fusão. Essa é a principal causa de defeitos de falta de fusão, particularmente na posição vertical com progressão descendente.

Na soldagem multipasse, esmerilhe todos os cordões de solda que apresentarem convexidade excessiva e molhabilidade ruim, para deixá-los com uma superfície mais plana. Remova os resíduos de óxidos ou de escória encontrados no cordão de solda com uma lixa ou com uma picadeira se for depositar outro cordão de solda posteriormente.

Mantenha os instrumentos de medição e indicação (termômetros, amperímetros, voltímetros) devidamente calibrados.

É responsabilidade do soldador se atentar também a fatores que influenciam diretamente no processo, como o controle da velocidade de soldagem, limpeza da junta, bocais, eletrodos e acessórios, fixação correta do cabo terra (negativo) à peça; regulagem dos parâmetros corretos da máquina, controle da poça de fusão, e sempre estar atento a qualquer anormalidade (ruído, respingos, qualidade da solda, etc.) que possa indicar algum mal funcionamento ou procedimento errado.

## 2.9. Vantagens e Limitações do Processo de Soldagem por ER

### Vantagens do processo:

- O equipamento relativamente simples, barato e portátil;
- O metal de adição e a proteção necessária durante a soldagem são fornecidos pelo próprio eletrodo revestido, não necessitando de cilindros de gás;
- É o processo a arco que possui a maior flexibilidade de aplicação;
- A soldagem pode ser realizada em todas as posições, o que possibilita reparos em locais de difícil acesso;
- É menos susceptível a correntes de ar do que processos que utilizam proteção gasosa;
- Ocupa pouco espaço físico;
- Pode ser utilizado em áreas de acesso limitado;
- Os eletrodos são facilmente encontrados e existe uma grande variedade no mercado;
- É apropriado para a maioria dos metais e ligas metálicas comumente encontradas no mercado (aço carbono, aços de baixa, média e alta liga, aço inoxidável, ferro fundido, cobre, níquel e suas ligas e algumas ligas de alumínio);
- É possível realizar a soldagem de materiais dissimilares;
- É um dos processos de soldagem mais utilizados, particularmente na produção de cordões curtos, em trabalhos de manutenção e reparo e em trabalhos em campo;
- É o processo a arco elétrico mais utilizado na soldagem subaquática.

### Limitações do processo:

- Alimentação do eletrodo não é contínua;
- Apresenta baixas taxas de deposição quando comparado com o processo GMAW e um fator de operação baixo;
- Ligas de baixo ponto de fusão, tais como chumbo, estanho e zinco e suas ligas não são soldados pelo este processo, devido à intensidade do calor do arco ser muito alta para estes materiais;
- Não é adequado para metais reativos como titânio e zircônio, pois a proteção proveniente da queima do revestimento não é adequada para evitar a contaminação da solda pelo oxigênio;
- A corrente a ser utilizada no processo é limitada. Uma amperagem excessiva superaquece o eletrodo, danificando o revestimento, provocando mudança nas características do arco e da própria proteção;
- Produz escória, exigindo uma limpeza profunda após a soldagem;
- Essencialmente manual e de baixa produtividade;
- Desperdício dos eletrodos: perdas até 30 a 35%.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

Neste trabalho foi explorada a utilização de eletrodos revestidos para a soldagem de tubos por meio de solda de topo, viabilizando ensaios destrutivos de tração e o corte de amostras para verificar penetração e qualidade da solda, nesta seção serão abordados os procedimentos utilizados.

#### 3.1. Equipamentos Utilizados

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado equipamentos de corte, equipamentos de soldagem para eletrodos revestidos, equipamentos de limpeza e abrasão, sempre com os equipamentos de segurança compatíveis com a operação. A seguir o ilustrativo dos equipamentos usados com uma breve descrição.

Foi utilizada uma serra fita FRANHO FM20 (Figura 30) para realizar os cortes dos corpos de prova nas dimensões corretas e para cortar as amostras soldadas para análise de qualidade.



Figura 30 – Serra Fita FRANHO FM20

Foi utilizado um esmeril de bancada para rebarbação e limpeza dos tubos antes de serem soldados (Figura 31).



Figura 31 - Esmeril de bancada

Foi utilizado um forno para a ressecagem dos eletrodos revestidos antes dos procedimentos de soldagem, procedimento no qual foram seguidas as especificações do fabricante para cada tipo de eletrodo (Figura 32).



