

NIKOLAS GIANOGLOU COELHO

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA MÁQUINA
PARA SOLDAGEM ER PARA AVALIAR A
INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CORRENTE
NA TAXA DE FUSÃO DOS ELETRODOS
REVESTIDOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

NIKOLAS GIANOGLU COELHO

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA MÁQUINA
PARA SOLDAGEM ER PARA AVALIAR A
INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CORRENTE
NA TAXA DE FUSÃO DOS ELETRODOS
REVESTIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC – UFU), como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Materiais e processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

UBERLÂNDIA – MG

2019

NIKOLAS GIANOGLOU COELHO

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA MÁQUINA
PARA SOLDAGEM ER PARA AVALIAR A
INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CORRENTE
NA TAXA DE FUSÃO DOS ELETRODOS
REVESTIDOS**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Maksym Ziberov
Centro Universitário UNA Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meu Deus, Jeová, por todas as oportunidades e chances que tive em minha vida, tenho a plena certeza que sem ele jamais teria nada.

Agradeço aos meus pais, Fabio Cintra Coelho e Nicula Maria Gianoglou Coelho por me apoiarem de todas as formas durante essa longa jornada. Agradeço também a toda minha família que foi tão prestativa durante esses anos e aos meus colegas de classe que me ajudaram direta ou indiretamente.

Agradeço ao Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov pela disposição e ajuda prestados durante todo o trabalho, bem como aos técnicos do laboratório LAPROSOLDA pela ajuda na realização dos testes.

COELHO, N. G. **Avaliação da aplicabilidade da máquina para soldagem ER para avaliar a influência da polaridade da corrente na taxa de fusão dos eletrodos revestidos**. 2019. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

A soldagem com eletrodos revestidos é um importante processo de fabricação e um melhor entendimento dessa área é fundamental. Na literatura, são encontrados muitos trabalhos que comparam a influência da polaridade da corrente de soldagem na taxa de fusão dos eletrodos revestidos. Os testes são feitos utilizando-se um eletrodo por vez na polaridade eletrodo positivo (CCEP) e depois na polaridade eletrodo negativo (CCEN) ou vice-versa. Resultados mostram que o eletrodo na polaridade negativa apresenta maior taxa de fusão. Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de uma máquina para soldagem ER para esta finalidade quando os dois eletrodos são usados ao mesmo tempo, um contra o outro e cada um com sua polaridade. Para isso, a máquina foi adaptada de modo que em um teste 2 eletrodos iguais fossem usados. Foram computados os parâmetros corrente, tensão, tempo, comprimento inicial e final dos eletrodos e foi calculado a taxa de fusão para cada um dos eletrodos (polaridade positiva e negativa). Os resultados mostraram valores contrários ao esperado, pois a taxa de fusão do eletrodo foi maior com o eletrodo na polaridade positiva do que na negativa. Foram feitos novos testes para se avaliar a influência de outros parâmetros, como a posição e o comprimento de arco. Novos resultados sugeriram uma influência muito pequena desses parâmetros. O fato da taxa de fusão do eletrodo com a polaridade positiva ser maior pode ser relacionado à interação dos jatos de plasma, sendo o do eletrodo negativo ser predominante (fato conhecido da literatura) e, assim, repassar um calor adicional na ponta do eletrodo positivo provocando uma fusão mais rápida dele. Concluiu-se que o teste proposto não pode ser usado pois a dinâmica do processo se altera ao serem posicionados um eletrodo contra o outro. Ademais, concluiu-se também que um maior comprimento de arco gera maior perda de calor e portanto, menores taxas de fusão.

Palavras-chave: Eletrodo revestido. Polaridade da corrente. Taxa de fusão.

COELHO, N. G. **Evaluation of the applicability of the covered wire welding machine to study the influence of current polarity in the fusion rate of covered electrodes**. 2019. 39 p. Final paper, Federal University of Uberlândia.

Abstract

Welding with coated electrodes is an important manufacturing process and a better understanding of this area is fundamental. In the literature, many studies comparing the polarity influence of the welding current on the melting rate of coated electrodes are found. The tests are done using one electrode at a time in the positive electrode polarity (CCEP) and then in negative electrode polarity (CCEN) or vice versa. Results show that the electrode in the negative polarity has a higher fusion rate. This work aimed to evaluate the use of an ER welding machine for this purpose when the two electrodes are used at the same time, one against each other and each with its polarity. For this, the machine was adapted so that in a test 2 equal electrodes were used. The parameters of current, tension, time, initial and final length of the electrodes were computed and the melting rate was calculated for each of the electrodes (positive and negative polarity). The results showed values contrary to expected because the electrode fusion rate was higher with the electrode in positive polarity than in the negative polarity. Further tests were made to evaluate the influence of other parameters, such as position and arc length. New results suggested a very small influence of these parameters. The fact that the electrode fusion rate with the positive polarity is higher may be related to the interaction of plasma jets, and the negative electrode is predominant (known fact of the literature) and thus pass on an add heat to the tip of the electrode positive causing a faster fusion of it. It was concluded that the proposed test cannot be used because the dynamics of the process change when an electrode is positioned against the other. Also, it was also concluded that a longer arc length generates greater heat loss and therefore lower fusion rates.

Key-words: Covered electrodes. Current polarity. Fusion rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sentido do jato de plasma. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov	14
Figura 2.2 – Regiões do arco elétrico com as respectivas quedas de tensão: (a) região catódica, (b) coluna de plasma e (c) região anódica. Fonte: Modenesi (2000)	14
Figura 2.3 – Efeito Pinch. Fonte: Modenesi (2000)	15
Figura 2.4 – Detalhes da zona ativa. Fonte: ESAB (2005)	16
Figura 2.5 – Equipamentos para soldagem ER. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov	18
Figura 2.6 – Efeito da corrente de soldagem sobre a taxa de deposição para vários diâmetros de alma. Fonte: Wainer <i>et al.</i> (2004)	22
Figura 2.7 – Efeito da corrente de soldagem sobre a geometria do cordão. Fonte: Wainer <i>et al.</i> (2004)	23
Figura 2.8 – Diferentes configurações de polaridades. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov	24
Figura 2.9 – Influência da polaridade e do tipo de corrente na penetração: (a) polaridade inversa (CC+), (b) polaridade direta (CC-) e (c) corrente alternada (CA). Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov	25
Figura 2.10 – Característica estática da fonte. Fonte: Wainer <i>et al.</i> (2004)	25
Figura 3.1 – Fonte de energia retificadora ESAB LHG 425	28
Figura 3.2 – Amperímetro e multímetro digital	29
Figura 3.3 – Máquina de soldagem ER	29
Figura 4.1 – Regulagem da tensão de referência	31
Figura 4.2 – Tensão de referência x resistor	32
Figura 4.3 – Adaptação da máquina de soldagem ER	33
Figura 4.4 – Ilustração do experimento	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Especificação AWS para ER. Fonte: AWS (2003)	19
Tabela 3.1 – Catálogo ESAB com faixas de corrente recomendadas. Fonte:ESAB (2005).....	30
Tabela 4.1 – Valores de tensão de referência para seleção do comprimento de arco a ser utilizado	32
Tabela 5.1 – Resultados obtidos para testes com eletrodos E6013 e E7018	35
Tabela 5.2 – Resultados para menor comprimento de arco	36
Tabela 5.3 – Resultados para maior comprimento de arco	36

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas

CCEP – Corrente contínua eletrodo positivo

CCEN – Corrente contínua eletrodo negativo

CA – Corrente alternada

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

E6013 – Eletrodo com revestimento rutílico

E7018 – Eletrodo com revestimento rutílico

ISO – *International Organization for Standardization*

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 O arco elétrico de soldagem	13
2.2 Características elétricas do arco	13
2.3 Características magnéticas do arco	15
2.4 Processo de soldagem com ER	16
2.5 Equipamentos	17
2.6 Consumíveis	18
2.7 Parâmetros de soldagem com ER	21
2.7.1 Tensão	21
2.7.2 Corrente	22
2.7.3 Polaridade da corrente	23
2.7.4 Característica estática da fonte na soldagem ER ...	25
2.8 Taxa de fusão de ER	26
3 EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS	28
3.1 Equipamentos utilizados	28
3.2 Máquina de soldar ER	29
3.3 Consumíveis	30
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	35
6 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos mais usados na indústria atualmente e tem amplo campo de aplicação: produtos e estruturas metálicas, aviões e veículos espaciais, navios, locomotivas, veículos ferroviários e rodoviários, pontes, prédios, oleodutos, gasodutos, trocadores de calor, componentes elétricos etc.

