

THAÍS MONTOVANI CAMARGOS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CORRENTE DE
SOLDAGEM NA TAXA DE FUSÃO DOS ELETRODOS REVESTIDOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

THAÍS MONTOVANI CAMARGOS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CORRENTE DE
SOLDAGEM NA TAXA DE FUSÃO DOS ELETRODOS REVESTIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na
graduação em Engenharia Mecânica na Universi-
dade Federal de Uberlândia, como parte dos requi-
sitos para obtenção de título em **BACHAREL EM
ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Pomonarov

UBERLÂNDIA - MG

2019

THAÍS MONTOVANI CAMARGOS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CORRENTE DE
SOLDAGEM 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

Primeiramente agradeço a Deus pelas oportunidades concedidas em minha vida, e, pois, sem Ele nada seria possível.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov pelo desafio proposto, pela orientação, paciência, e por contribuir no conhecimento adquirido ao longo do curso, especialmente durante esse trabalho.

Aos meus pais Adriana e José Carlos que sempre me ensinaram o poder da educação e do trabalho. Ao meu irmão Bruno, por sempre me encorajar e incentivar nessa árdua trajetória.

Aos amigos e colegas da turma que me acompanharam e me apoiaram nessa longa jornada.

E, finalmente, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada.

Camargos, M.T. **Avaliação da Influência da Polaridade da Corrente de Soldagem na Taxa de Fusão dos Eletrodos Revestidos**, 2019. 57p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo verificar a diferença na taxa de fusão entre a polaridade de corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP) e a polaridade de corrente contínua com eletrodo negativo (CCEN) para os eletrodos básicos e rutilicos. Para isso foi realizada a soldagem manual dos eletrodos revestidos do tipo básico (E7018) e do tipo rutilico (E6013) de diâmetro 2,5 mm. Para determinar a taxa de fusão do eletrodo, os mesmos foram fundidos usando a mesma corrente de soldagem de 90 A, na polaridade CCEP e CCEN. Assim, a partir do que foi observado nos ensaios constatou-se a veracidade da literatura acerca do tema que afirma que a polaridade afeta de forma significativa a forma e as dimensões da poça de fusão, modo de transferência de metal de adição e a estabilidade do arco. Observou-se também que a taxa de fusão para ambos os tipos de eletrodos foi maior na polaridade CCEN, e que os eletrodos E6013 obteve-se maior taxa de fusão linear (comprimento da alma/s) que os eletrodos E7018, visto que estes se fundem mais lentamente devido a sua maior espessura de revestimento em relação ao eletrodo E6013. Entretanto, o eletrodo E7018 apresenta maior taxa de deposição que o E6013, fato justificado pela quantidade considerável de pó de ferro no seu revestimento (o que também justifica sua menor taxa de fusão linear).

Palavras chave: Eletrodo revestido; Polaridade; Fusão; Deposição.

Camargos, M.T. **Evaluation of the Influence of Welding Current Polarity on the Melting Rate of the Covered Electrodes**, 2019. 57p. Final Course Assignment, Federal University of Uberlândia, Uberlândia-MG.

ABSTRACT

The aim of the present work is to verify the difference in the fusion rate between the polarity positive electrode continuous current (CCEP) and the polarity negative electrode continuous current (CCEN) for the basic and rutile electrodes. For this purpose, tests were carried out with a manual welding of the basic electrodes (E7018) and rutile type electrodes (E6013) of diameter 2.5 mm are performed. To determine the melting rate of the electrode, they were melted using the same 90 A welding flux in the CCEP and CCEN polarity. Thus, from what was observed in the tests, it was verified the veracity of the literature on the subject that states that the polarity affects in a significant way the shape and dimensions of the fusion puddle, mode of transfer of metal addition and arc stability. It was also observed that the fusion rate for both types of electrodes was higher in the CCEN polarity, and that the electrodes E6013 presented a higher linear fusion rate (core length / s) than the electrodes E7018, since these electrodes melt more slowly due to their greater coating thickness in relation to the electrode E6013. However, the electrode E7018 presented a higher deposition rate than E6013, this fact is justified by the considerable amount of iron powder in its coating (which also justifies its lower linear melting rate)

Keywords: Covered electrode; Polarity; Fusion; Deposition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do processo de soldagem. Fonte: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_s_maw.cfm	16
Figura 2 - Representação dos principais equipamentos em um processo de eletrodo revestido (Fonte: Soldagem a Arco Voltaico, A. Scotti).....	17
Figura 3 - Fonte de Característica Estática Corrente Constante (Fonte: Soldagem a Arco Voltaico, A. Scotti).....	18
Figura 5 -Efeito do ângulo de avanço no formato de cordão	20
Figura 6 - Características geométricas de um cordão de solda:	22
Figura 7 - Taxa de deposição para os eletrodos E7024, E7018 e E6013.	26
Figura 8 - Especificação dos Eletrodos Revestidos Fonte: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_s_maw.cfm	27
Figura 9. Conexões e Efeitos da Corrente Contínua (Apostila ESAB)	31
Figura 10 – Constituintes da tensão do arco da soldagem.....	31
Figura 11 -Balanço de calor entre o ânodo e o cátodo	32
Figura 12 - Influência da polaridade e do tipo de corrente na penetração.....	33
Figura 13 - Máquina de jateamento de areia	37
Figura 14 - Estufa para secagem dos eletrodos	38
Figura 15 - Fonte de Energia Larry TE160	38
Figura 16 - Fonte de soldagem ESAB LHG 425.....	39
Figura 17 – Amperímetro e Multímetro	39
Figura 18 - Escova de aço e picador.....	40
Figura 19 - Balança OHAUS.....	40
Figura 20 - EPI's	41
Figura 21 - Eletrodos Revestidos (Catálogo de consumíveis ESAB)	41
Figura 22 - Placas de teste	42
Figura 23 - Esquema do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido	45
Figura 24- Taxa de fusão da alma dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.	52
Figura 25 - Taxa de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.	52

Figura 26- Rendimento de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.	53
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos eletrodos para aços carbono. (FORTES, 2005).....	27
Tabela 2 - Classificação dos eletrodos para aços carbono. (FORTES, 2005).....	28
Tabela 3 - Características Operacionais dos Eletrodos Revestidos para Aços ao Carbono (MACHADO,1996)	28
Tabela 4 - Características das Chapas/SAE 1020 Fonte: http://www.tenax.com.br/tenax/produtos/chapas-e-placas-de-aco/sae-1020/	42
Tabela 5 - Massa da placa de teste antes da solda	43
Tabela 6 - Recomendações de ressecagem de eletrodos revestidos OK® Fonte: Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB	44
Tabela 7 - Recomendações de parâmetros de soldagem para os eletrodos revestidos OK® Fonte: Catálogo ESAB	44
Tabela 8 - Aspectos dos cordões de solda dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte Larry TE160	48
Tabela 9 - Aspectos dos cordões de solda dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte ESAB LHG 425.	49
Tabela 10 - Dados dos eletrodos E6013 e E7018 antes e após serem consumidos nas polaridades CCEP e CCEN nas fontes de energia Larry TE 160 e ESAB LHG 425.	49
Tabela 11 - Dados coletados após a soldagem com eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN nas fontes de energia Larry TE 160 e ESAB LHG 425.	50
Tabela 12 - Parâmetros calculados para cada teste com eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASME	<i>American Society for Mechanical Engineers</i>
ASME II	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEP	Polaridade Corrente Contínua Eletrodo Positivo
CCEN	Polaridade Corrente Contínua Eletrodo Negativo
E6013	Eletrodo com revestimento rutilico
E7018	Eletrodo com revestimento básico
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAPROSOLDA	Laboratório de Soldagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia
<i>l</i>	Largura do cordão de solda
MMA	<i>Manual Metal Arc</i> (Soldagem por Eletrodo Revestido)
p	Penetração do cordão de solda
r	Reforço do cordão de solda
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (Soldagem por Eletrodo Revestido)
TF	Taxa de Fusão
TD	Taxa de Deposição
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Processo de soldagem.....	15
2.2. Soldagem a arco com Eletrodo Revestido.....	15
2.2.1. Fundamentos do processo.....	15
2.2.2. Parâmetros de soldagem ER	18
2.2.3. Princípio dos consumíveis de soldagem ER.....	20
2.2.4. Aspecto e geometria do cordão de solda com ER	21
2.2.5. Vantagens, Limitações e Aplicações da soldagem com ER	22
2.3. Eletrodo Revestido	23
2.3.1. Funções do Revestimento	23
2.3.2. Tipos de Revestimento	24
2.3.3. Classificação dos eletrodos.....	26
2.3.4. Seleção do eletrodo adequado	28
2.3.5. Manutenção e cuidado com os eletrodos revestidos.....	29
2.4. Efeito da polaridade da corrente de soldagem.....	30
2.5. Aspectos Econômicos da Soldagem com ER.....	33
2.6. Análise da taxa de deposição e rendimento de deposição dos eletrodos revestidos.....	34
CAPÍTULO 3 – EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS.....	37
3.1. Equipamentos utilizados.....	37
3.2. Consumíveis	41
3.3. Material de base.....	42
CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
CAPÍTULO 5 – TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	47
5.1 Resultados obtidos.....	47

5.2 Análise dos Resultados.....	51
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO.....	55
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

A soldagem até o século XIX era considerado um processo secundário de fabricação por forjamento e por fundição, mas essa perspectiva modificou-se com o avanço da sua tecnologia, a partir das experiências de Sir Humphrey Davy (1801-1806) com o arco elétrico, da descoberta do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica que possibilitaram o aparecimento dos processos modernos de soldagem por fusão. Concomitantemente, tornou-se necessário o desenvolvimento de novos processos de união para a fabricação de equipamentos e estruturas devido ao início da fabricação e o uso de aço na forma de chapas. (MODENESI, 2000)

Um inglês chamado Wilde obteve a primeira patente de soldagem por arco elétrico em 1865, depois de muitas experiências com a novidade tecnológica da época. Ele produziu uma solda por fusão unindo duas peças de ferro de pequena dimensão por meio de uma corrente elétrica que passava em ambas as peças. Após vinte anos aproximadamente, um russo Nikolas Bernardos e um polaco Stanislav Olszewsky registraram na Inglaterra a primeira patente de um processo de soldagem, baseado em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada, fundindo os metais à medida que o arco era manualmente passado sobre a junta a ser soldada (FORTES, 2005).

Em 1890, N.G. Slavianoff (Rússia) e Charles Coffin (EUA), desenvolveram de forma independente, a soldagem com eletrodo metálico nu consumível. Assim, nos anos seguintes, o processo de soldagem por arco foi realizado com eletrodos nus, que eram consumidos na poça de fusão e tornavam-se parte do metal de solda. Devido ao nitrogênio e oxigênio na atmosfera que geravam óxidos e nitretos, as soldas eram de baixa qualidade. Dessa forma, no início do século XX, a importância da proteção ao arco contra os agentes atmosféricos foi percebida. Para atingirem esse objetivo revestiram o eletrodo com um material que se decompunha sob o calor do arco para formar uma proteção gasosa. Como resultado, foram tentados vários métodos de revestir os eletrodos, tais como o acondicionamento e imersão.

Oscar Kjellberg, um engenheiro sueco, em 1904, inventou o primeiro eletrodo revestido, que era constituído, originalmente, de uma camada de cal, cuja função era facilitar a abertura do arco e aumentar sua estabilidade. Posteriormente, Oscar Kjellberg fundou a empresa ESAB, que está presente no mercado internacional até os dias de hoje. Em 1907, Kjellberg patenteou o processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (MODENESI, 2000).

Nesta nova fase, a princípio a soldagem teve pouca utilização, estando restrita principalmente à execução de reparos de emergência até a eclosão da 1ª guerra mundial, quando a

soldagem começou a ter maior relevância como um processo de fabricação. Assim, em 1920, esses esforços culminaram no eletrodo revestido extrudado melhorando a qualidade do metal de solda, acarretando o que muitos consideram o mais significativo avanço na soldagem por arco elétrico.

A soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido consiste na abertura e manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo revestido e a peça a ser soldada. O eletrodo e a peça são fundidos simultaneamente. O metal fundido do eletrodo é transferido para a peça, formando uma poça de fusão que é protegida da atmosfera (O_2 e N_2) pelos gases de combustão do revestimento. Por meio do banho de escória, que é formada pela queima de alguns componentes do revestimento, o metal depositado e as gotas de metal fundidos recebem uma proteção adicional. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008)

A busca contínua do aumento da produtividade propiciou o desenvolvimento de novos processos de soldagem. Na atualidade, mais de 50 diferentes processos de soldagem possuem alguma utilização industrial e a soldagem é o mais importante método para a união permanente de metais. Esta relevância é ainda mais evidenciada pela presença de processos de soldagem e afins nas mais diferentes atividades industriais e pela influência que a necessidade de uma boa soldabilidade tem no desenvolvimento de novos tipos de aços e outras ligas metálicas.

A escolha do processo de soldagem deve levar em conta, principalmente, a posição de soldagem, velocidade, penetração e deposição de material. Além disso, a produtividade desejada, a disponibilidade de soldadores/operadores qualificados. O acabamento da solda requerido, os recursos disponíveis e o ambiente de trabalho também são fatores relevantes para escolha do processo. Mesmo com muitos processos de soldagem disponíveis, o eletrodo revestido, o mais antigo de todos disponíveis, está ainda muito usado graças à sua versatilidade, portabilidade, acessibilidade, ampla variedade dos eletrodos, e outros. Mas este processo é muito sensível a possíveis alterações do comprimento do arco, inclinação do eletrodo, e à polaridade de corrente, entre outros.

O presente trabalho tem por objetivo verificar a diferença na taxa de fusão entre a polaridade de corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP) e a polaridade de corrente contínua com eletrodo negativo (CCEN) para os eletrodos básicos e rutilicos. Pois é um fato confirmado que a polaridade afeta de forma significativa a forma e as dimensões da poça de fusão, modo de transferência de metal de adição e a estabilidade do arco. O fabricante recomenda aos usuários a polaridade para cada marca de seus eletrodos, mas isso não significa que os usuários não devam verificar a veracidade das indicações encontradas no catálogo do fabricante.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de soldagem

Por definição de Modenesi, Marques e Bracarense (2009) a soldagem é considerada um processo de união que ocorre por meio da aplicação de alta energia. No caso de dois pedaços de metais não existe outro método de junção que forma um vínculo tão resistente, uma vez que a soldagem cria uma liga entre as juntas com as propriedades próximas às do metal de base.

Segundo a definição adotada pela AWS- *American Welding Society*, soldagem é um processo que visa obter a coalescência localizada por meio do aquecimento até uma temperatura viável, podendo apresentar pressão e metal de adição.

Ademais, o processo de soldagem é definido como uma operação que visa unir duas ou mais peças, garantindo, na junta soldada, a continuidade das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas.

2.2. Soldagem a arco com Eletrodo Revestido

2.2.1. Fundamentos do processo

O processo de soldagem com Eletrodo Revestido (ER) é denominado na Europa de MMA (Manual Metal Arc) e nos EUA de SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Dentre os vários processos de soldagem a arco, esse é o mais antigo e o mais versátil (Figura 1).

Esse processo é realizado com o calor gerado pelo arco elétrico que é mantido entre as duas partes metálicas, a peça de trabalho/ metal base e a extremidade de um eletrodo metálico revestido. O calor produzido pelo arco elétrico é suficiente para fundir a alma do eletrodo, revestimento e o metal de base. Quando as gotas de metal fundido da alma são transferidas para a poça de fusão por meio do arco, elas são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida que se encontra sob à superfície da poça de fusão, protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2001).

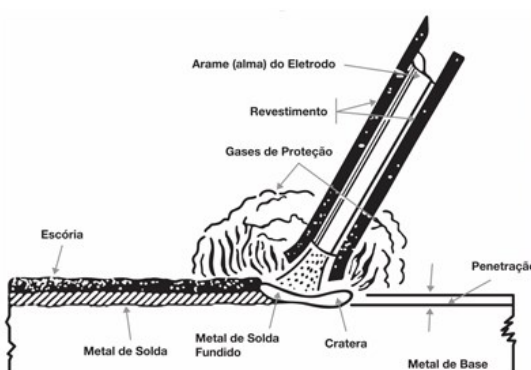


Figura 1 - Ilustração do processo de soldagem. Fonte: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_smaw.cfm

O equipamento usado no processo ER consiste de fonte de energia ou máquina de soldagem, porta-eletrodo e cabos, além de equipamentos de segurança para o soldador (máscaras, avental, luvas, etc.) e para a remoção de escória e limpeza do cordão de solda (escova de aço e picadeira) (Figura 2). No processo de soldagem, a região não revestida do eletrodo é fixada no porta eletrodo e o arco é iniciado tocando-se rapidamente a ponta do eletrodo na peça, que se encontram conectados, por cabos, aos terminais da máquina de soldagem. O calor do arco funde a ponta do eletrodo e um pequeno volume do metal de base formando a poça de fusão. O processo é realizado manualmente, com o soldador controlando o comprimento do arco e a poça de fusão através da manipulação do eletrodo e movimentando o eletrodo ao longo da junta. Quando o eletrodo é quase todo consumido, a soldagem é interrompida para troca do toco do eletrodo que sobrou e remoção de escória do local onde o processo será retomado (MODENESI, 2000).

A soldagem com eletrodos revestidos é amplamente usada pois apresenta versatilidade em termos de ligas soldáveis, operacionalidade e características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado. No processo ER a existência do arco e suas propriedades são menos conhecidas e possuem grande dificuldade para serem explicadas pois há muitos processos elétricos, físicos e químicos que acontecem no mesmo tempo e dentro do mesmo espaço bem limitado como a emissão de elétrons que é acompanhada de transferência de metal e escória (FILHO, 2005).

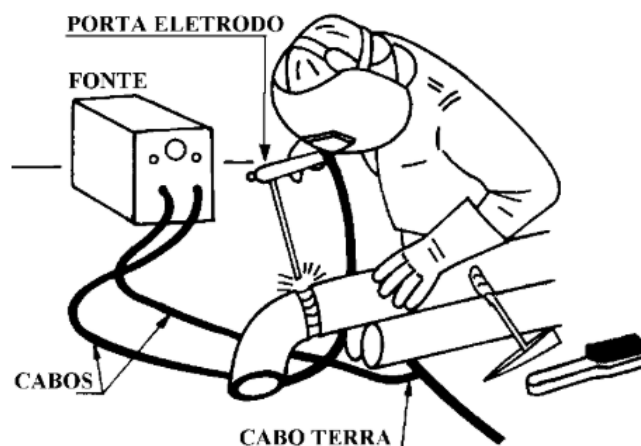


Figura 2 - Representação dos principais equipamentos em um processo de eletrodo revestido (Fonte: Soldagem a Arco Voltaico, A. Scotti)

A soldagem com eletrodos revestidos pode empregar tanta corrente alternada (CA) quanto corrente contínua (CC), entretanto em qualquer situação a fonte selecionada deve ser do tipo corrente constante. Esse tipo de fonte caracteriza-se por fornecer 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 (Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB, 2005).

A característica estática da fonte elétrica (CEF) no processo eletrodo revestido permite a regulação da corrente de trabalho. Todavia, a tensão de soldagem passa a não ser regulável, tornando-se dependente da fixação dos outros parâmetros que determinam a resistência do circuito. Uma curva estática (gráfico tensão x corrente) de tal fonte é apresentada a seguir (Figura 3).

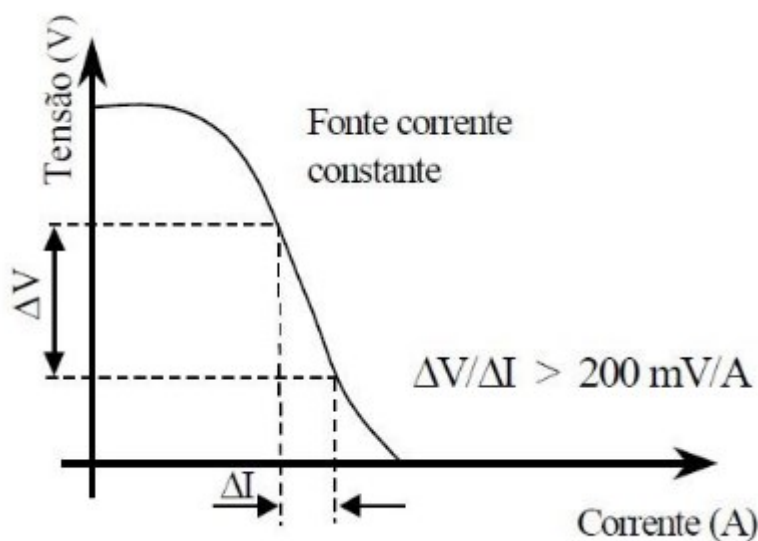


Figura 3 - Fonte de Característica Estática Corrente Constante (Fonte: Soldagem a Arco Voltaico, A. Scotti)

2.2.2. Parâmetros de soldagem ER

No processo de soldagem com eletrodos revestidos os parâmetros que se devem considerar são o tipo e diâmetro do eletrodo, a polaridade, o tipo e valor da corrente de soldagem, comprimento do arco, manuseio do eletrodo e velocidade de soldagem.

Tipo de corrente e polaridade

No processo ER o suprimento de energia pode ser tanto por corrente contínua (CC) quanto por corrente alternada (CA), com o eletrodo na polaridade CCEP ou CCEN. E a determinação do tipo de corrente é função do tipo do eletrodo, pois alguns eletrodos podem ser usados em CC e CA, e outros só em CC.

A polaridade influencia a forma e a dimensão da poça de fusão, além de afetar o tipo de transferência e a estabilidade do arco elétrico. Conforme a literatura a polaridade CCEP possibilita maior penetração, enquanto que a polaridade CCEN permite taxa de fusão maior, entretanto menor penetração. Com corrente alternada, a penetração e a taxa de fusão são médias, mas existe a vantagem de poder utilizar eletrodos maiores e correntes mais elevadas.

Intensidade da Corrente

A intensidade da corrente utilizada durante a soldagem depende fundamentalmente do diâmetro e tipo do eletrodo revestido. Desse modo, há catálogos fornecidos pelos fabricantes

indicando a faixa de corrente adequada para cada eletrodo, em função do seu diâmetro, especificando também o tipo de corrente, polaridade e posição de soldagem para o melhor desempenho do eletrodo revestido.

Correntes que ultrapassam as faixas recomendadas pelo fabricante podem danificar o revestimento podendo acarretar perda de resistência mecânica da junta, além de gerar respingos. Ademais, a corrente de soldagem é o principal fator no controle do volume da poça fusão e da penetração no metal de base. Deste modo, o volume e a largura da poça de fusão, bem como a penetração, tendem a aumentar quando há um acréscimo da intensidade da corrente.

Comprimento do arco

Comprimento do arco é a distância da ponta do eletrodo ao metal de base. Na soldagem com eletrodos revestidos, o comprimento do arco é controlado pelo soldador, que deve ter a habilidade e experiências requeridas, uma vez que para obter uma solda de qualidade é preciso a manutenção do comprimento recomendado do arco. Um comprimento do arco muito curto causa um arco intermitente, devido às interrupções frequentes, podendo ser extinto, “congelando” o eletrodo na poça de fusão. Já um arco muito longo causa uma transferência sem direção ou concentração, muitos respingos e proteção deficiente da poça de fusão. Desse modo, observa-se que o comprimento do arco adequado é função do diâmetro do eletrodo, do tipo de revestimento e da correta posição de soldagem.

Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é adequada quando produz um cordão de solda de boa aparência e boa penetração. Ela deve ser tal que permita ao arco ficar ligeiramente à frente da poça de fusão. Se a velocidade for muito alta acarreta um cordão estreito e de aspecto insatisfatório, com mordeduras e de remoção mais difícil. Enquanto que velocidades de soldagem muito baixas resultam um cordão largo, convexidade excessiva, eventualmente de baixa penetração. Quanto menor a velocidade de soldagem, maior o aporte térmico, maior a zona termicamente afetada e menor a taxa de resfriamento do material.