Figura 32 – Forno de Ressecagem

Para o processo de soldagem por ER foi utilizada uma fonte retificadora ESAB LHG 425 (Figuras 32 e 33). A corrente de soldagem é ajustada de forma contínua pelo deslocamento de parte do núcleo do transformador principal através de uma manivela, o que permite selecionar de forma contínua o valor necessário.



Figura 33 – Fonte de soldagem ESAB LHG 425

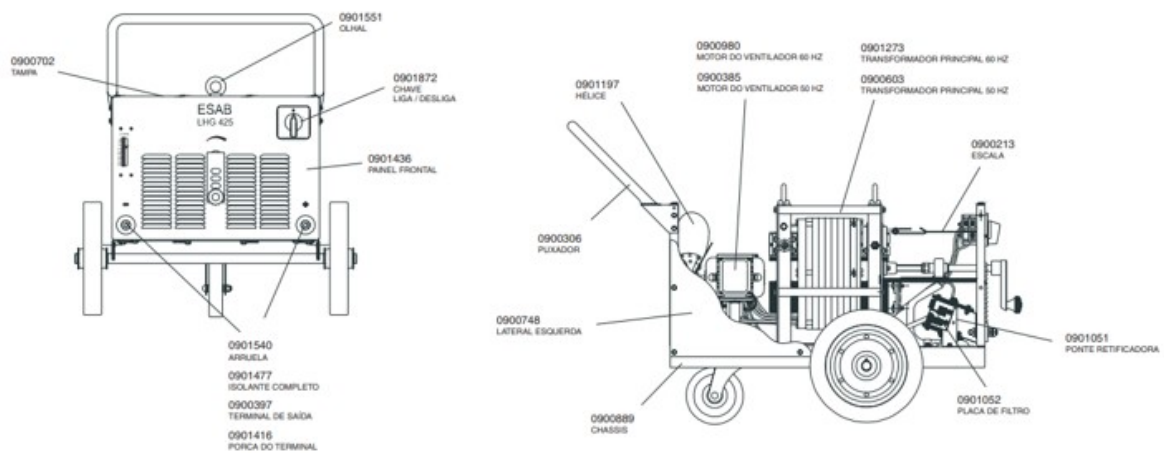


Figura 34 – Esquemático Fonte de soldagem ESAB LHG 425 (Catálogo ESAB)

Escova de aço e picador utilizados para a limpeza durante o processo de soldagem, são essenciais para a efetiva remoção de escória do cordão de solda, de forma a facilitar a abertura do arco a cada trecho e a evitar geração de defeitos devido a presença de escória (Figura 35).

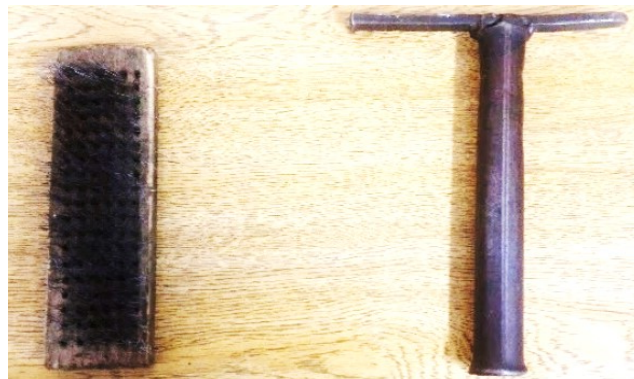


Figura 35 – Escova de aço e picador

Durante todos os processos realizados na fabricação dos corpos de prova foram utilizados os equipamentos de proteção individual de forma a garantir a segurança da operação, entre os equipamentos utilizados estão as luvas de soldagem, avental, macacão, óculos de proteção, sapato fechado e máscara automática para soldagem (Figura 36).



Figura 36 – EPI's

Para finalizar os corpos de prova e permitir a fixação na máquina de tração foram amassadas as extremidades em uma prensa hidráulica de acionamento manual (Figura 37).



Figura 37 – Prensa Hidráulica

Finalmente, foi utilizada uma máquina de tração para a realização dos testes, onde os corpos de prova foram presos verticalmente por garras e foi feito um incremento gradativo de força trativa (Figura 38).



Figura 38 – Máquina para Ensaio de Tração

### 3.2. Consumíveis

Foram utilizados eletrodos revestidos E7018 (básico), E308 (rutílico para inox) e E6013 (rutílico aço carbono), todos com um diâmetro de 2,5 mm (Figura 39).