Porém, quando a soldagem surgiu, era usada como processo secundário de fabricação por forjamento e fundição. O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a segunda guerra mundial devido à fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008). Atualmente, existem vários processos e técnicas de soldagem e a escolha do processo certo para determinada aplicação deve levar em conta parâmetros como a posição de soldagem, velocidade, penetração, e deposição de material. Outros fatores importantes a serem considerados são o ambiente, produtividade e mão de obra qualificada.

A soldagem pode ser definida como “processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição” (MODENESI, 2000). Em especial, a soldagem com eletrodos revestidos (SMAW) produz a união entre os metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo revestido e a peça que está sendo soldada.

Em um processo com amplas aplicações como a soldagem com eletrodos revestidos é de suma importância o estudo de sua dinâmica e dos fenômenos que ocorrem de modo a compreendê-lo melhor. Dessa forma, é possível torná-lo ainda mais otimizado. Como já mencionado, alguns parâmetros importantes para a soldagem são: corrente, tensão, tipo de eletrodo (básico, rutílico ou celulósico), polaridade da corrente e posição de soldagem. Dentre os vários parâmetros importantes este trabalho se concentrou na polaridade da corrente. Sabe-se que a polaridade da corrente afeta de forma considerável a forma e as dimensões da poça de fusão, modo de transferência de metal de adição e estabilidade do arco. Na literatura, há muitos trabalhos que mostram as

diferenças entra a taxa de fusão do eletrodo na polaridade positiva e polaridade negativa.

Este trabalho tem como objetivo propor um novo teste para verificar a taxa de fusão dos eletrodos revestidos alterando-se a polaridade de corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP) e a polaridade de corrente contínua com eletrodo negativo (CCEN) utilizando uma máquina para soldar ER (Eletrodo Revestido). Nos testes convencionais, um eletrodo é utilizado por vez na polaridade selecionada e então é verificada a taxa de fusão. Resultados mostram que a taxa de fusão é sempre maior com o eletrodo na polaridade negativa. Nesse trabalho, foi utilizada a máquina e foi possível posicionar dois eletrodos, sendo um na polaridade positiva e outro na negativa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O arco elétrico de soldagem

Para fundir os metais que irão ser soldados é necessária uma grande quantidade de calor concentrado. Segundo Modenesi (2000), o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de metais, pois apresenta um conjunto de características que são adequados para esse processo como concentração adequada de energia, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de risco para os operadores.

O arco elétrico pode ser definido como uma descarga elétrica, que se mantém através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma. As faixas de corrente podem variar desde 1000 A (processo de soldagem a arco submerso) até 1A (processo de soldagem com micro plasma). Os valores mais comuns são da ordem de 10 A a 100 A

Na soldagem, em geral, o arco atua entre dois eletrodos, sendo um a própria peça e outro localizado na extremidade de um cilindro (arame, vareta ou eletrodo). Como a área da peça é muito maior que a área do eletrodo, o formato do arco geralmente é cônico sendo seu diâmetro junto à peça maior.

O sentido do jato de plasma no caso da soldagem convencional é sempre do eletrodo para a peça. Segundo simulações e Solodskii *et al.* (2012), a intensidade do jato de plasma com o eletrodo em CCEN é maior que o eletrodo em CCEP. A Figura 2.1 apresenta um esquema e indica o sentido do jato de plasma.

2.2 Características elétricas do arco

As diferenças de potencial entre as extremidades do arco e a corrente elétrica que passa por ele o caracterizam eletricamente sendo que a queda de potencial não é uniforme ao longo do arco. Pode-se distinguir três regiões, conforme ilustrado na Figura 2.2

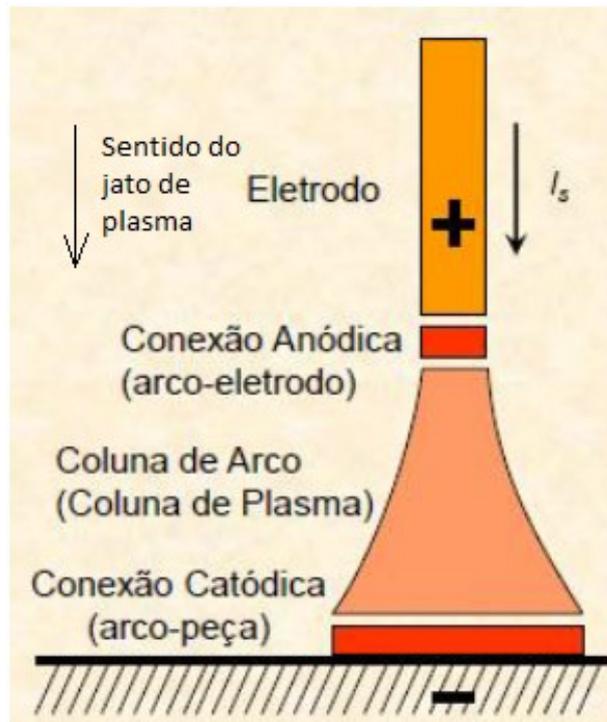


Figura 2.1 – Sentido do jato de plasma. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

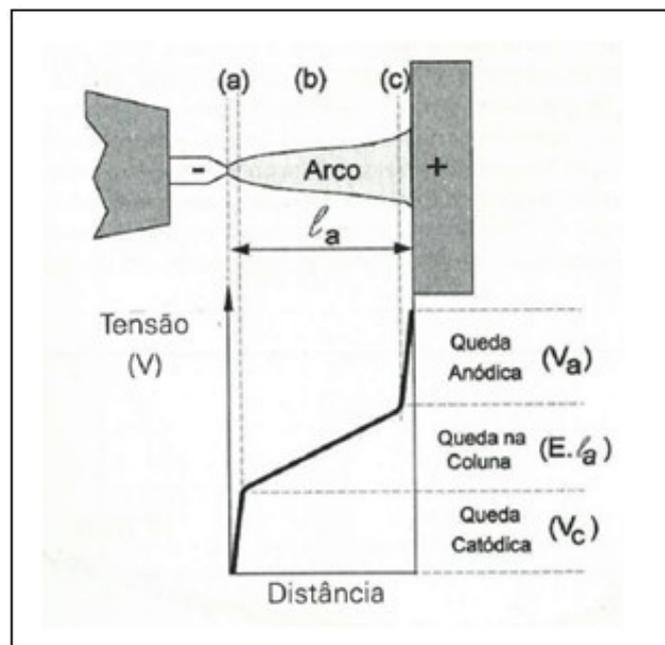


Figura 2.2 - Regiões do arco elétrico com as respectivas quedas de tensão: (a) região catódica, (b) coluna de plasma e (c) região anódica. Fonte: Modenesi (2000)

Nas regiões anódica e catódica, há elevados gradientes térmicos e elétricos. Na coluna de plasma, parte visível e brilhante, os gradientes térmicos e elétricos são mais baixos que nas regiões anteriores. Segundo Modenesi (2000), alguns parâmetros que causam uma variação na diferença de potencial são: comprimento do arco, forma, tamanho e material dos eletrodos, composição e pressão do gás na coluna de plasma e corrente que atravessa o arco, entre outros fatores.