Posição de soldagem

No processo de soldagem com eletrodos revestidos é possível soldar em todas as posições, desde que as variáveis do processo sejam escolhidas adequadamente (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). É recomendado, sempre que possível soldar na posição plana, pois esta garante maior facilidade ao processo.

Orientação do Eletrodo

A orientação do eletrodo em relação à junta a ser soldada é imprescindível para se obter um bom cordão de 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.

Quando o eletrodo empurra a poça de fusão ele é apontado na mesma direção de soldagem. Nesta técnica o cordão fica mais largo e com baixa penetração, ideal para chapas finas (Figura 4-b).

Quando o eletrodo puxa a poça de fusão ele é apontado na direção oposta à direção de soldagem. 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 (Figura 4-a).

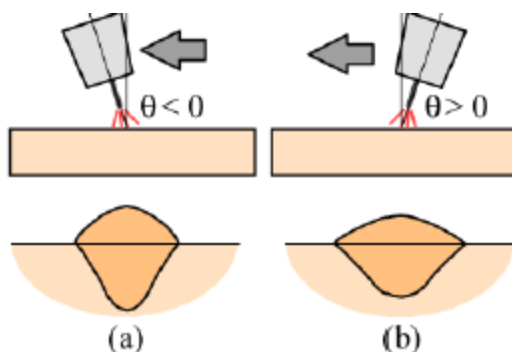


Figura 4 -Efeito do ângulo de avanço no formato de cordão

- (a) Eletrodo puxando a poça de fusão
- (b) Eletrodo empurrando a poça de fusão

(LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

2.2.3. Princípio dos consumíveis de soldagem ER

O termo consumível aplica-se aos produtos que durante o processo de soldagem são consumidos. Por exemplo, na soldagem manual com eletrodos revestidos é o eletrodo utilizado. Todavia, usualmente o termo restringe-se aos itens influentes ou controladores nas propriedades mecânicas e na qualidade metalúrgica da junta soldada. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2001)

Os consumíveis possuem como função principal proteger o metal fundido e aquecido no arco e na poça de fusão da atmosfera, uma vez que o nitrogênio e oxigênio reagem com o metal fundido. Óxidos influenciam na formação de inclusões, prejudicam o fluxo e a fusão do

metal, além de consumir certos elementos de liga. Já o nitrogênio forma nitretos, que podem causar fragilidade e porosidade.

A proteção gerada pelos fluxos geradores de escória contra a atmosfera é mais eficaz devido à camada protetora de fluxo fundido e os gases formados a partir de componentes no fluxo que são decompostos pelo calor.

No processo ER os eletrodos para soldagem são normalmente obtidos por meio da extrusão, sob pressão de um revestimento sobre a alma, na qual o arame é endireitado e cortado nas dimensões adequadas. Posteriormente, são realizadas operações de secagem que precedem o empacotamento final, podendo ser realizadas em lotes, ou de maneira ininterrupta, em fornos contínuos (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008).

Os consumíveis apresentam um efeito significativo na maneira como o metal é transferido dos eletrodos para a poça de fusão. Como por exemplo, na soldagem manual com eletrodo revestido, a presença no revestimento de uma grande quantidade de rutilo (óxido de titânio – TiO_2) acarreta uma transferência suave de pequenas gotas de metal fundido, entretanto a transferência ocorrerá em grandes glóbulos que fazem curto circuito com a poça de fusão se o revestimento possuir um alto teor de fluoreto de cálcio (CaF_2). Dessa forma, as considerações de transferência de metal, controle da composição do cordão de solda, facilidade de soldagem, propriedades da solda e, inclusive, os custos, são fatores de suma importância na seleção de consumíveis. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2001)

2.2.4. Aspecto e geometria do cordão de solda com ER

A geometria do cordão de solda influencia de forma significativa na resistência da junta soldada, principalmente no limite de resistência à fadiga. As características principais que dão o aspecto ao cordão de solda são a sua largura, a sua diluição, penetração e convexidade do cordão como pode ser observado na Figura 5 (FILHO, 2005b).

A penetração da solda será maior, quanto maior for a concentração e intensidade de energia e também, quanto maior for a escavação do arco. A intensidade de energia será maior à medida que aumenta o valor da corrente e diminui a velocidade de soldagem para a mesma atmosfera do arco. Além disso, sabe-se que a concentração de energia é função do diâmetro do arco, e este será menor, quanto menor for o seu comprimento, maior sua condutividade térmica e menor o diâmetro do eletrodo. Normalmente para qualquer valor de corrente, a penetração é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e ao diâmetro do eletrodo.

A largura do cordão de solda será maior quando maior for o diâmetro do arco e menor a viscosidade e tensão superficial da escória. Esse parâmetro é diretamente proporcional à tensão de soldagem e ao diâmetro do eletrodo e é inversamente proporcional à tensão de soldagem, os quais afetam a área sobre a qual a força do arco é dissipada. Geralmente em CC, a largura aumenta com a corrente até um valor crítico, a partir do qual começa a diminuir. Em CA verifica-se pouco efeito da corrente sobre a largura da solda.

A forma do reforço é determinada pela largura da poça de fusão, pela presença de escória, pelo volume de metal depositado, pela pressão hidrostática sobre o metal líquido, e pela velocidade de movimentação do metal líquido em soldagens com correntes elevadas. O reforço do cordão de solda aumenta com a redução do diâmetro do arco, com o acréscimo da área adicionada de solda, da tensão superficial e viscosidade. Assim, é diretamente proporcional à corrente de soldagem, e não depende do tipo de polaridade e corrente. Experimentos tem comprovado que o reforço é maior em CCEN e menor em CCEP, com valores intermediários em CA.

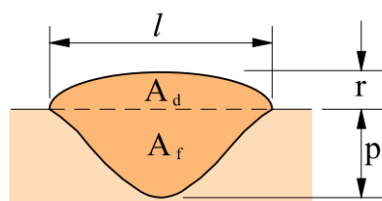


Figura 5 - Características geométricas de um cordão de solda:

p - penetração r - reforço, l - largura, A_d - área depositada, A_f - área fundida

(MODENESI, 2001)

2.2.5. Vantagens, Limitações e Aplicações da soldagem com ER

Vantagens da soldagem com ER:

- Equipamento utilizado simples, portátil e de baixo investimento;
- Flexibilidade de aplicação devido a ampla faixa de espessura atendida;
- Baixa sensibilidade às correntes de ar devido à proteção pela escória gerada a partir da fusão do revestimento e não apenas com fluxos de gases;
- Pode ser utilizado a uma longa distância da fonte, garantindo acesso a regiões restritas;
- Adequado para uma diversidade de materiais e ligas metálicas;

- Facilidade de ajustar a composição química do cordão de solda devido à diversidade de revestimentos que se encontra no mercado;
- Equipamentos podem ser usados também para outros processos.

Limitações da soldagem ER:

- Eletrodo com alimentação não contínua, acarretando baixa produtividade;
- Baixo fator de ocupação do soldador se comparado a outros processos por fusão;
- Devido à alta intensidade do calor ligas com baixo ponto de fusão podem apresentar dificuldades de serem soldadas;
- Não é adequado para metais reativos, uma vez que a proteção gerada pela queima do revestimento não é adequada;
- Necessidade de cuidados especiais com os eletrodos;
- Processo essencialmente manual;
- Produção da escória exige limpeza e remoção dela após cada passe;
- Descarte do eletrodo a critério do soldador, podendo gerar uma perda grande se ocorrer de forma precoce;
- Volume de gases e fumos gerados no processo.

Aplicações da soldagem ER:

- Soldagem de produção, manutenção e em montagens no campo;
- Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Soldagem de ferro fundido;
- Soldagem de alumínio, níquel e suas ligas.

2.3. Eletrodo Revestido

Os Eletrodos Revestidos são constituídos de dois elementos principais: a alma metálica e o revestimento. Os revestimentos consistem de misturas de compostos minerais ou orgânicos, as quais são adicionados outros aglomerantes, com o intuito de proteger a poça de fusão. A alma metálica tem as funções principais de conduzir a corrente elétrica e fornecer metal de adição para a junta. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008)

2.3.1. Funções do Revestimento

As funções do revestimento são (BALMER; SOLDAS, 2010):

- Protege o cordão de solda contra a ação da atmosfera, através da geração de gases e da formação da camada de escória. É necessária essa proteção para que o metal de solda não apresente bolhas de gases evitando, portanto, a sua fragilidade e porosidade;
- Estabilização do arco pois facilita abrir o arco na soldagem mesmo a baixos valores de correntes, e ajuda a manter o arco elétrico estável independentemente do seu comprimento;
- Diminui a velocidade do resfriamento do cordão de solda, através da formação da camada de escória que flutua sobre o banho sem reagir com o mesmo, e é geralmente impermeável ao oxigênio. Assim, a escória também permite maior facilidade de escape de bolhas, evitando a formação de poros e protege contra a oxidação, uma vez que retira oxigênio do banho por ação redutora;
- Refino metalúrgico, por meio do fornecimento de elementos de liga para o refino da microestrutura e para o controle da composição química do cordão de solda.

2.3.2. Tipos de Revestimento

Dependendo dos compostos empregados e da proporção com que os mesmos se encontram no revestimento, os eletrodos podem ser classificados conforme principais tipos: básicos, rútilicos ou celulósicos (MODENESI, 2000).

Revestimento Rútilico (por exemplo eletrodos do tipo E6013): Este revestimento contém grandes quantidades de rutilo (TiO_2 - óxido de Titânio), e produz uma escória ácida (alto teor de óxidos na solda), o que acarreta baixa resistência dinâmica, entretanto a escória é abundante, densa e de fácil destacabilidade. Proporcionam alta estabilidade de arco, apresentando o seu fácil acendimento e manutenção. Além disso, estes eletrodos caracterizam-se por serem de fácil manipulação, e podem ser utilizados em qualquer posição, exceto nos casos em que contenham um grande teor de pó de Ferro, sendo indicados para a execução de cordões curtos em aços de baixo teor de carbono, em soldagens de ângulo e em chapas finas. Podem ser utilizados em corrente contínua ou alternada e produzem um cordão de bom aspecto (cordão pouco convexo e alta molhabilidade), porém com penetração média ou baixa. A resistência à fissuração a quente é relativamente baixa, e por isso não são indicados para a soldagem estrutural onde são exigidas alta tenacidade e resistência. Ademais, estes eletrodos são considerados de grande versatilidade e de uso geral, todavia são muito pouco sensíveis à umidade.

Revestimento Básico (por exemplo eletrodos do tipo 7018): Este revestimento apresenta quantidades apreciáveis de Carbonatos de Cálcio (CaCO_3), fluorita (CaF_2) e outros elementos. Estes componentes são os responsáveis pela geração de escória com características básicas que, juntamente com o dióxido de carbono gerado pela decomposição do carbonato, protege a solda do contato com a atmosfera. Esta escória propicia a dessulfurização da solda reduzindo o risco de trincas de solidificação. Ademais, este revestimento desde que manuseado e armazenado de forma correta, produzirá soldas com baixos teores de hidrogênio reduzindo com isto os problemas de fissuração e fragilização induzidos por este elemento, uma vez que não possui substâncias orgânicas em sua composição. O cordão de solda é de baixa penetração e de perfil plano ou convexo e possui boas propriedades, especialmente em relação a tenacidade. Os eletrodos com revestimento básico são indicados em aplicações críticas, soldagens de grandes espessuras e de elevado grau de travamento. Entretanto, o desempenho durante a soldagem é inferior aos demais tipos de eletrodos e esse revestimento é o mais higroscópico de todos. Isto requererá cuidados especiais com o armazenamento e manuseio.