ELETRODO OK®	METAL DEPOSITADO	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	POSIÇÕES SOLDAGEM	TENSÃO/ TIPO CORR.	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	FAIXA DE CORRENTE (A)
<b>OK® 46.00</b> rutílico ASME SFA 5.1 E6013	C 0,07 Si 0,20 Mn 0,35	Uso geral, todos os tipos de juntas em todas as posições, produzindo cordões de excelente acabamento; soldagem de chapas navais, estruturas metálicas, construções em geral; bom desempenho em chapas galvanizadas, juntas sem preparação e ponteamto. HOMOLOGAÇÕES: ABS, BV, DNV, LR.	L.R. 480-520 MPa A 22-24%		18 - 28 V CA ≥ 50 V CC+ ou -	2 2,5 3,25 4 5 6	300 350 350 350 350 450	50 - 70 60 - 100 80 - 150 105 - 205 155 - 300 195 - 350
<b>OK® 48.04</b> básico ASME SFA 5.1 E7018	C 0,07 Si 0,50 Mn 1,30	Uso geral em soldagem de grande responsabilidade, depositando metal de alta qualidade; todos os tipos de juntas; alta velocidade e boa economia de trabalho; indicado para estruturas rígidas, vasos de pressão, construções navais, aços fundidos, aços não ligados de composição desconhecida, etc. HOMOLOGAÇÕES: ABS, BV, DNV, LR, FBTS.	L.R. 530-590 MPa A 27-32% Ch V (-30 °C) 90-120 J		20 - 30 V CA ≥ 70 V CC+	2 2,5 3,25 4 5 6	300 350 350 450 450 450	50 - 90 65 - 105 110 - 150 140 - 195 185 - 270 225 - 355
<b>OK® 61.30</b> rutílico ASME SFA 5.4 E308L-17	C 0,03 Si 0,80 Mn 0,80 Cr 19,60 Ni 9,90	Deposita aço inox, tipo 19/10 com baixíssimo teor de carbono; soldagem de aços com análise similar; também usado em aços endurecidos ao ar, aços ferríticos e martensíticos, etc; resistente à corrosão intergranular. TAMBÉM ATENDE OS REQUISITOS PARA A CLASSIFICAÇÃO E308-17. HOMOLOGAÇÃO: FBTS.	L.R. 560-600 MPa A 38-42%  Teor de Ferrita FN 3-10		27 - 33 V CA ≥ 52 V CC+	1,6 2 2,5 3,25 4 5	300 300 350 350 350 350	35 - 50 45 - 65 60 - 90 80 - 120 120 - 170 150 - 240

Figura 39 – Eletrodos Revestidos (Catálogo de consumíveis ESAB)



### 3.3. Material de base

O corpo de prova foi fabricado a partir de tubos de aço DIN ST 52 sem costura trefilados a frio com dimensões 25,40 mm (diâmetro externo) X 22,10 mm (diâmetro interno) X 1,65 mm (espessura), todos os tubos vieram de um mesmo lote (Figura 40).



Figura 40 – Material de base

Composição química fornecida pelo fabricante, via análise de lote de controle (Tabela 1):

Composição Química (%)												
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti
0,2	1,51	0,011	0,014	0,25	0,01	0,17	0,04	0,023	0,02	0,005	0,002	0,002

Tabela 1: Composição química do metal de base

Propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante a partir de ensaio de tração realizado em lote de controle, onde LE = Limite de escoamento e LR = Limite de Resistência à Tração (Tabela 2):

Área	LE	LR
128,6 mm <sup>2</sup>	409 Mpa	565 Mpa

Tabela 2: Propriedades mecânicas do metal de base (fabricante)

### 3.4. Soldagem por Eletrodo Revestido

Para o processo de soldagem todos os tubos foram devidamente limpos (retirada de rebarbas, ferrugem e camada de óleo). Após a limpeza minuciosa dos tubos eles foram posicionados e nivelados em uma morsa para serem soldados (Figura 41).



Figura 41 – Posição de soldagem

Devido a geometria do tubo foram feitos pontos e alguns passes até completar o cordão, sempre realizando a limpeza necessária entre os passes.

Foi realizada a ressecagem dos eletrodos de acordo com as faixas de tempo e temperatura estipuladas pelo fabricante (Figura 42).