2.3 Características magnéticas do arco

O Arco de soldagem é um condutor gasoso de corrente elétrica sendo muito sensível à influência de campos magnéticos. Como campos magnéticos são criados por cargas elétricas em movimento, em volta do arco há um campo magnético. Se um condutor de comprimento l , percorrido por uma corrente elétrica i , é colocado em uma região onde há um campo magnético B , esse condutor experimenta uma força F , conhecida como força de Lorentz. A força de compressão que o campo magnético induzido pela corrente que passa por um condutor exerce sobre si próprio é importante para a soldagem a arco.

Devido às diferenças geométricas entre o eletrodo e a peça, existe uma diferença de pressão no arco que induz um intenso fluxo de gás do eletrodo para a peça que é independente da polaridade e do tipo de corrente usados, conforme a figura 2.3 apresenta.

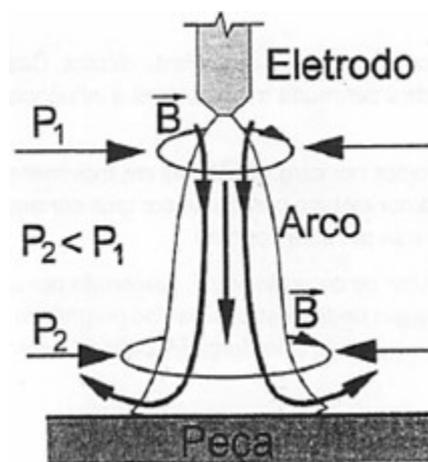


Figura 2.3 – Efeito Pinch. Fonte: Modenesi (2000)

O jato de plasma é importante, pois direciona os gases quentes do arco contra a peça, sendo assim um dos mecanismos responsáveis pela penetração da solda e também confere ao arco elétrico certa rigidez. As forças também são importantes para a transferência metálica porque tendem a estrangular ou apertar (“pinch”) o metal líquido na ponta do eletrodo, contribuindo para a separação do fio sólido. Esse processo é ilustrado na Figura 2.3.

2.4 Processos de soldagem com ER

A soldagem a arco com eletrodos revestidos (SMAW) é um processo que produz a união entre metais pelo aquecimento e posterior fusão destes através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada (MODENESI, 2000). A Figura 2.4 apresenta detalhes da poça de fusão.

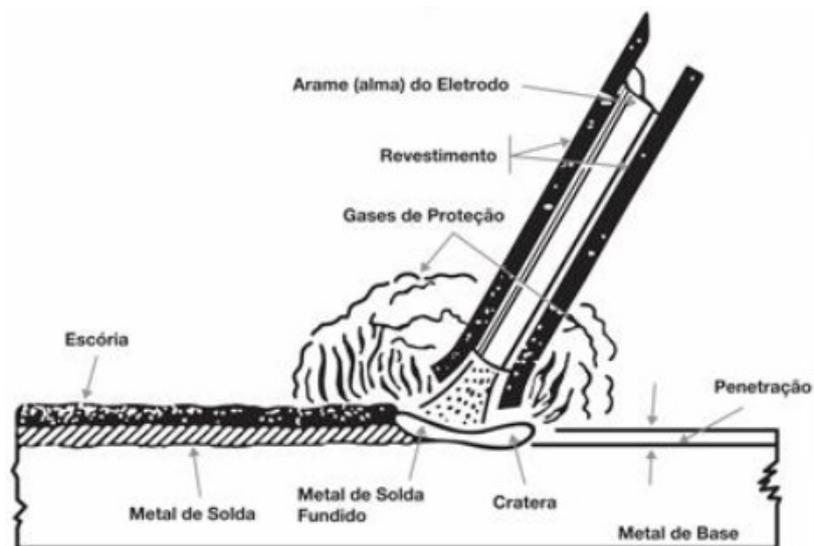


Figura 2.4 - Detalhes da zona ativa. Fonte ESAB (2005)

Mesmo não sendo tão eficiente, o processo com eletrodos revestidos ainda é utilizado no Brasil e em outros países. Esse fato se deve a algumas vantagens do processo, como a possibilidade de um número muito grande de formulações para o revestimento, conferindo ampla versatilidade de ligas a

serem soldadas e de propriedades físicas e químicas. Além disso, é um processo simples e barato, e tem a possibilidade de ser usado em locais de difícil acesso

O eletrodo revestido é formado por uma vareta metálica, chamada “alma” e pode ser fabricado trefilada ou fundida. Essa parte do eletrodo conduz corrente elétrica e fornece o metal que será fundido para o enchimento da junta. O revestimento da alma, uma camada formada por uma combinação de diversos materiais tem, principalmente, as seguintes funções:

- Estabilizar o arco elétrico;
- Ajustar a composição química do cordão, pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- Proteger a poça de fusão e o metal de solda contra contaminação pela atmosfera, através da geração de gases e de uma camada de escória;
- Conferir características operacionais, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e à solda.

A principal desvantagem do processo está relacionada à sua baixa produtividade, quando comparada com outros processos como, por exemplo, eletrodo consumível e proteção gasosa e com soldagem a arco submerso.

2.5 Equipamentos

Os equipamentos de um posto de soldagem manual com eletrodos revestidos compreendem, em geral:

- Fonte de energia;
- Cabos;
- Porta-eletrodo;
- Ferramentas (picadeira, escova de aço, dentre outros);
- Materiais de segurança (máscara, óculos, avental, dentre outros).

Como é o operador que controla o comprimento do arco, o mesmo sofre variações ao longo da solda. Por este motivo a fonte utilizada no processo é do

tipo corrente constante. Os cabos conduzem a corrente elétrica da fonte ao porta eletrodos (cabo de soldagem) e da peça à fonte (cabo terra) podendo ser de cobre ou de alumínio. Devem ser flexíveis para facilitar a operação e serem revestidos por um material isolante. O porta-eletrodo tem a função de prender o eletrodo e energizá-lo. As ferramentas, como picadeira e escova de aço, servem para remover a escória após a solda. A Figura 2.5 apresenta uma ilustração dos equipamentos de soldagem.