Revestimento Celulósico (por exemplo eletrodos do tipo 6010): Este revestimento apresenta grandes quantidades de substâncias orgânicas como a celulose, cuja decomposição pelo arco gera grandes quantidades de gases formando uma atmosfera redutora que protege o metal líquido. A quantidade de escória produzida é pequena e de fácil destacabilidade, o arco é muito violento causando grande volume de respingos gerando um acabamento ruim. Todavia, as características mecânicas da solda são consideradas boas, com exceção do risco de fragilização pelo hidrogênio. A solda é de alta penetração, quando comparado a outros tipos de revestimentos. Estes eletrodos são recomendados para soldagens fora da posição plana, muito utilizados na soldagem circunferencial de tubulações e na execução de passes de raiz em geral. Devido a sua alta penetração e grandes perdas por respingos, não são recomendados para o enchimento de chanfros. Ademais, caracteriza-se pelo nível de hidrogênio depositado ser elevado, devido ao hidrogênio proveniente da celulose e da umidade contida na mesma e do silicato. Dessa forma, não se deve realizar a ressecagem acima de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma vez que não é efetiva para retirar a umidade e é suscetível a trinca por hidrogênio. Esses eletrodos não são indicados em aplicações que exigem altos níveis de resistência mecânica, ou em estruturas cujo material seja susceptível a trincas.

Em situações de soldagens de aços, podem ser adicionados outros elementos de liga que proporcionarão funções especiais durante sua deposição, como exemplo, a adição de pó de Ferro (por exemplo eletrodos do tipo 7024). Durante a soldagem, esse elemento é fundido e incorporado à poça de fusão, acarretando um melhor aproveitamento da energia do arco, maior

taxa de deposição do eletrodo, permite utilizar correntes mais altas uma vez que o revestimento se torna mais resistente ao calor (Figura 6). Soldagens em todas as posições torna-se possível quando não há excesso de pó de ferro, que aumenta a fluidez da escória. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008)

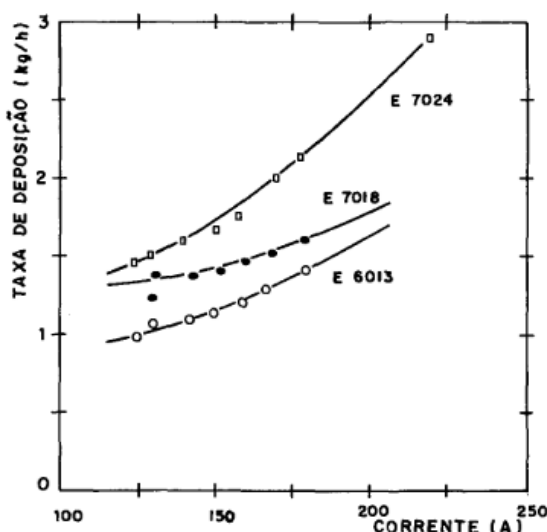


Figura 6 - Taxa de deposição para os eletrodos E7024, E7018 e E6013.

Notas: (1) Diâmetro de eletrodo: 4,0 mm - (2) Classe de eletrodo conforme AWS

Fonte: (WAINER; BRANDI; MELLO, 2008)

2.3.3. Classificação dos eletrodos

As organizações privadas ou governamentais desenvolvem e atualizam normas técnicas que se aplicam a áreas de engenharia de interesse, entre elas pode-se destacar: American Society for Mechanical Engineers (ASME); American Petroleum Institute (API); American Welding Society (AWS); American Society for Testing and Materials (ASTM); American Iron and Steel Institute (AISI); American National Standards Institute (ANSI); International Organization for Standardization (ISO).

Há uma grande variedade de eletrodos revestidos que se diferem pelo material a ser soldado e sua aplicação. A norma mais utilizada para classificação dos eletrodos revestidos é a AWS (American Welding Society - Sociedade Americana de Soldagem).

Para classificar o eletrodo leva-se em consideração o tipo de consumível, posições de soldagem, propriedades mecânicas, tipo de revestimento e composição química do metal depositado. O significado das designações da AWS é mostrado na Figura 7 e Tabela 1.

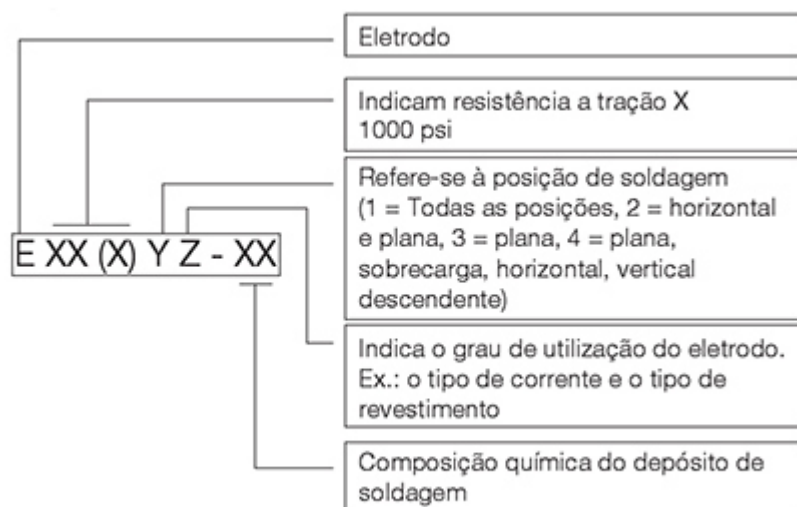


Figura 7 - Especificação dos Eletrodos Revestidos Fonte: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_smaw.cfm

Tabela 1- Classificação dos eletrodos para aços carbono. (FORTES, 2005)

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

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

A American Society of Mechanical Engineers (ASME) usa na íntegra as especificações de eletrodos da AWS acrescentando as letras SF antes do número da especificação. Desse modo, a especificação AWS A5.1 transforma-se na especificação ASME SFA5.1. Assim, a classificação e os requisitos são os mesmos.

A Tabela 2 apresenta os requisitos químicos para eletrodos revestidos aplicáveis aos aços Carbono:

Tabela 2 - Classificação dos eletrodos para aços carbono. (FORTES, 2005)

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

Os eletrodos revestidos para aço ao carbono mais utilizados são os E6013 (rutílicos) e E7018 (básicos). A Tabela 3 apresenta suas características principais.

Tabela 3 - Características Operacionais dos Eletrodos Revestidos para Aços ao Carbono (MACHADO, 1996)

Classificação AWS	Tipo de Revestimento/ Aglomerante	Posições de Soldagem	Tipo de Corrente	Penetração Relativa	Taxa de Deposição Relativa
E6013	Alto rutilo/Silicato de potássio	T	CA, CC	Baixa	Baixa
E7018	Baixo hidrogênio, pó de ferro/Silicato de potássio	T	CA, CCEP	Média	Média

Onde:

T – Todas as posições;

2.3.4. Seleção do eletrodo adequado

Para selecionar o eletrodo adequado para uma determinada aplicação muitos fatores devem ser analisados. Alguns fatores são discutidos a seguir (FORTES, 2005).

Tipo do metal de base: sabe-se que os eletrodos revestidos de alma de aço doce não apresentam problemas na soldagem de aços carbono ou aços de baixo carbono (teor de carbono inferior a 0,30 %, em peso) uma vez que a resistência à tração do metal de solda normalmente excede a resistência à tração do metal de base. Entretanto, a constituição química a que o metal de base é formado é de suma importância. Soldas realizadas em aços de usinagem fácil que

apresentam uma quantidade significativa de enxofre serão porosas a menos que sejam utilizados eletrodos de baixo hidrogênio como o E7018. Existem situações que são encontrados aços carbono de composição química duvidosa, assim, nessa situação recomenda-se usar um eletrodo revestido de baixo hidrogênio.

Posição de soldagem: a posição de soldagem vai determinar se será utilizado um eletrodo que solda em todas as posições ou outro com aplicabilidade em posições plana e horizontal. Quando se utiliza correntes de soldagem mais elevadas ocorre maiores taxas de deposição, portanto o processo será possível apenas nas posições plana ou horizontal. Para a sua otimização, a peça deve ser posicionada levando-se em consideração a facilidade de soldagem e a sua maior velocidade.

Espessura da chapa: devem ser empregados eletrodos de baixa penetração na soldagem de chapas finas, e para chapas mais espessas pode ser necessário eletrodo de alta penetração. Estas chapas grossas podem necessitar de eletrodos de penetração profunda para o passe de raiz, e de um eletrodo de mais alta taxa de deposição para os passes subsequentes.

Montagem: em algumas situações como no fechamento de abertura das peças a serem soldadas existem eletrodos que são mais adequados. Assim, alguns fabricantes de eletrodos fabricam consumíveis especialmente formulados para montagens deficientes.

Custos da soldagem: os custos do processo são influenciados principalmente pela mão de obra, pelo custo de eletrodos, e pela taxa e eficiência de deposição.

Equipamento disponível: para escolher o eletrodo que será utilizado é necessário levar em consideração os equipamentos CA ou CC disponíveis. Se ambos os equipamentos estiverem disponíveis, deve-se considerar alguns fatores. Para uma maior penetração do cordão de solda empregar CCEP, para uma penetração menos profunda e maior taxa de deposição empregar CCEN e para ficar livre de sopro magnético utilizar CA.

2.3.5. Manutenção e cuidado com os eletrodos revestidos

Para o bom desempenho do eletrodo revestido e para garantir a sua qualidade nos processos de soldagem, segundo Fortes (2005), deve-se levar em consideração o processo de armazenagem, empilhamento, ressecagem, manutenção e a sua validade. Assim alguns fatores devem ser destacados:

- O manuseio deve ser realizado com as mãos (luvas) limpas, isentas de graxas;

O revestimento dos eletrodos absorve a umidade da atmosfera, ou seja, é higroscópico, o que prejudica a soldabilidade, além de afetar a qualidade do metal depositado, formando poros e trincas, principalmente nos eletrodos básicos;

- A ressecagem é aplicável a eletrodos básicos, e para eletrodos de altíssimo rendimento. Eletrodos rútilicos, ferro fundido e inoxidáveis devem passar por esse processo apenas quando necessário. Já para os eletrodos celulósicos deve ser evitado;
- Como a absorção de umidade e a sua influência negativa na qualidade da solda diferencia-se segundo o tipo de revestimento que constitui o eletrodo, é necessário que as condições de armazenagem e ressecagem sejam diferentes;
- Para armazenar os eletrodos é imprescindível que eles estejam em suas embalagens originais, hermeticamente fechadas, em ambiente adequado, a uma temperatura entre 20 e 40°C, com uma umidade relativa do ar inferior a 50%;
- Após abrir as embalagens originais, os eletrodos rútilicos e celulósicos podem ser aplicados até um período de 8 horas, sem a necessidade de ressecagem, todavia os básicos devem ser armazenados em estufa. Se os eletrodos não forem utilizados nesse período de tempo, eles deverão ser mantidos em estufa aquecida;
- Os eletrodos deverão ser ressecados caso eles apresentem umidade excessiva, o que é geralmente indicado através de manchas no revestimento como ocorre nos eletrodos básicos e também pela ocorrência de porosidade no cordão de solda;
- O número de ciclos de ressecagem dos eletrodos revestidos é limitado, uma vez que a integridade do revestimento pode ser comprometida;
- Como os eletrodos são produzidos por diferentes fabricantes, é comum encontrar valores de tempos e temperaturas diferentes que são consideradas ideais para a manutenção e ressecagem. Dessa forma, as empresas devem possuir procedimentos específicos para a armazenagem correta levando em consideração estas diferenças. Na ausência destes, podem ser aplicadas diretamente as recomendações do fabricante. (JR; RAMALHO, 2005)

2.4. Efeito da polaridade da corrente de soldagem

A soldagem com eletrodos revestidos pode empregar tanta corrente alternada (CA) quanto corrente contínua (CC), de forma que o eletrodo pode ser ligado ao polo positivo (CCEP, chamada também como polaridade reversa) ou negativo (CCEN, chamada também como polaridade direta). Os fenômenos físicos que ocorrem nos polos de um arco voltaico são diferentes.

Alguns eletrodos funcionam bem em ambas as polaridades e outros somente com CCEP ou somente em CCEN. A Figura 8 mostra as conexões e os efeitos das polaridades CCEN e CCEP.