<b>RESSECAGEM</b>		
Em fornos adequados. Aplicável para eletrodos básicos; para eletrodos de altíssimo rendimento, rutilicos, ferro fundido, inoxidáveis, alumínio, quando necessário; para celulósicos esta deve ser evitada.		
Tipo de eletrodo	Temp. efetiva no pacote de eletrodos (°C)	Tempo real na temp. efetiva (h)
Básicos	325 ± 25	1,5 ± 0,5
Altíssimo rendimento	275 ± 25	1,5 ± 0,5
Rutilicos	80 ± 10	1,5 ± 0,5
Ferro fundido	80 ± 10	1,5 ± 0,5
Inoxidáveis rutilicos	275 ± 25	1,5 ± 0,5
Inoxidáveis básicos	225 ± 25	1,5 ± 0,5
Alumínio*	120 ± 10	1,0

Figura 42 – Ressecagem

As correntes aplicadas na soldagem foram ajustadas de acordo com o eletrodo que seria utilizado, para os rutilicos foi ajustada uma corrente de 60 amperes e para o eletrodo básico foi ajustada uma corrente de 70 amperes, ambas respeitando as faixas de corrente especificadas pelo fabricante e aferidas por meio de um alicate amperímetro.

Após soldados (Figura 43), os corpos de prova foram amassados nas pontas para permitir a fixação na máquina de tração, foram limpos para evitar o deslizamento

e foram feitas ranhuras nas extremidades para ajudar a evitar esse deslizamento (Figura 44).



Figura 43 – Corpos de prova soldados



Figura 44 – Corpos de prova finalizados

Os corpos de prova finalizados ficaram com 400 mm de comprimento, sendo 100 mm de região amassada em cada uma das extremidades e os outros 200 mm efetivos do corpo de prova (100 mm para cada lado da solda, permitindo deformação e distribuição homogênea de tensões no cordão).

Foram fabricados três corpos de prova para cada tipo de eletrodo destinados ao ensaio de tração e mais um corpo de prova de cada eletrodo destinado a um corte transversal para analisar a qualidade da solda. Foi feito também um corpo de prova do tubo sem solda, para comparar com os dados fornecidos pelo fabricante e com os tubos soldados.

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISE DE RESULTADOS**

Foram realizados testes para analisar a facilidade de soldagem com cada tipo de eletrodo para diferentes espessuras do metal de base e alguns formatos de juntas, bem como o tempo de treinamento do soldador para cada situação. Finalmente foram realizados os testes de resistência mecânica que foram objetivados neste trabalho variando o tipo de eletrodo.

#### **4.1 TESTES PRELIMINARES**

Os primeiros testes realizados foram acerca da soldabilidade e da facilidade de utilização de cada tipo de eletrodo por um soldador inexperiente, foram realizados testes em chapas e tubos com os três eletrodos especificados, variando a espessura da parede da chapa, a posição de soldagem, o valor da corrente, o tipo de fonte e o tipo de junta.

O eletrodo básico E7018 se apresentou o de mais difícil manuseio, sendo extremamente complicada a abertura do arco e a estabilidade do mesmo, além de grudar na chapa muito facilmente, gerar muitos respingos e enorme quantidade de fumos. Inviável para a aplicação em tubos se o soldador não for profissional.

Os eletrodos rútilicos são de mais fácil manuseio, fácil de abrir o arco e mantê-lo estável. O E6013 apresenta com facilidade um cordão com geometria aceitável e é mais fácil evitar defeitos. O eletrodo para aços inoxidáveis apresenta uma facilidade ainda maior de manuseio, por ser rútilico apresenta um arco estável e de fácil abertura, e o metal de base apresenta uma molhabilidade excelente garantindo um cordão com boa penetração, geometria aceitável e uma boa estética. Para juntas de topo ambos os eletrodos rútilicos são de fácil manuseio, porém para juntas mais complexas como as juntas em “T” tubulares, os eletrodos E308 apresentam maior facilidade de uso.

#### **4.2 TESTES FINAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS**

Os testes finais consistiram no ensaio de tração dos corpos de prova para análise comparativa de resistência mecânica entre um corpo de prova sem solda e corpos de prova soldados com os três diferentes tipos de eletrodo.

Os corpos de prova foram fixados na máquina de forma a evitar que a tensão se concentrasse nas quinas da região amassada e que a tensão máxima ocorresse na região da solda (Figura 45).