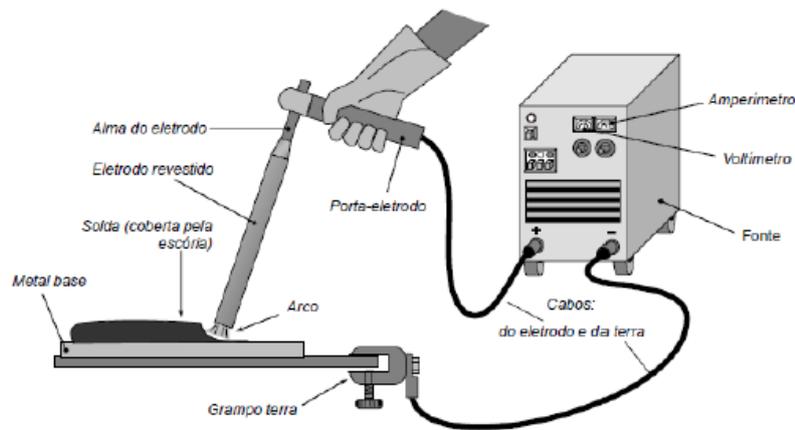


Figura 2.5 – Equipamentos para soldagem ER. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

2.6 Consumíveis

Um eletrodo revestido é constituído pela alma, que é uma vareta metálica, sendo que seu diâmetro pode variar entre 1,5 mm e 8 mm e geralmente tem comprimento entre 23 cm e 45 cm, recoberta por uma camada de fluxo. O tipo do revestimento empregado é muito importante, pois determina as características operacionais dos eletrodos e está relacionado com a composição química e as propriedades mecânicas da solda. Além das funções já citadas do revestimento, outras a serem levadas em conta são:

- Formar uma camada de escória, que protege o cordão de solda da atmosfera;
- Facilitar a remoção da escória;
- Facilitar a soldagem em diferentes posições;

- Dissolver óxidos e contaminações na superfície da junta;
- Reduzir o nível de respingos, fumos e a velocidade de resfriamento das juntas soldadas;
- Possibilitar o uso de diferentes tipos de corrente e polaridade;
- Aumentar a taxa de deposição.

Como não é possível fabricar um eletrodo que atenda todas as funções, os eletrodos comerciais buscam atender mais completamente um conjunto de exigências que seja mais adequado para determinada função. Há disponível um grande número de tipos de eletrodos que apresentam diferentes características operacionais, aplicáveis a diferentes materiais e que produzem soldas com diferentes características. Para organizar o grande número de eletrodos estes são classificados de acordo com sistemas propostos por diferentes sociedades (ABNT, AFNOR, AWS, DIN, ISO etc.). No Brasil, as classificações mais usadas são da AWS, conforme apresenta a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Especificação AWS para ER. Fonte: AWS (2003)

Especificação AWS para eletrodos revestidos	
REF. AWS	Eletrodos para
A 5.1	Aços carbono
A 5.3	Alumínio e suas ligas
A 5.4	Aços inoxidáveis
A 5.5	Aços de baixa liga
A 5.6	Cobre e suas ligas
A 5.11	Níquel e suas ligas
A 5.13	Revestimento (alma sólida)
A 5.15	Ferros fundidos
A 5.21	Revestimento (alma tubular com carbonetos de tungstênio)

De acordo com sua formulação, os revestimentos dos eletrodos podem ser divididos em diferentes tipos:

- Revestimento rutilico: contém quantidade considerável de rutilo (TiO_2) e produz uma escória abundante, densa e de fácil destacabilidade. São eletrodos de fácil operação, podendo ser usados tanto em CC quanto em CA, em qualquer posição. Sua resistência à fissuração a quente é relativamente baixa. São de uso geral; (MODENESI, 2000).
- Revestimento básico: contem quantidade apreciável de carbonato de cálcio (CaCO_3) e fluorita (CaF_2), capaz de gerar uma escória básica que, juntamente com o dióxido de carbono gerado pela decomposição do carbonato, protege a solda do contato com a atmosfera. Esta escória dessulfura a solda, reduzindo o risco de formação de trincas por solidificação. Se armazenado corretamente produz soldas com baixo teor de hidrogênio, o que diminui o risco de fissuração e de fragilização induzidas por este elemento. A penetração é média, e o cordão de solda apresenta boas propriedades mecânicas, principalmente em relação a tenacidade. Indicado para aplicações de alta responsabilidade, soldagem de grandes espessuras e para estruturas de alta rigidez. Esse tipo de eletrodo requer cuidado especial de armazenagem pelo fato de ser altamente higroscópico. (MODENESI, 2000).
- Revestimento celulósico: possui uma elevada quantidade de material orgânico (por exemplo, celulose) e sua decomposição no arco gera grande quantidade de gases que protegem o metal líquido. A quantidade de escória produzida é pequena, o arco é muito violento, causando grande volume de respingos e alta penetração, quando comparados a outros tipos de revestimentos. Apesar do aspecto do cordão apresentar escamas irregulares, as características mecânicas são consideradas boas, exceto a possibilidade de fragilização por hidrogênio. São recomendados para a soldagem fora da posição plana, tendo grande aplicação na soldagem circunferencial de tubulações e na execução de passe de raiz em geral. (MODENESI, 2000).

Revestimentos de diferentes tipos podem conter adições de pó de ferro. Durante a soldagem, este é fundido e incorporado à poça de fusão, causando um melhor aproveitamento da energia do arco e uma maior estabilização deste,

para um limite de de adição de até 50% em peso do revestimento (MODENESI, 2000). O pó de ferro torna o revestimento mais resistente ao calor, permitindo a utilização de maiores correntes de soldagem para um dado diâmetro do eletrodo e assim têm-se um aumento significativo na taxa de deposição de eletrodos com pó de ferro em seu revestimento. Porém, com um excesso de adição de pó de ferro, a soldagem fora da posição plana fica comprometida, pois a poça de fusão é maior e também a dificuldade de controlá-la.

2.7 Parâmetros de soldagem com eletrodos revestidos

Na soldagem manual com eletrodos revestidos, as principais variáveis operatórias são: tipo e diâmetro do eletrodo; tipo, polaridade e valor da corrente de soldagem; tensão e comprimento do arco; velocidade de soldagem; técnica de manipulação do eletrodo e a sequência de deposição e soldagem (MODENESI, 2000). Alguns parâmetros mais relevantes para esse trabalho serão apresentados de modo mais detalhado abaixo.

2.7.1 Tensão

Na soldagem com eletrodos revestidos, a tensão do arco varia geralmente entre 17 e 36 V, dependendo do diâmetro do eletrodo, de seu revestimento, da corrente usada e do comprimento do arco (MODENESI, 2000). A tensão de operação do arco tende a aumentar com o diâmetro do eletrodo, da corrente de soldagem e do comprimento do arco. Um comprimento muito pequeno causa um arco instável, com interrupções frequentes ou até mesmo sua extinção. Caso o comprimento seja muito pequeno, o cordão de solda tende a ser estreito e com concavidade pronunciada, sendo resultado de um reforço excessivo. No outro extremo, grandes comprimentos causam um arco sem direção e concentração, respingos excessivos e proteção deficiente, gerando porosidades. Cabe ao soldador controlar a distância da ponta do eletrodo à peça a ser soldada de modo a obter a tensão correta para o processo.

2.7.2 Corrente

A faixa de corrente utilizável para determinado eletrodo depende principalmente de seu diâmetro e do material da alma, do tipo e espessura do revestimento e da posição de soldagem. Essa faixa de corrente é dada pelo fabricante para cada tipo de eletrodo e diâmetro da alma. Para valores menores que o valor mínimo da corrente, o arco pode ficar instável causando baixo aquecimento e fusão do eletrodo. Para valores superiores de corrente à máxima, o revestimento pode perder suas propriedades devido a um aquecimento excessivo por efeito Joule. Além disso, uma corrente maior aumentará também a largura do cordão. A corrente de soldagem é muito importante para a soldagem com eletrodos revestidos pois é o principal parâmetro de controle para as características operatórias do processo, o aspecto do cordão de solda e as propriedades químicas e mecânicas da junta soldada (MODENESI, 2000).

A intensidade da corrente é o parâmetro determinante na taxa de deposição para condições fixas de soldagem (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004). A Figura 2.6 mostra a relação direta de proporcionalidade da corrente e a taxa de deposição, sendo a corrente então um parâmetro de extrema importância em relação a produtividade.