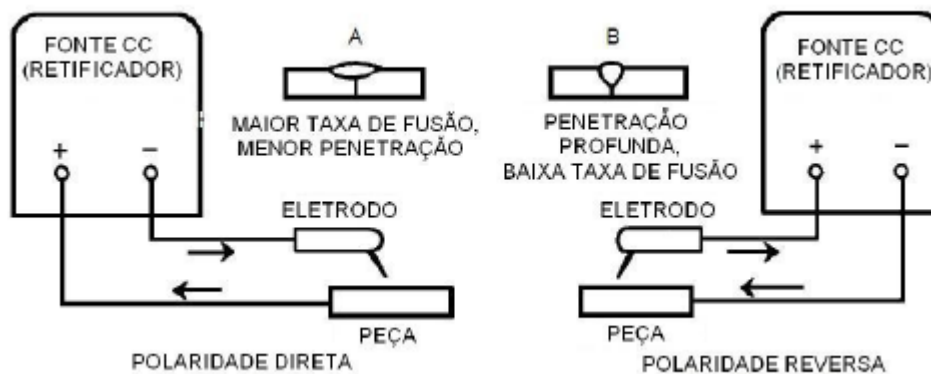


Figura 8. Conexões e Efeitos da Corrente Contínua (Apostila ESAB)

A estrutura do arco da soldagem é apresentada na Figura 9.

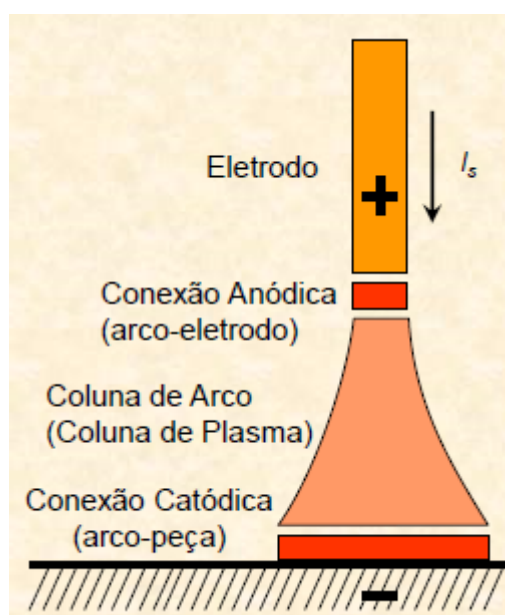


Figura 9 – Constituintes da tensão do arco da soldagem

(LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

A polaridade influencia na distribuição de calor no eletrodo e na peça de forma que o balanço de calor entre o ânodo e o cátodo apresentam comportamentos diferentes quando os eletrodos no processo de soldagem são consumíveis e não consumíveis (Figura 10).

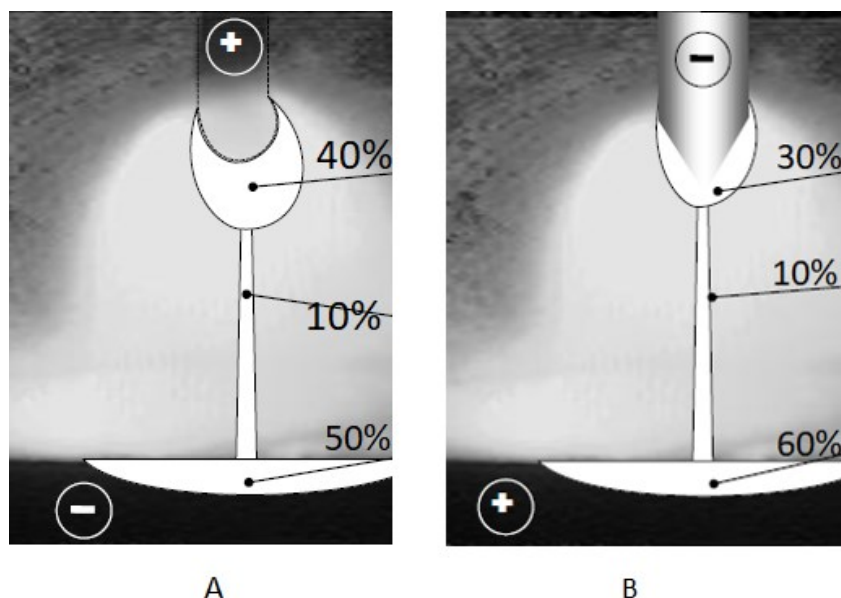


Figura 10 -Balanço de calor entre o ânodo e o cátodo

(A) Eletrodo consumível (B) Eletrodo não consumível

(LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

A zona catódica que representa o polo negativo, que é por onde partem os elétrons e para onde se dirigem os íons positivos, apresentam ganho de energia devido ao choque de íons, reações químicas, aquecimento por efeito joule e calor do arco, condução e radiação. Já as perdas de energia pelo cátodo estão relacionadas principalmente pela condução (refrigeração do eletrodo), arrancamento de elétrons (processo endotérmico), energia perdida para evaporar átomos metálicos e também pelos fenômenos de convecção e radiação de calor para o meio ambiente.

A zona anódica que representa o polo positivo, para onde se dirigem os elétrons, apresentam ganho de energia principalmente devido a energia cinética dos elétrons e energia térmica dos elétrons (reação exotérmica quando choca com o ânodo). Ademais, ao ânodo é ainda fornecido energia devido a energia de recombinação de íons na superfície, condução de calor e radiação do arco, reações químicas e aquecimento por efeito Joule. Já as perdas de energia do ânodo acontecem fundamentalmente por causa da energia perdida para evaporar átomos metálicos, partículas volumosas expelidas pelo ânodo, energia gasta para dissociar moléculas em contato com a superfície, condução de calor para a chapa ou eletrodo e convecção e radiação de calor para o meio ambiente.

Segundo Modenesi (2001) o tipo de corrente e a sua polaridade afetam a estabilidade do arco, modo de transferência de metal de adição, a forma e as dimensões da poça de fusão.

Normalmente, a soldagem manual com polaridade CCEP proporciona uma maior penetração enquanto que na polaridade CCEN a penetração é menor, entretanto a taxa de fusão do eletrodo é maior. Quando se utiliza corrente alternada, a penetração e taxa de fusão tendem a ter valores intermediários, mas a estabilidade do processo pode ser inferior. Por outro lado, a soldagem com CA é melhor com eletrodos e correntes maiores, pois apresenta menos problemas com sopro magnético (Figura 11).

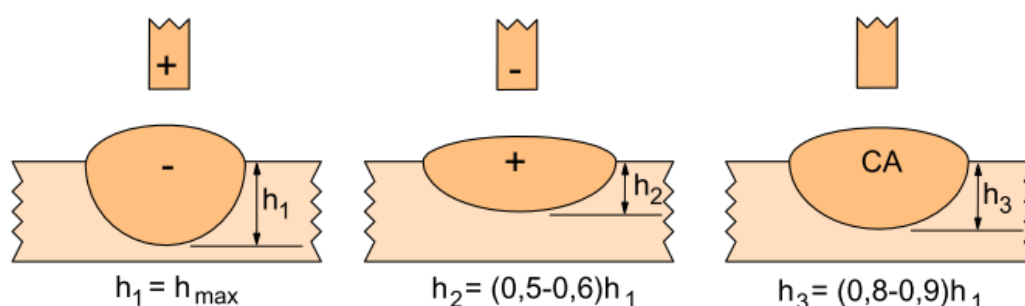


Figura 11 - Influência da polaridade e do tipo de corrente na penetração.

(MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007)

2.5. Aspectos Econômicos da Soldagem com ER

Segundo Filho (2005b) os aspectos econômicos da soldagem com eletrodos revestidos são caracterizados pelo consumo, produção e rendimento. Estes aspectos vão depender do tipo da fonte de energia, tipo de eletrodo e dos demais parâmetros de soldagem, sendo que os fatores que mais influenciam o consumo do eletrodo são o seu diâmetro e a composição química da alma, a polaridade e a intensidade de corrente utilizada.

A taxa de fusão (TF) ou consumo real do eletrodo é maior que a taxa de deposição (TD) que representa a produção de material de adição, pois no processo existem perdas nas transferências de massa, devido a formação de respingos, fumos e gases. Para Fortes (2005) isso significa que se um eletrodo apresenta 60% de eficiência de deposição, para cada 100 g da alma do eletrodo consumido, serão produzidos 60 g de metal depositado.

A taxa de fusão representa a quantidade de material da alma que foi fundida enquanto que a taxa de deposição é a massa de metal de solda depositado por unidade de tempo no período que o arco está aberto. Portanto, o rendimento de deposição real representa a massa de metal depositado comparada com a massa total de eletrodo consumido e é expressa percentualmente.

De acordo com Filho (2005b), ao aumentar a energia de ionização da atmosfera do arco para eletrodos revestidos, com o comprimento de arcos iguais, o consumo do eletrodo será maior, a frequência de passagem de gotas do eletrodo para a peça aumentará, portanto, o diâmetro médio das mesmas irá reduzir.

Outro fator relevante é a viscosidade superficial da gota que dificulta a separação da mesma da ponta do eletrodo, exigindo maior intensidade de corrente para ocorrer a transferência. Assim, quanto maior o teor de gás dissolvido no interior da gota, as forças viscosas serão menores, acarretando maior consumo do eletrodo. Desta forma, o tipo de revestimento influencia de forma significativa na transferência metálica, pois o mesmo gera atmosferas de arco com diferentes graus de ionização, as quais influenciam nos diferentes modos de transferência de material de adição. Assim, pode-se considerar que a taxa de deposição e a taxa de fusão são muito dependentes do tipo de revestimento.

De fundamental importância na determinação dos fatores econômicos que influenciam em uma soldagem é a formação de respingos. Entre as principais fontes de respingos na soldagem a arco voltaico estão a desintegração da gota devido ao tamanho excessivo, evolução dos gases (explosão da gota e/ ou da poça de fusão), transferência irregular de metal, impacto do arco sobre a poça de fusão no instante de sua reignição após curto-circuito, instabilidade do arco, e baixa viscosidade superficial da gota (quanto menor a viscosidade da gota, maior a quantidade de respingos).

Desse modo, pode-se reduzir as perdas por respingos na soldagem com eletrodos revestidos por meio da seleção correta dos parâmetros de soldagem uma vez que esta influência de forma significativa na transferência metálica.

2.6. Análise da taxa de deposição e rendimento de deposição dos eletrodos revestidos

Em soldagem a arco, a fusão do eletrodo ocorre pelo calor do arco e pelo calor gerado por efeito Joule devido a corrente elétrica que passa no eletrodo. Em muitos casos, a produtividade está diretamente relacionada com a velocidade com que o eletrodo se funde e o metal de adição é depositado na junta. Taxa de fusão é definida como o comprimento, ou a massa da alma do eletrodo que é fundido por unidade de tempo (Equação 1).

$$T_f = \frac{P_f}{t} \quad (1)$$

Tf= taxa de fusão [kg/h]

Pf= massa de alma do eletrodo fundido [kg]

t= tempo de soldagem [h]

A massa de alma do eletrodo fundido é calculada a partir do comprimento do eletrodo fundido como:

$$Pf = \frac{(\pi \times d^2 \times (Li - Lf) \times \rho \times 10^{-3})}{4} \quad (2)$$

d= diâmetro da alma do eletrodo [mm]

Li= comprimento inicial do eletrodo [mm]

Lf= comprimento final do eletrodo [mm]

ρ = densidade do aço [7,86g/cm³]

A taxa de fusão depende de alguns parâmetros como da composição da alma do eletrodo, da espessura e composição do revestimento, do tipo e intensidade da corrente de soldagem. A taxa de fusão varia continuamente quando o eletrodo é consumido devido ao progressivo aquecimento deste durante a soldagem por efeito Joule. Assim, na prática utiliza-se um valor médio de Tf, medido em um intervalo de tempo suficientemente longo.