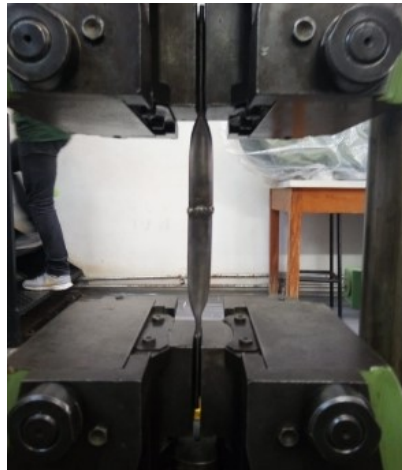


Figura 45 – Fixação para ensaio de tração

Uma vez fixado, a máquina é acionada e aplica uma força que aumenta gradativamente e é mostrada em um visor analógico enquanto um dispositivo mecânico acoplado ao equipamento traça simultaneamente um gráfico de tensão x deformação do corpo de prova (Figura 46).



Figura 46 – Geração de gráficos

Os gráficos apresentam informações de extrema importância, como o limite de escoamento, o limite de resistência à tração, a tensão de ruptura e o alongamento do material. Neste trabalho foi analisado o limite de escoamento como principal critério comparativo da resistência de uma junta soldada, visto que ele pode ser utilizado como critério de falha para um componente, que sempre deve ser projetado para resistir a esforços menores que seu limite de escoamento. Devemos atentar também à influência da solda no limite de resistência e na forma que ocorreu a fratura do corpo de prova.

Utiliza-se como critério de aceitação para uma junta soldada um limite de escoamento que seja, dentro de uma margem de erro, o mesmo do metal de base.

Como critério de qualidade avaliamos o limite de resistência e o local onde ocorreu a falha, partindo do princípio de que é desejável que o metal de base falhe antes da solda para que uma solda seja completamente eficaz (Figuras 47 e 48).



Figura 47 – Corpo de Prova Metal de Base



Figura 48 – Fratura do metal de base

A Tabela 3 traz as informações de todos os resultados dos testes, onde FE = Força aplicada para atingir o Limite de Escoamento; FR = Força aplicada para atingir o Limite de Resistência.

<p>E6013 - Ensaio 1</p> <p>FE = 50.620 N FR = 69.847 N Local da Falha = Metal de base</p> 	<p>E6013 - Ensaio 2</p> <p>FE = 47.088 N FR = 68.278 N Local da Falha = Metal de base</p> 	<p>E6013 - Ensaio 3</p> <p>Ruptura = 43.949 N Local da Falha = Solda</p> 
<p>E308 - Ensaio 1</p> <p>FE = 50.230 N FR = 69.455 N Local da Falha = Solda</p> 	<p>E308 - Ensaio 2</p> <p>FE = 48.657 N FR = 69.062 N Local da Falha = Região amassada</p> 	<p>E308 - Ensaio 3</p> <p>FE = 48.657 N FR = 69.062 N Local da Falha = Solda</p> 
<p>E7018 - Ensaio 1</p> <p>FE = 51.012 N FR = 62.784 N Local da Falha = Solda</p> 	<p>E7018 - Ensaio 2</p> <p>FE = 49.442 N FR = 59.645 N Local da Falha = Região amassada</p> 	<p>E7018 - Ensaio 3</p> <p>FE = 49.442 N FR = 59.645 N Local da Falha = Região amassada</p> 

Tabela 3: Ensaio de tração

Para o E6013, os ensaios 1 e 2 foram satisfatórios, já no ensaio 3 houve uma falha inesperada no cordão de solda com uma carga muito abaixo do limite de escoamento, ao analisar essa falha pode-se observar que nesse corpo de prova haviam muitos defeitos de soldagem, como porosidade, vazios e falta de penetração.

Para o E308, no ensaio 1 ocorreu uma falha no cordão de solda e podemos observar que foi devido a um furo presente no cordão, furo esse que estava encoberto antes do ensaio de tração, mas mesmo com esse furo, o cordão suportou uma carga acima da carga de escoamento do material. No ensaio 2 houve uma falha na região amassada, que é concentradora de tensão, provavelmente o tubo escorregou durante o ensaio propiciando a falha nesse local, porém podemos observar que tanto a carga de escoamento quanto o limite de resistência se encontram no mesmo patamar do metal de base, podendo ser aceito o cordão de solda. No ensaio 3 houve uma falha no cordão de solda que se propagou para o metal de base, ainda assim, as cargas suportadas foram as mesmas do metal de base para escoamento e limite de resistência.