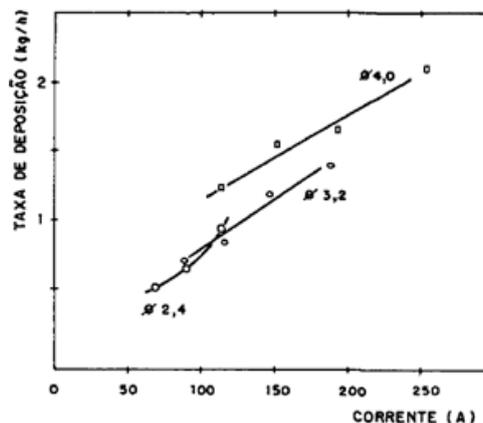


Figura 2.6 – Efeito da corrente de soldagem sobre a taxa de deposição para vários diâmetros de alma. Fonte: Wainer *et al.* (2004)

O fato de que a corrente de soldagem tem um efeito inversamente proporcional sobre a velocidade de resfriamento limita o processo pois as

velocidades de resfriamento não podem ser muito rápidas ou muito lentas. Um modo de diminuir essa característica é por controlar a velocidade de soldagem. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004). A Figura 2.7 mostra o efeito da corrente de soldagem sobre a geometria do cordão.

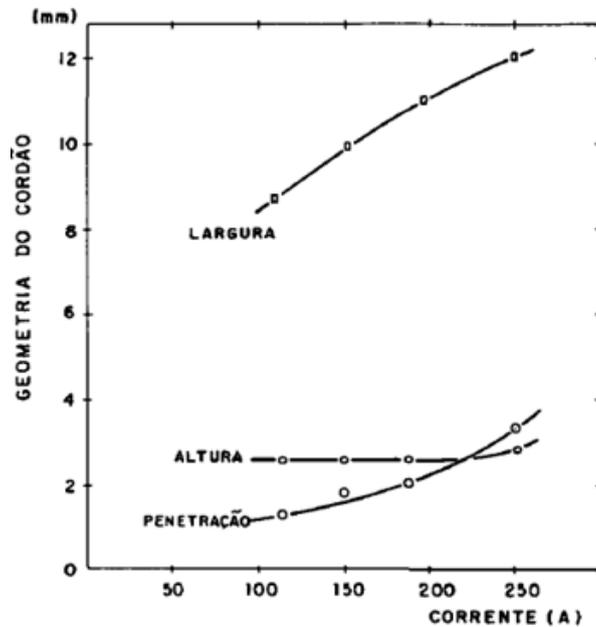


Figura 2.7 – Efeito da corrente de soldagem sobre a geometria do cordão.

Fonte: Wainer *et al.* (2004)

Conforme a figura apresenta, à medida que a corrente aumenta, a largura e a penetração tendem a subir enquanto a altura tende a permanecer constante.

2.7.3 Polaridade da corrente

O termo polaridade é utilizado para descrever a conexão elétrica do porta-eletrodo com relação aos terminais da fonte de potência que fornece corrente contínua (corrente direta). Na Figura 2.8 são ilustradas as polaridade eletrodo positivo (CCEP) e a polaridade eletrodo negativo (CCEN) no caso da soldagem com eletrodo revestido.

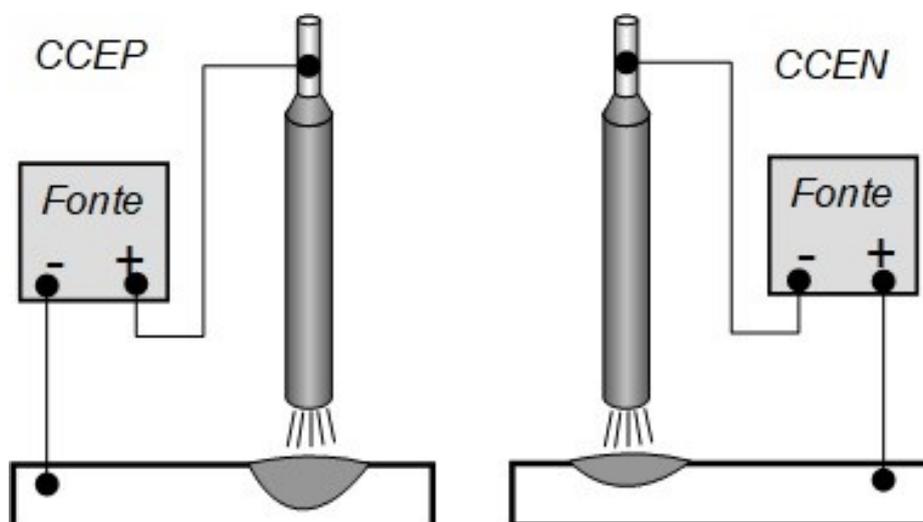


Figura 2.8 – Diferentes configurações de polaridades. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov

A polaridade afeta a forma e as dimensões da poça de fusão, a estabilidade do arco e o modo de transferência de metal de adição. Em geral, a soldagem ER com polaridade eletrodo positivo produz arcos mais estáveis e cordão mais regular, assim como uma maior penetração, já com polaridade eletrodo negativo, a penetração é menor, mas a taxa de fusão é maior, como mostra a Figura 2.9. (MODENESI, 2000). (obs.: alguns tipos dos eletrodos revestidos apresentam as características contrárias).

Com corrente alternada, a penetração e a taxa de fusão tendem a ser intermediárias, mas a estabilidade do processo é, normalmente inferior. Por outro lado, a soldagem com CA apresenta menos problemas de sopro magnético, sendo melhor para a soldagem com eletrodos e correntes maiores. (MODENESI, 2000).

A grande maioria dos eletrodos revestidos opera melhor na polaridade CCEP, embora alguns eletrodos (por exemplo, para o ferro fundido) são recomendados para CCEN. Outros podem ser usados tanto em CCEP, como em CCEN. A recomendação de qual polaridade deve ser usada é feita pelo fabricante do eletrodo. (MODENESI, 2000).

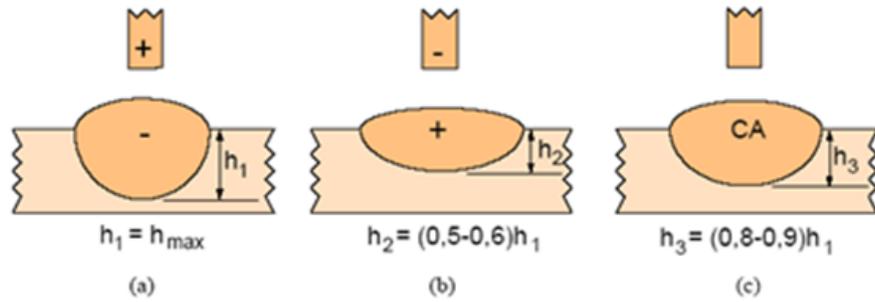


Figura 2.9 - Influência da polaridade e do tipo de corrente na penetração: (a) Polaridade inversa (CC+), (b) polaridade direta (CC-) e (c) corrente alternada (CA). Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

2.7.4 Característica estática da fonte na soldagem ER

As fontes utilizadas na soldagem com eletrodos revestidos são do tipo que tem característica estática do tipo corrente constante, como mostrado na figura 2.10. Isso se deve ao fato de que o soldador varia o comprimento do arco durante a soldagem e conseqüentemente a tensão varia também. A corrente por sua vez, é selecionada e permanece com poucas variações durante o processo. (MODENESI, 2000).