Todavia, uma parte do metal fundido é perdida na forma de respingos ou evaporada e oxidada. Assim, a taxa de deposição tem influência direta sobre o custo do metal de solda depositado. Esta é definida como a massa de metal de solda depositada por unidade de tempo de arco aberto.

$$Td = \frac{Mf - Mi}{t} \quad (3)$$

Mf= massa da placa de teste depois da deposição [kg]

Mi= massa da placa de teste antes da deposição [kg]

t= tempo de arco aberto [h]

O rendimento de deposição é um dos fatores mais importantes na representação dos custos de soldagem, definido como a relação em porcentagem entre as taxas de deposição e de fusão, representando a massa de metal de solda depositado no cordão em relação à massa da alma do eletrodo que foi consumido durante a abertura do arco. Assim, quanto maior a eficiência de deposição, menor a quantidade de material perdido durante a soldagem.

$$\eta = \frac{T_d}{T_f} \times 100 \quad (4)$$

η = rendimento de deposição [%]

T_d = taxa de deposição [kg/h]

T_f = taxa de fusão [kg/h]

Caso o eletrodo possua adições metálicas em seu revestimento, como por exemplo pó de ferro, η pode ter valores superiores a 100%, uma vez que T_f não incorpora a contribuição do revestimento para a formação da solda. Na prática, a maioria dos eletrodos revestidos possuem η entre 70 e 200%.

CAPÍTULO 3 – EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

Neste trabalho foi explorada a utilização de eletrodos revestidos com o objetivo de verificar a diferença na taxa de fusão para os eletrodos básicos e rútilicos operados na polaridade de corrente contínua com eletrodo positivo e na polaridade de corrente contínua com eletrodo negativo, onde foi realizado a fusão dos eletrodos E7018 e E6013 de mesmo diâmetro ($d=2,5$ mm) por meio da soldagem manual. Nesta seção serão abordados os procedimentos utilizados.

3.1. Equipamentos utilizados

Os corpos de prova foram confeccionados com a utilização de equipamentos de soldagem para eletrodos revestidos, equipamentos de corte, equipamentos de limpeza e abrasão, sempre com equipamentos de segurança compatíveis com a operação. Segue a representação dos equipamentos utilizados neste trabalho.

Foi utilizado a máquina de jateamento de areia da marca MFF, modelo GSV - 700 para a limpeza das placas de teste antes de serem soldados (Figura 12).



Figura 12 - Máquina de jateamento de areia

Foi utilizado um forno do fabricante Thermosolda LTDA, modelo 507 z , para a ressecagem dos eletrodos revestidos básicos e rútilicos seguindo as especificações do fabricante (Tabela 6) para cada tipo de eletrodo antes de iniciar o processo de soldagem (Figura 13).



Figura 13 - Estufa para secagem dos eletrodos

Foi utilizada a fonte de energia Larry TE 160 da fabricante IMC (Santa Catarina), mostrada na figura abaixo (Figura 14). É uma fonte do tipo inversora que fornece a corrente contínua de 7 a 140 A e tensão em vazio para ER de 83V.



Figura 14 - Fonte de Energia Larry TE160

Para comparação de resultados também foi utilizada a fonte retificadora ESAB LHG 425 que fornece corrente contínua em uma faixa de corrente de 45 a 425 A e tensão em vazio

máxima de 80 V. Este equipamento caracteriza-se pelo ajuste da corrente de soldagem de forma contínua através de uma manivela que desloca a parte do núcleo do transformador principal, o que possibilita selecionar de forma contínua o valor necessário da corrente (Figura 15).



Figura 15 - Fonte de soldagem ESAB LHG 425

Para a medição da tensão e da corrente de soldagem foram utilizados multímetro digital Minipa ET-3019 e amperímetro digital Brasfort representados na Figura 16.



Figura 16 – Multímetro e Amperímetro

Na soldagem foi utilizada escova de aço e picador para garantir a efetiva remoção de escória do cordão de solda para a pesagem da peça, para o cálculo da massa adicionada à chapa, que foi encontrada fazendo a diferença entre a massa antes e após soldagem (Figura 17).



Figura 17 - Escova de aço e picador

Para pesar os eletrodos e as placas de teste foi utilizado a Balança da OHAUS com capacidade de 2kg e precisão de 0,01g (Figura 18).



Figura 18 - Balança OHAUS

Neste trabalho foram utilizados durante todo o processo de soldagem os equipamentos de proteção individual de maneira a garantir a segurança da operação. Entre os equipamentos utilizados pelo soldador estão o avental, macacão, óculos de proteção, luvas de soldagem, touca e máscara de solda (Figura 19).



Figura 19 - EPI's

3.2. Consumíveis

Foram utilizados eletrodos básicos E7018 e rutilicos E6013, todos com diâmetro de 2,5 mm como mostrado na Figura 20.

ELETRODO OK®	METAL DEPOSITADO	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	POSIÇÕES SOLDAGEM	TENSÃO/ TIPO CORR.	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	FAIXA DE CORRENTE (A)
OK® 46.00 rutilico ASME SFA 5.1 E6013	C 0,07	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%	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		
OK® 48.04 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					

3.3. Material de base

Para realizar os cordões de solda foram utilizadas placas de teste de aço ao carbono ABNT 1020 com dimensões aproximadas de 250x70x3 mm (Figura 21). As principais características do material de base podem ser visualizadas na Tabela 4 e suas massas indicadas na Tabela 5.

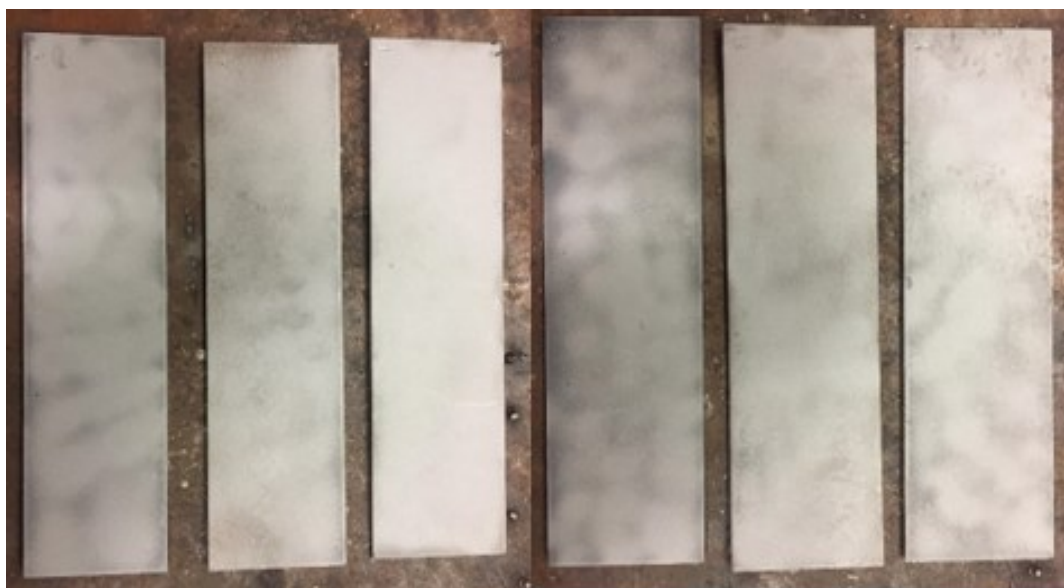


Figura 21 - Placas de teste

Tabela 4 - Características das Chapas/SAE 1020 Fonte: <http://www.tenax.com.br/tenax/produtos/chapas-e-placas-de-aco/sae-1020/>

EQUIVALENTES	COMP. QUÍMICA (DIRETRIZ)	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES	TRATAMENTO TÉRMICO
NBR-6648 / ASTM A-283 Gr. C	C: 0,18% - 0,23% / Mn: 0,30% - 0,60% / P máx: 0,030% / S máx: 0,050%	Aço de baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade. Aplicável em produtos de variadas formas. Pode ser aplicado em cementação.	Aplicado na indústria automobilística, parafusos, eixos, componentes forjados sem maiores exigências, barra de distribuição, peça cementada, tubos soldados.	Cementação a 915 °C por 8 h, reaquecimento a 790 °C e têmpera em água. Revenimento a 175 °C.

Tabela 5 - Massa da placa de teste antes da solda

Nº da Placa de teste	Massa da placa [g]
1	408,70
2	407,61
3	409,42
4	402,92
5	407,71
6	421,26

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos, inicialmente fez-se as preparações das peças. As seis chapas de aço (Figura 21) foram limpas com o equipamento de jato de areia (Figura 12) do próprio laboratório Laprosolda e os eletrodos passaram pelo processo de ressecagem de acordo com as faixas de tempo e temperatura estipuladas pelo fabricante (Tabela 6).

Tabela 6 - Recomendações de ressecagem de eletrodos revestidos OK® Fonte: Apostila de Eletrodos Revestidos ESAB

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

Após a limpeza efetuou-se a pesagem das chapas e dos eletrodos E6013 e E7018 através de uma balança devidamente calibrada (Figura 18). Posteriormente, os comprimentos destes foram medidos com uma régua.

Antes de iniciar os experimentos, por meio do catálogo da ESAB pesquisou-se as correntes de trabalho dos eletrodos E6013 e E7018. Escolheu-se a corrente de 90 A que atendia ambos os requisitos dos eletrodos, uma vez que será utilizada a mesma corrente de soldagem (Tabela 7).

Tabela 7 - Recomendações de parâmetros de soldagem para os eletrodos revestidos OK® Fonte: Catálogo ESAB

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
OK 33.80	E7024	5,0	155 – 300	180 / 200 / 220	1,5 / 1,7 / 1,9	74 / 71 / 73
		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
OK 48.04 OK 48.06 OK 48.07 OK 55.00	E7018 E7018 E7018-1 E7018-1	6,0	270 – 430	320 / 360	4,3 / 5,3	72 / 69
		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

Os equipamentos para a soldagem foram montados de acordo com o circuito de operação para eletrodos revestidos que consiste na fonte de energia, porta-eletrodos, cabos e conexões (Figura 22). Inicialmente, foi utilizada a fonte de energia Larry TE 160 que é uma fonte do tipo inversora que fornece a corrente contínua em faixa de 7 a 140 A (Figura 14). Posteriormente, para comparação de resultados, todo o procedimento foi repetido nas mesmas condições de operação com a utilização da fonte retificadora ESAB LHG 425 que caracteriza-se pela corrente de soldagem ser ajustada de forma contínua pelo deslocamento de parte do núcleo do transformador principal por meio de uma manivela (Figura 15).

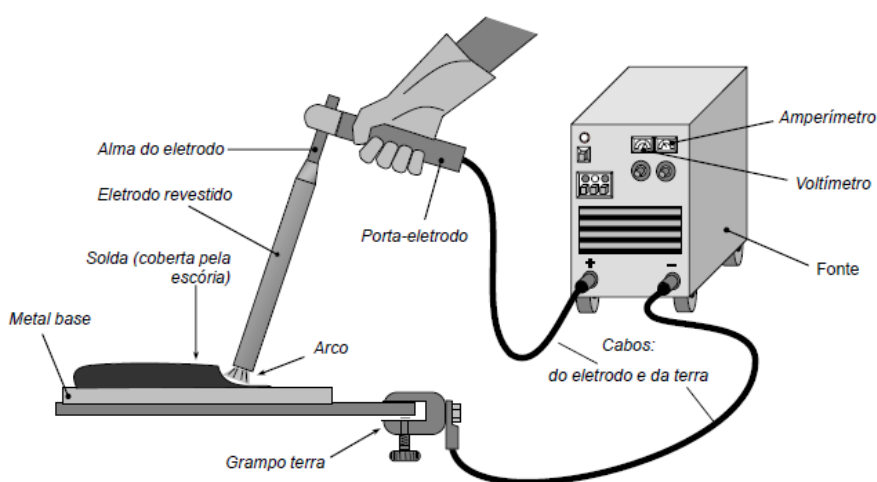


Figura 22 - Esquema do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido

(LAPROSOLDA - FEMEC - UFU – Prof. Vladimir Ponomarev)

Depois foi utilizado o amperímetro com 400 A na escala para ajustar a corrente de soldagem da fonte para 90 A (Figura 16).

Primeiramente, foi realizado a fusão dos eletrodos rutilico na polaridade CCEP. Enquanto o eletrodo era fundido, foram obtidos a corrente e o tempo de solda, utilizando-se um amperímetro (Figura 16) e um cronômetro, respectivamente.