Para o E7018, no ensaio 1 falhou na solda, e esta apresentava inúmeros defeitos como porosidade, inclusões de escória, vazios e falta de penetração, a junta suportou uma carga maior que a de escoamento do metal de base, porém se rompeu abaixo do limite de resistência. Os ensaios 2 e 3 foram inconclusivos pois houve o deslizamento dos corpos de prova durante os testes e com isso a falha ocorreu na região amassada com uma carga muito pequena, devido à grande concentração de tensão nessa região.

A seguir um ilustrativo geral dos corpos de prova após os testes (Figura 49).



Figura 49 – Corpos de prova fraturados



## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÃO**

O presente trabalho mostrou que em caso de reparos em campo, principalmente nas condições de competição do Baja SAE, o processo mais recomendado é o de soldagem a arco por eletrodo revestido, por ser simples, barato, portátil e garantir qualidade desde que feito de forma adequada.

Acerca das propriedades mecânicas das juntas soldadas por eletrodo revestido pode-se concluir que independentemente do tipo de eletrodo analisado, E6013, E308 ou E7018, caso o cordão não possua defeitos, a solda apresentará qualidade e boas propriedades mecânicas garantindo confiabilidade à junta soldada. Considerando então fatores de manuseio descarta-se a utilização do eletrodo básico E7018 para essa aplicação, uma vez que este apresenta grande dificuldade de manuseio. Ambos os eletrodos rútilicos são boas soluções para a aplicação em questão, sendo as principais vantagens do E6013 a facilidade de encontrar no mercado e o baixo custo, já o E308 se destaca pois mesmo sendo mais caro que o E6013 apresenta uma grande facilidade de soldagem inclusive para juntas mais complexas, e até mesmo pessoas sem nenhuma experiência conseguem fazer cordões de solda aceitáveis com pouco tempo de treinamento. Então, para reparos futuros na gaiola do Mini Baja aconselha-se a utilização de eletrodos E308 que garantirão uma boa resistência mecânica, um custo acessível e facilidade de treinamento para quem for executar o processo de soldagem.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se a realização de ensaios comparativos utilizando outros metais de base comuns para gaiolas de Mini Baja, como o SAE 4130 e o SAE, ensaios variando o diâmetro do eletrodo e ensaios utilizando outros processos de soldagem (MIG/MAG e TIG) para aplicação na construção de gaiolas.

## CAPÍTULO 6

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MEDEIROS, V. S., Determinação dos Parâmetros de Soldagem mais Adequados para União de Tubos de Parede Fina pelo Processo de Eletrodo Revestido. 2018. 29p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Regulamento administrativo e técnico Baja SAE BRASIL, acesso em: 25/10/2018 <[http://portal.saebrasil.org.br/Portals/0/PE/BAJA-2018/RATBSB\\_emenda\\_01.pdf](http://portal.saebrasil.org.br/Portals/0/PE/BAJA-2018/RATBSB_emenda_01.pdf)>

FORTES, C., ESAB, Apostila de Eletrodos Revestidos, 2005.

GETMANETS, S.M., Arc Welding Technology – for Carbon and Low Alloy Steels Kiev (Ucrânia), Naukova Dumka, 1983.

QUITES, A.M., DUTRA, J.C., Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico, Florianópolis, EDEME, 1979, pp. 129-171.

SMITH, D., Welding – Skills and Technology, Nova Iorque, Mc Graw-Hill, 1984, pp. 364-419.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., Soldagem – Fundamentos e Tecnologia, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007, pp. 181-203.

Revista Solução. ESAB, Contagem MG, v. 12, 2009.

Revista Solução. ESAB, Contagem MG, Edição Especial ESAB 100 anos, 2005.

World Wide Welding. Svetsaren - ESAB, Göteborg, Sweden, v. 57, 2002.

PONOMAREV, V., Apresentação Soldagem com Eletrodo Revestido, CTA, Laprosolda, FEMEC, UFU.

FORTES, C., ARAÚJO, W., Apostila Metalurgia da Soldagem, — ESAB BR.

JUNIOR, L.G., Apostila Acompanhamento Prático – Processos Usuais de Soldagem II.

ESAB, Apostila, Regras para Segurança em soldagem, goivagem e corte ao arco elétrico.

ESAB, Apostila de Eletrodos inoxidáveis, 2005.