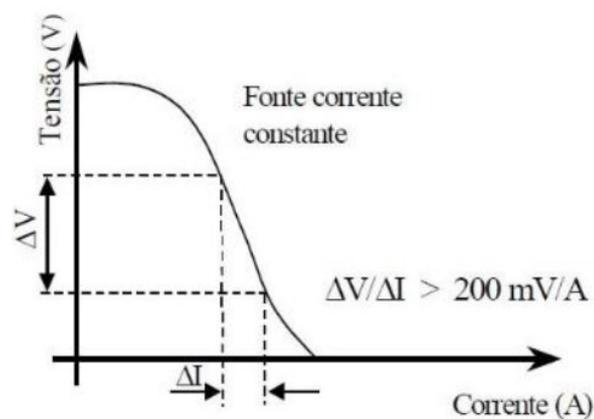


Figura 2.10 – Característica estática da fonte. Fonte: Wainer *et al.* (2004)

2.8 Taxa de fusão de ER

Os custos de soldagem tem como fatores determinantes: mão de obra, taxa de deposição, eficiência de deposição e custo dos eletrodos. A taxa de deposição do eletrodo revestido está diretamente ligada com o custo total de soldagem, levando a uma economia sensível de custos se puder ser empregado um eletrodo com maior taxa de deposição. Ela representa a massa de metal de solda depositado comparada com a massa total de eletrodo consumido e é expressa por um percentual (FORTES, 2005).

A metodologia utilizada para a determinação das taxas de deposição e de fusão do eletrodo geralmente constitui-se em:

- Pesagem e medição das barras (metal de base) e dos eletrodos a serem usados antes de ser realizado o procedimento de soldagem;
- Registro de valores de corrente e tempo de soldagem, durante o processo;
- Pesagem e medição das barras e dos eletrodos após deposição do metal de solda.

Sendo as Fórmulas de projeto:

- Determinação, em gramas, da massa de metal depositado.

$$P_d = P_2 - P_1 \text{ [g]} \quad (1)$$

onde: P2 é a massa medida depois da deposição do cordão de solda e P1 é a massa antes da deposição.

- Determinação, em gramas, da massa de metal fundido.

$$P_f = \frac{\pi d^2}{4} (l_1 - l_2) \rho \cdot 10^{-3} \text{ [g]} \quad (2)$$

onde: d é diâmetro do eletrodo, l_1 comprimento do eletrodo antes da deposição do eletrodo, ρ é a densidade do metal cordão de solda, l_2 comprimento do eletrodo depois da deposição e e de solda.

- Determinação da taxa de fusão

$$T_f = \frac{l_2 - l_1}{t} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

sendo t o tempo de arco aberto durante o processo de soldagem,

Na soldagem com eletrodos revestidos parte da massa do eletrodo é perdida, seja com a escória gerada no processo, com os respingos, fumos e gases devido à queima de elementos do revestimento, fatores que influenciam no rendimento do eletrodo.

3 EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

Neste trabalho foram utilizados eletrodos revestidos com objetivo de em um único teste determinar a taxa de fusão com corrente contínua na polaridade positiva e negativa. Para se atingir esse objetivo, foi utilizada uma máquina de solda com eletrodos revestidos. Os eletrodos utilizados foram o E7018 e E6013 com o mesmo valor de diâmetro ($d = 3,25 \text{ mm}$). A escolha desses eletrodos teve como fator determinante o fato de serem amplamente usados na indústria.

3.1 Equipamentos utilizados

Foi utilizada a fonte de energia retificadora ESAB LHG 425 que fornece corrente contínua em uma faixa de 45 A a 425 A e tensão em vazio máxima de 80 V. O ajuste do valor da corrente é feito de forma contínua por meio de uma manivela conforme mostrado na Figura 3.1 que desloca a parte do núcleo do transformador principal, possibilitando assim a seleção de forma contínua do valor da corrente.



Figura 3.1 – Fonte de energia retificadora ESAB LHG 425

Para a medição da tensão e da corrente foram utilizados um multímetro digital (Minipa ET-3919) e amperímetro digital (Brasfort), ambos mostrados na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Amperímetro e multímetro digital

3.2 Máquina de soldar ER

Para o processo de soldagem foi utilizada uma máquina de soldar ER, conforme Figura 3.3.



Figura 3.3 – Máquina de soldagem ER

A máquina de soldar eletrodos revestidos consiste de um suporte onde o eletrodo é fixado e esse suporte está acoplado a um motor elétrico. A peça a ser soldada é posicionada logo abaixo do porta eletrodo. Por meio de chaves seletoras, é possível selecionar se a soldagem vai ser automática ou se o próprio operador da máquina vai controlar a descida do eletrodo à medida que o processo de soldagem for ocorrendo. Há também um potenciômetro que permite ajustar a tensão de referência. O ajuste desse potenciômetro foi explicado na seção 4 . A fixação do eletrodo em sua posição é feita por meio da inserção do mesmo no suporte e fixação por meio de um parafuso. A polaridade do eletrodo fixado no suporte é positiva e da peça a ser soldada negativa. No caso da escolha pela soldagem automática, o término da soldagem é feito pelo próprio operário ao mudar a chave seletora novamente para a opção manual.

3.3 Consumíveis

Neste trabalho, foram comparados os valores das taxas de fusão para dois tipos de eletrodos: básico (E7018) e rutilico (E6013), sendo que todos tinham o diâmetro de 3,25 mm. A tabela 3.1 mostra um catálogo com faixas de corrente recomendadas.

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

Tabela 3.1 – Catálogo ESAB com faixas de corrente recomendadas. Fonte: ESAB (2005)

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para utilizar a máquina para os testes, foi necessário ajustar a tensão de referência em um potenciômetro. Para isso, foram feitos testes preliminares em diferentes valores da escala. Esse ajuste foi necessário porque a máquina compara a tensão de referência com a tensão de soldagem. Se a tensão de soldagem for menor que a de referência um sinal é enviado para um motor e a distância do arco é aumentada através da desaceleração do motor e consequentemente do eletrodo. Se a tensão de referência for menor que a soldagem, o comprimento do arco é diminuído através da aceleração do motor e por sua vez do eletrodo. A Figura 4.1 apresenta o potenciômetro com possibilidade de regulagem de tensão de referência.



Figura 4.1 – Regulagem da tensão de referência

Após os testes, foi possível montar uma tabela com os valores correspondentes na escala do potenciômetro e a tensão de referência e construir um gráfico que mostra a relação linear entre estes dois parâmetros:

Tabela 4.1 – Valores de tensões de referência para seleção do comprimento de arco a ser utilizado

Resistor (Unidades Relativas)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
Tensão de referência (V)	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35