Após realizar o cordão de solda, são obtidos a massa da placa teste e do eletrodo utilizado. Em seguida, foi realizada a limpeza da peça retirando a escória para a sua pesagem, para o cálculo da massa adicionada à chapa, que é facilmente encontrada fazendo a diferença entre a massa antes e após soldagem. Posteriormente, os eletrodos tiveram seus comprimentos finais medidos para cálculos da massa da alma fundida e eletrodo fundido, determinado pela redução em seu comprimento.

Durante a soldagem dos eletrodos rútilicos E6013 número 7, 6 e 5 na chapa 1 seguindo as etapas descritas anteriormente na CCEP, por meio de um voltímetro foi obtido uma tensão da fonte de 23V.

Depois foram realizados os experimentos com os eletrodos básicos E7018 números 1, 2 e 3 com a polaridade CCEP seguindo as mesmas etapas utilizando o valor da corrente da fonte de 90 A. Por meio de um voltímetro mediu-se a tensão da fonte obtendo um valor de 20 V.

Para efeito de comparação da taxa de fusão dos eletrodos básicos e rútilicos operados na polaridade de corrente contínua com eletrodo positivo e na polaridade de corrente contínua com eletrodo negativo, os procedimentos descritos anteriormente foram repetidos na polaridade negativa.

CAPÍTULO 5 – TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Resultados obtidos

Os resultados são apresentados a seguir. A Tabela 8 apresenta os cordões de solda dos eletrodos rútilicos E6013 e dos eletrodos básicos E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a fonte de energia Larry TE 160, onde são identificados as chapas e os eletrodos utilizados no processo de soldagem.

Tabela 8 - Aspectos dos cordões de solda dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte Larry TE160

E6013 - CCEP Fonte Larry TE160 Chapa N.º 1 Eletrodo N.º 7		E6013 - CCEP Fonte Larry TE160 Chapa N.º 1 Eletrodo N.º 6		E6013 - CCEP Fonte Larry TE160 Chapa N.º 1 Eletrodo N.º 5	
E6013 - CCEN Fonte Larry TE160 Chapa N.º 4 Eletrodo N.º 1		E6013 - CCEN Fonte Larry TE160 Chapa N.º 4 Eletrodo N.º 2		E6013 - CCEN Fonte Larry TE160 Chapa N.º 4 Eletrodo N.º 3	
E7018 - CCEP Fonte Larry TE160 Chapa N.º 2 Eletrodo N.º 1		E7018 - CCEP Fonte Larry TE160 Chapa N.º 2 Eletrodo N.º 2		E7018 - CCEP Fonte Larry TE160 Chapa N.º 3 Eletrodo N.º 3	
E7018 - CCEN Fonte Larry TE160 Chapa N.º 5 Eletrodo N.º 4		E7018 - CCEN Fonte Larry TE160 Chapa N.º 5 Eletrodo N.º 5		E7018 - CCEN Fonte Larry TE160 Chapa N.º 3 Eletrodo N.º 6	

Para efeito de comparação dos resultados, todo o procedimento foi repetido nas mesmas condições de operação com a utilização da fonte retificadora ESAB LHG 425. Na Tabela 9 é representado as chapas após a execução da soldagem dos eletrodos rútilicos E6013 e eletrodos básicos E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.

Tabela 9 - Aspectos dos cordões de solda dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte ESAB LHG 425.

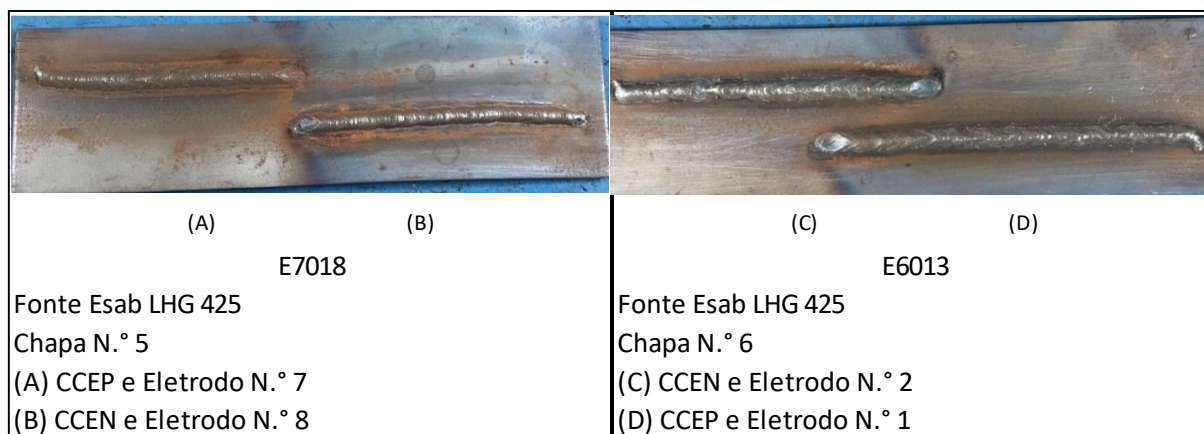


Tabela 11 apresentam os dados (média de 3 medições) das chapas de teste e dos eletrodos básicos e rútilicos antes e após serem consumidos nas polaridades CCEP e CCEN nas fontes de energia Larry TE 160 e ESAB LHG 425 por meio dos conceitos e equações apresentados neste trabalho na seção 3.4

Tabela 10 - Dados dos eletrodos E6013 e E7018 antes e após serem consumidos nas polaridades CCEP e CCEN nas fontes de energia Larry TE 160 e ESAB LHG 425.

Fonte	Características do eletrodo			Massa [g]		Comprimento [mm]		Massa de metal fundido [g]
	Tipo	N.º	Polaridade	Antes	Depois	Antes	Depois	
TE160	E6013	1	CCEN	18,27	5,89	349	119	8,87
TE160	E6013	2	CCEN	18,23	4,83	348	99	9,61
TE160	E6013	3	CCEN	18,32	4,26	350	87	10,15
TE160	E6013	5	CCEP	18,26	6,48	348	130	8,41
TE160	E6013	6	CCEP	18,28	7,11	349	143	7,95
TE160	E6013	7	CCEP	18,27	6,01	350	120	8,87
ESAB	E6013	1	CCEP	18,29	6,25	349	128	8,53

ESAB	E6013	2	CCEN	18,41	6,43	349	127	8,57
TE160	E7018	1	CCEP	20,3	9,11	300	140	6,17
TE160	E7018	2	CCEP	20,44	8,31	301	140	6,21
TE160	E7018	3	CCEP	20,98	10,76	301	160	5,44
TE160	E7018	4	CCEN	20,97	7,69	301	118	7,06
TE160	E7018	5	CCEN	21,02	8,10	301	124	6,83
TE160	E7018	6	CCEN	21,06	7,52	301	116	7,14
ESAB	E7018	7	CCEP	20,31	9,82	301	150	5,83
ESAB	E7018	8	CCEP	20,28	7,87	300	123	6,83

Tabela 11 - Dados coletados após a soldagem com eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN nas fontes de energia Larry TE 160 e ESAB LHG 425.

Fonte	Características do Eletrodo			Massa da placa de teste [g]			Massa de metal depositado [g]	Tempo [s]	Corrente [A]	Taxa de deposição [kg/h]
	Tipo	N.º	Polaridade	Antes	Com escória	Sem escória				
TE160	E6013	7	CCEP	408,7	420,14	416,56	7,86	40,85	92	0,69
TE160	E6013	6	CCEP	416,56	427,1	423,23	6,67	37,92	93	0,63
TE160	E6013	5	CCEP	423,23	434,84	430,59	7,36	39,90	95	0,66
TE160	E6013	1	CCEN	402,92	414,16	410,77	7,85	36,81	89	0,77
TE160	E6013	2	CCEN	410,77	423,07	419,41	8,64	37,07	87	0,84
TE160	E6013	3	CCEN	419,41	432,20	428,35	8,94	40,34	88	0,80
ESAB	E6013	1	CCEP	421,36	431,95	428,66	7,30	37,54	95	0,70
ESAB	E6013	2	CCEN	428,66	439,83	436,49	7,83	32,70	92	0,86
TE160	E7018	1	CCEP	407,61	418,86	416,15	8,54	36,93	95	0,83
TE160	E7018	2	CCEP	416,15	427,60	424,49	8,34	39,43	94	0,76
TE160	E7018	3	CCEP	409,42	418,91	416,56	7,14	32,67	94	0,79
TE160	E7018	4	CCEN	415,45	427,92	424,85	9,4	39,97	93	0,85
TE160	E7018	5	CCEN	424,85	436,77	433,79	8,94	37,71	93	0,85
TE160	E7018	6	CCEN	416,61	429,04	425,85	9,24	39,23	92	0,85
ESAB	E7018	7	CCEP	433,79	443,68	441,31	7,52	34,00	94	0,80
ESAB	E7018	8	CCEN	441,31	452,98	450,08	8,77	34,48	95	0,92

A Tabela 12 apresenta todos os parâmetros calculados para cada teste com eletrodos básicos e rútilicos por meio das equações (1), (2), (3) e (4). Dessa forma, foi possível realizar a comparação das taxas de deposição e fusão de cada eletrodo e seus respectivos rendimentos de deposição nas polaridades CCEP e CCEN.

Tabela 12 - Parâmetros calculados para cada teste com eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN

Fonte	Características do eletrodo			Taxa de deposição [kg/h]	Taxa de fusão [kg/h]	Rendimento de deposição
	N.º	Tipo	Polaridade			
TE160	1	E7018	CCEP	0,83	0,60	138,75
TE160	2	E7018	CCEP	0,76	0,57	133,59
TE160	3	E7018	CCEP	0,79	0,60	131,25
TE160	4	E7018	CCEN	0,85	0,64	133,13
TE160	5	E7018	CCEN	0,85	0,65	130,91
TE160	6	E7018	CCEN	0,85	0,66	129,45
ESAB	7	E7018	CCEP	0,80	0,62	128,43
ESAB	8	E7018	CCEN	0,92	0,71	128,42
TE160	1	E6013	CCEN	0,77	0,87	88,46
TE160	2	E6013	CCEN	0,84	0,93	89,93
TE160	3	E6013	CCEN	0,80	0,91	88,10
TE160	5	E6013	CCEP	0,66	0,76	86,97
TE160	6	E6013	CCEP	0,63	0,75	83,49
TE160	7	E6013	CCEP	0,69	0,78	88,23
ESAB	1	E6013	CCEP	0,70	0,82	85,37
ESAB	2	E6013	CCEN	0,86	0,94	91,70

5.2 Análise dos Resultados

Com os dados coletados foram gerados gráficos, mostrando cada parâmetro (média de 3 medições), com a média dos valores obtidos através da fonte de energia Larry TE160 e o valor absoluto operando com a fonte ESAB LHG 425. A Figura 23 representa a taxa de fusão da alma dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte Larry TE160 e a ESAB LHG 425.

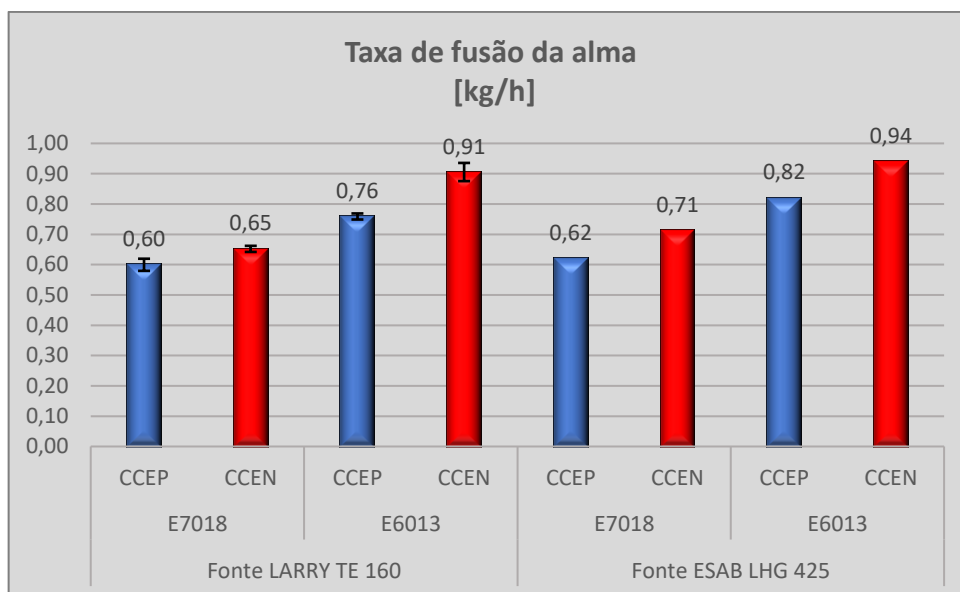


Figura 23- Taxa de fusão da alma dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.

A Figura 24 representa a taxa de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte Larry TE160 e a fonte ESAB LHG 425.

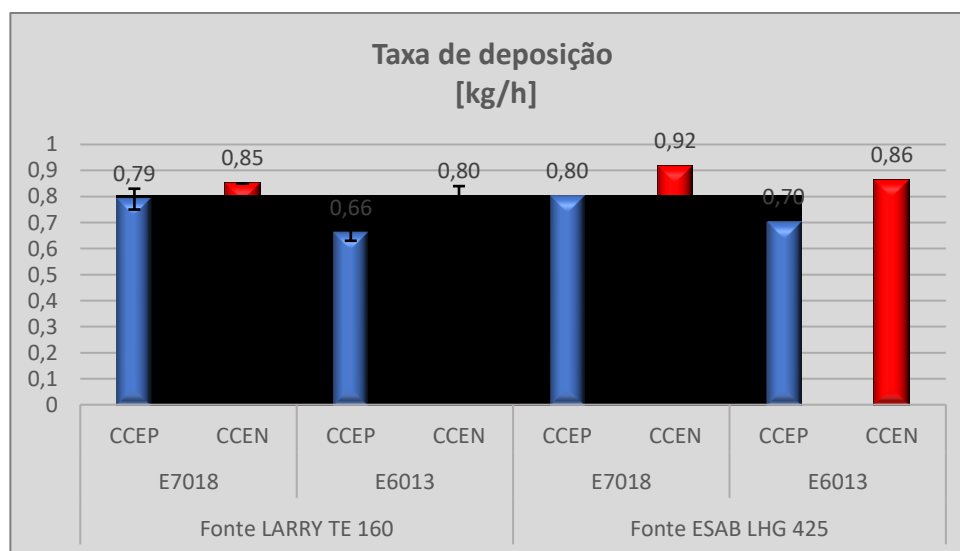


Figura 24 - Taxa de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.

A Figura 25 representa o rendimento de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN utilizando a Fonte Larry TE160 e a fonte ESAB LHG 425.

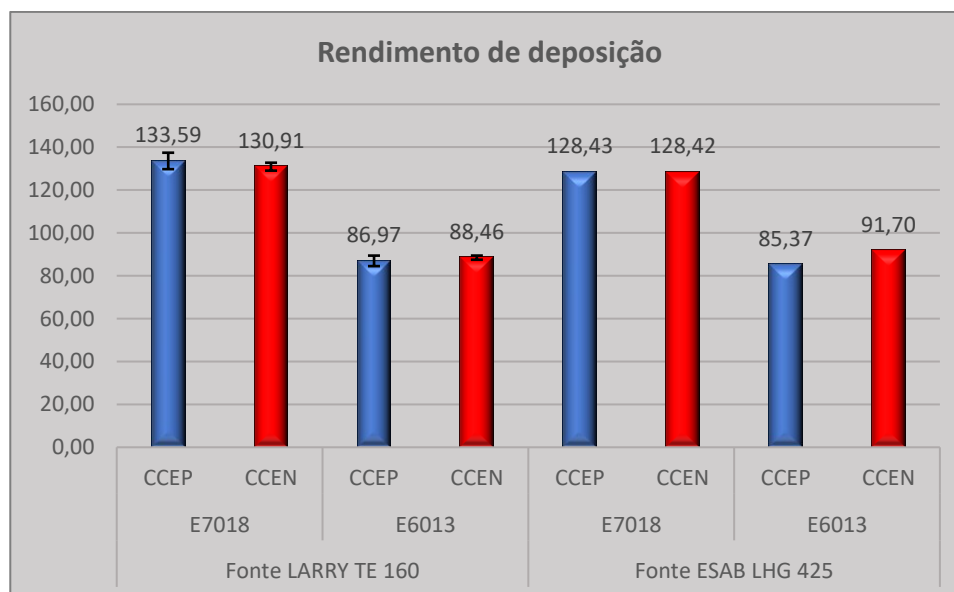


Figura 25- Rendimento de deposição dos eletrodos E6013 e E7018 nas polaridades CCEP e CCEN.

Conforme ilustrado pela Figura 24, a taxa de fusão é maior na polaridade CCEN, tanto para os eletrodos básicos E7018 quanto para os eletrodos rútilicos E6013, confirmando o que é relatado na literatura. Isso é justificado pelo fato que nos processos de soldagem com eletrodos consumíveis, o calor gerado no cátodo é, usualmente, maior de que no ânodo (devido à maior energia gerada na emissão de elétrons “por campo” nos cátodos “frios”). Logo quando o eletrodo vira o cátodo (polaridade CCEN), ele vai ser consumido mais rápido, devido ao fato de a maior parte do calor ser gerado nesta região, o que justifica a maior taxa de fusão na polaridade CCEN.

É interessante observar também, na Figura 23, que para soldas feitas com os eletrodos rútilicos E6013 foi obtido maior taxa de fusão que os eletrodos básicos E7018 em ambas as polaridades. Isso ocorre, pois, para a mesma corrente de soldagem, o E7018 se funde mais lentamente (velocidade linear de fusão da alma em mm/s menor) devido a sua maior espessura de revestimento em relação ao eletrodo E6013. Entretanto, este fato não significa que o E6013 terá mais massa de metal de solda depositada por unidade de tempo de arco aberto que o E7018, pois este possui uma quantidade considerável de pó de ferro no revestimento e tal fato prevalece. Assim, a taxa de deposição do E7018 é maior que o E6013 conforme pode ser observado na Figura 24, em que observa-se que taxa de deposição do E7018 é 16 % maior na polaridade CCEP e 7% maior na polaridade CCEN.

Um fato relevante evidenciado é o rendimento do eletrodo básico E7018 ter valores superiores a 100%, uma vez que este apresenta uma adição do pó de ferro em seu revestimento. Observa-se que o eletrodo E7018 apresenta aproximadamente 30% de pó de ferro na sua

composição o que confirma os valores fornecidos pelo fabricante que pode ser analisado pelos resultados obtidos de rendimento de deposição (Figura 25) que mostra que as duas fontes de soldagem obtiveram aproximadamente um rendimento de 130% em ambas as polaridades

Para o eletrodo rutílico E6013 obteve-se uma média no rendimento de 86,17 % na polaridade CCEP e 90,08% na polaridade CCEN através da análise dos resultados das duas fontes de soldagem. Assim, percebe-se que o eletrodo básico E7018 possui um rendimento superior em relação ao E6013 de 52% na polaridade CCEP e 44% na polaridade CCEN. Essa diferença considerável justifica-se pela presença de pó de ferro na composição do revestimento do eletrodo E7018 e também devido a sua maior espessura.

Ressalta-se que a discrepância observada nos resultados entre as fontes pode ser explicada pelas diferenças construtivas entre as mesmas, principalmente no que diz respeito a indutância que controla as mudanças da corrente e , logo, é responsável pela geração de respingos (quanto menor a indutância maior a dinâmica da mudança da corrente e maior o risco de gerar respingos).

Também, foi realizada a Inspeção Visual sobre as deposições resultantes do estudo, com o qual procurou-se um indicativo da qualidade dos cordões por meio da observação de características ou defeitos superficiais e também da geração de respingos(Tabela 8 e Tabela 9). Com isto, para as soldas feitas com os eletrodos rútilicos E6013, é evidenciado claramente uma maior quantidade de respingos na polaridade CCEP que na polaridade CCEN, o que não ocorreu com o eletrodo básico E7018 que gerou mais respingos na polaridade CCEN.

Ademais, para as soldas feitas com os eletrodos básicos E7018, observa-se um bom aspecto visível de deposição dos cordões de solda, apresentando uma ótima soldabilidade com baixo índice de respingos, o que pode ser justificado pela quantidade considerável de pó de ferro no revestimento.

Na Figura 27 observa-se que o rendimento de deposição para o eletrodo básico E7018 obteve valores próximos em ambas as polaridades, embora um pouco menor na CCEN devido a maior perda por respingos, tipicamente observado na polaridade CCEN para eletrodos básicos (no rutílico é observado comportamento contrário).

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

Considerando o objetivo de avaliar a influência da polaridade na taxa de fusão dos eletrodos básico E7018 e rutílico E6013 por meio da soldagem ER, neste trabalho tem-se como principais conclusões:

1. A taxa de fusão dos eletrodos E6013 e E7018 foram maiores na polaridade CCEN. Isso é justificado pelo fato que nos processos de soldagem com eletrodos consumíveis, o calor gerado no cátodo ser, usualmente, maior de que no ânodo. Logo quando o eletrodo vira o cátodo (polaridade CCEN), ele vai ser consumido mais rápido, devido ao fato de a maior parte do calor ser gerado nesta região, o que justifica a maior taxa de fusão na polaridade CCEN.
2. Com os eletrodos E6013 obteve-se maior taxa de fusão linear (comprimento da alma/s) que os eletrodos E7018, visto que estes se fundem mais lentamente devido a sua maior espessura de revestimento em relação ao eletrodo E6013. Entretanto, o eletrodo E7018 apresenta maior taxa de deposição que o E6013, fato justificado pela quantidade considerável de pó de ferro no seu revestimento (o que também justifica sua menor taxa de fusão linear).
3. O eletrodo E7018 possui um rendimento superior significativo em relação ao E6013 em ambas as polaridades CCEP e CCEN. Essa diferença justifica-se pela presença de pó de ferro na composição do revestimento do eletrodo E7018 e também devido a sua maior espessura.
4. O rendimento de deposição para o eletrodo básico E7018 obteve valores próximos em ambas as polaridades, embora um pouco menor na CCEN devido a maior perda por respingos, tipicamente observado na polaridade CCEN para eletrodos básicos (no rutílico é observado comportamento contrário).
5. Por meio da Inspeção Visual dos cordões de solda nota-se que o E7018 apresenta uma melhor soldabilidade e menor índices de respingos que o E6013, devido a quantidade considerável de pó de ferro no revestimento.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se a realização de ensaios comparativos entre eletrodos básicos e rutilicos para analisar a influência da polaridade da corrente de soldagem na penetração do cordão de solda por meio do processo de eletrodo revestido.

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAIRES, P. P. **Estudo da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas**. 2007. 157p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

FILHO, A. L. **Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão**. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Produção, UNIFEI, Itajubá, 2005.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Metalurgia da Soldagem. **Metalurgia da Soldagem**, p. 47, 2001.

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

ESAB. Apostila de Eletrodos revestidos, 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acessado em: 30 maio. 2019.

ESAB. Apostila de Regras para Segurança em soldagem, goivagem e corte ao arco elétrico., 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostila_seguranca_na_soldagem_rev1.pdf>. Acessado em: 29 maio. 2019.

ESAB. Apostila de Eletrodos Inoxidáveis., 2005. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901101rev0_apostilaeletrodosinoxidaveis_nova.pdf>. Acessado em: 10 janeiro. 2019.

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

PONOMAREV, V., Apresentação Arco de Soldagem, CTA, Laprosolda, FEMEC, UFU.

PONOMAREV, V., Apresentação Fontes de Soldagem, CTA, Laprosolda, FEMEC, UFU.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Apostila da Universidade Federal de Minas Gerais, departamento de engenharia metalúrgica e de materiais. Belo Horizonte, julho de 2012.

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

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.

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

SCOTTI, A., PONOMAREV, V., “**Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**”, Artliber Editora, Brasil, 2008.