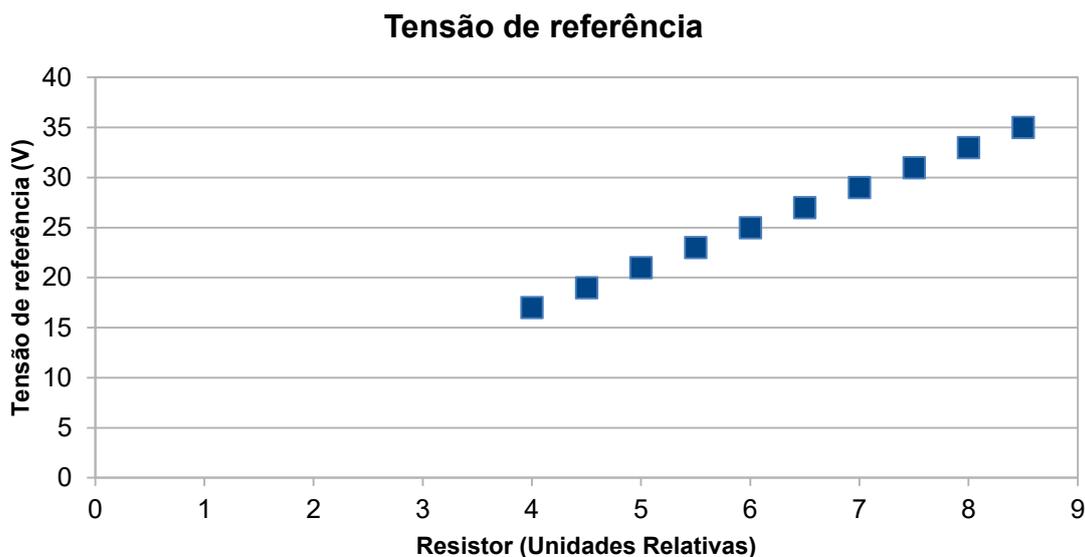


Figura 4.2 –Tensão de Referência x Resistor

Após a montagem da tabela foi possível selecionar a tensão correta para os testes. Para realizar a soldagem com dois eletrodos ao mesmo tempo, foi necessário fazer uma alteração na máquina. A máquina foi modificada de modo que sua posição de soldagem (posição original na vertical) fosse horizontal. Também foi adaptado um porta eletrodo para a fixação do segundo. A figura abaixo mostra a nova configuração da máquina de soldar ER.

Para selecionar a faixa de corrente de trabalho, foi consultado o catálogo da ESAB (Figura 3.4). Foi selecionada a corrente de 105 A. A Figura 4.3 a seguir mostra uma foto da máquina. A Figura 4.4 ilustra como a máquina foi modificada para que fosse possível realizar os testes com dois eletrodos ao mesmo tempo.

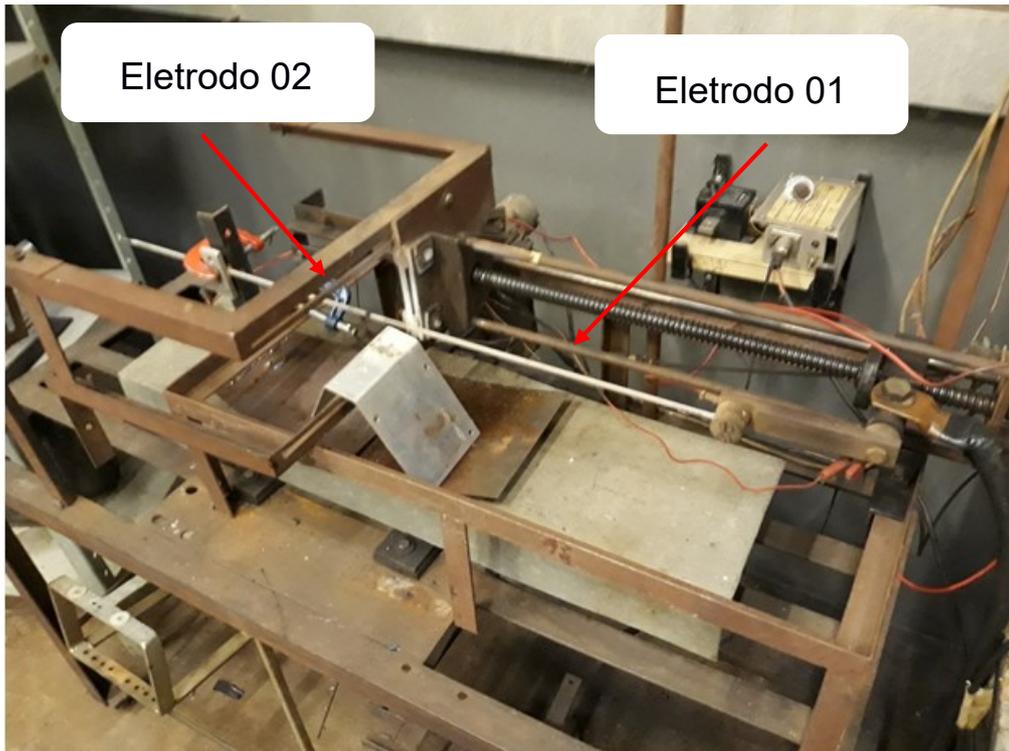


Figura 4.3 – Adaptação da máquina de soldagem ER

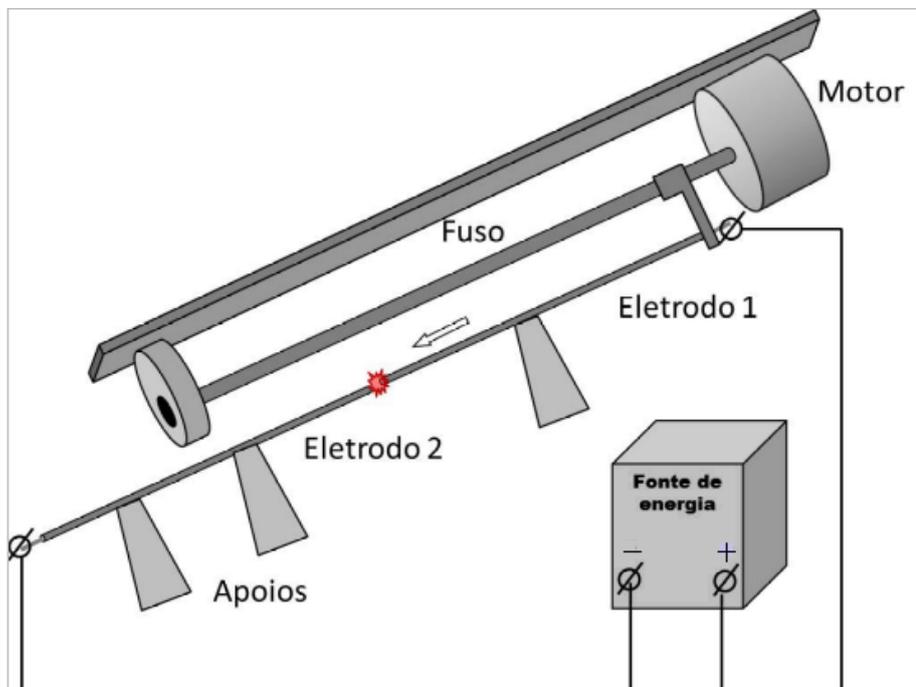


Figura 4.4 – Ilustração do experimento

No início de cada teste, os comprimentos de ambos os eletrodos foram medidos. Após a medição do comprimento inicial, os eletrodos foram fixados em seus respectivos lugares (porta eletrodo para o eletrodo na polaridade positiva e suporte adaptado para a polaridade negativa). Os cabos foram conectados aos respectivos eletrodos. Por meio de uma chave seletora, a distância entre os eletrodos foi ajustada de modo que fosse possível a abertura do arco elétrico. Os testes foram realizados de modo que o eletrodo que operava em CCEP se movimentava e o eletrodo em CCEN ficou parado. Essa configuração é necessária pois é a única em que a máquina funciona corretamente.

O primeiro teste foi feito com dois eletrodos E6013. Após posicionados, a fonte de energia foi ligada e foi feita a seleção da opção automático. Com o amperímetro foi medido a corrente elétrica. Como ocorreu uma leve variação da corrente elétrica, foi computado um valor médio para esse parâmetro. Com o voltímetro foi medido a tensão. Novamente, ocorreu variações e o valor final registrado foi médio. O segundo teste, com o eletrodo E7018, foi feito seguindo esses passos. Ao final de cada teste, ambos os eletrodos foram medidos para se determinar o valor final, utilizado para calcular a taxa de fusão. O tempo foi medido por meio de um cronômetro e buscou-se um tempo médio de 30 s para cada teste devido ao comprimento limitado dos eletrodos.

A segunda bateria de testes, para verificar a influência de outros parâmetros nos resultados obtidos, foi realizada de forma manual. Foram utilizadas chapas de aço de espessura de aproximadamente 5 mm. A soldagem foi realizada pelo professor Volodymyr Ponomarov e foram variados o comprimento de arco, a posição de soldagem e a polaridade para conferir os resultados obtidos na configuração convencional. Foram utilizados eletrodos iguais (E6013 e E7018), ambos com $d = 3,25$ mm, e a mesma fonte de energia. Por meio do amperímetro e multímetro foram medidos a corrente e a tensão, respectivamente. Com um cronômetro o tempo de cada teste foi medido. Ao final de cada teste, o valor do comprimento do eletrodo foi medido.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para os testes com os eletrodos E6013 e E7018 (de diâmetro de 3,25 mm) para duas tensões e, portanto para dois comprimentos de arco diferentes.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos para testes com eletrodos E6013 e E7018

Nº	t [s]	U [V]	i [A]	la [mm]	li [mm]	lf (+) [mm]	lf (-) [mm]	Taxa de fusão (+) [mm/s]	Taxa de fusão (-) [mm/s]
Eletrodos 6013 / Tensão de referência = 4,5 V (arco mais curto)									
1	32,53	25	106,2	5	350	229	230,5	3,72	3,67
Eletrodos 6013 / Tensão de referência = 8,5 V (arco mais longo)									
2	34,08	39,7	100	10	350	213	225	4,02	3,67
Eletrodos 7018 / Tensão de referência = 4,5 V (arco mais curto)									
3	33,40	23	109,7	5	350	233	240	3,50	3,30
Eletrodos 7018 / Tensão de referência = 8,5 V (arco mais longo)									
4	31,42	37,2	108,2	10	350	226	239	3,94	3,53

Analisando a Tabela 5.1, a taxa de fusão do eletrodo 6013 para ambos os comprimentos de arco foi maior com o eletrodo na polaridade positiva do que na negativa. A taxa de fusão também foi maior em CCEP com o E7018. Esse resultado foi contrário ao esperado pois os testes convencionais mostram que a taxa de fusão é sempre maior com o eletrodo em CCEN do que em CCEP. Além disso, para os dois casos, essa diferença diminuiu quando o comprimento de arco decresceu.

Buscando uma explicação para esses resultados, foram feitos novos testes (no arranjo convencional) com eletrodos em diferentes posições para verificar se a posição de soldagem modifica a taxa de fusão a ponto de invertê-la. Foram usados também diferentes comprimentos de arco. Esses testes são apresentados na Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 – Resultados para menor comprimento de arco

Menor Comprimento de Arco									
Nº	Eletrodo	Posição	t [s]	U [V]	i [A]	la [mm]	li [mm]	lf [mm]	tf [m/s]
5	E6013(+) 3,2 mm	Plano	29,7	22	108,4	5	350	224	4,24
6	E6013(+) 3,2 mm	Horizontal	29,9	24	107	5	350	230	4,01
7	E7018(+) 3,2 mm	Plano	30,3	24	109,5	5	350	232	3,89
8	E7018(+) 3,2 mm	Horizontal	30,6	27	108,1	5	351	253	3,20
9	E6013(-) 3,2 mm	Plano	30,6	22	108,2	5	350	213	4,48
10	E7018(-) 3,2 mm	Plano	30,5	24	108,2	5	351	225	4,14

Tabela 5.3 – Resultados para maior comprimento de arco

Maior Comprimento de Arco									
Nº	Eletrodo	Posição	t [s]	U [V]	i [A]	la [mm]	li [mm]	lf [mm]	tf [m/s]
11	E6013(+) 3,2 mm	Plano	30,3	35	107,8	10	350	227	4,06
12	E6013(+) 3,2 mm	Horizontal	30,5	33	108,7	10	350	232	3,87
13	E7018(+) 3,2 mm	Plano	30,2	38	108,7	10	351	238	3,74
14	E7018(+) 3,2 mm	Horizontal	27,2	40	107,3	10	351	256	3,50

Comparando-se os testes 5 e 6 da Tabela 4 onde o comprimento do arco é menor, nota-se que a taxa de fusão diminui com a mudança da posição plana para horizontal. O mesmo acontece com o eletrodo E7018 nos testes 7 e 8. A taxa de fusão maior do eletrodo em CCEN do que em CCEP também é verificada comparando-se os testes 5 e 9 para o eletrodo E6013 e 7 e 10 para o 7018. Pela análise desses resultados, pode-se concluir que a mudança da posição de soldagem para a horizontal não é o fator determinante para a inversão na taxa de fusão.

Uma explicação para a taxa de fusão ser maior na polaridade positiva (caso usar a máquina de soldar ER) pode ser relacionada às características do jato de plasma resultante. Na soldagem convencional, há sempre um jato de plasma no sentido do eletrodo para a peça com o formato cônico devido à diferença entre as áreas do eletrodo e da chapa metálica (veja Figura 2.1). No caso em questão, havia dois jatos de plasma, um proveniente de cada eletrodo, sendo que um jato se torna predominante. Segundo simulações e Solodski *et al.*

(2012) a intensidade do jato de plasma com o eletrodo em CCEN é sempre maior que a do eletrodo em CCEP. Assim, o eletrodo com polaridade positiva recebe mais calor e, como consequência, funde mais rápido, resultando em uma maior taxa de fusão.

Nota-se também a influência do comprimento do arco na taxa de fusão observando os testes 5 e 11 para o eletrodo E6013 e 7 e 13 para o eletrodo E7018. Em ambos os casos, a taxa de fusão decresce com o aumento do comprimento do arco. Tal observação pode ser explicada por menores perdas de calor com um comprimento de arco menor. Quanto menor o comprimento do arco, maior a taxa de fusão devido a um aquecimento mais concentrado.

6 CONCLUSÕES

Tendo em vista o objetivo do trabalho de propor um novo teste para verificar a taxa de fusão dos eletrodos básicos E7018 e rutílico E6013 utilizando uma máquina de soldar ER, têm-se as principais conclusões:

- A máquina para fundir dois eletrodos ao mesmo tempo não pode ser usada, pois os jatos de plasma modificam a dinâmica do processo, invertendo os resultados obtidos por meio do teste convencional (fazendo que o eletrodo positivo é que funde mais rápido);
- A posição de soldagem e o comprimento do arco não interferem de modo a tornar a taxa de fusão em CCEN maior que em CCEP;
- A diminuição do comprimento do arco resulta em maior taxa de fusão devido a um aquecimento mais concentrado, gerando assim menores perdas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FORTES, C. (3 de Fevereiro de 2005). Apostila de Eletrodos Revestidos. Eletrodos Revestidos OK. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: ESAB.

MODENESI, P. J. MARQUES, P. V. BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e tecnologia. 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2009.

PONOMAROV, V. Apresentação Soldagem com Eletrodo Revestido, CTA. LAPROSOLDA, FEMEC, UFU.

PONOMAROV, V. Apresentação Fontes de Soldagem, CTA. LAPROSOLDA, FEMEC, UFU.

SOLODSKII, S. A. *et al.* Fontes de energia para soldagem a arco. Universidade Politécnica de Tomsk. Rússia, 2012, 165 p. (em russo).

WAINER, E. BRANDI, S. D. MELLO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo, Editora Bluncher, 2008.

https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf