

ESTUDO DA POLARIDADE DA CORRENTE NA GEOMETRIA DA SOLDA COM ELETRODO REVESTIDO E6013, E6010 E7018.

Edilon de Oliveira França, Renner Washington Mariano dos Santos, Jorge

Eduardo dos Santos, Fabio Elizandro Pinto, Jose Rubens de Camargo, Maria

Silvia Almeida de Souza França

Fatec Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Rod. Ver. Abel Fabrício Dias, 4010 - Agua preta, Pindamonhangaba - SP, 12445-010-SP, Brasil, edilon.franca@fatec.sp.gov.br, renner.santos@fatec.sp.gov.br, jorge.santos37@fatec.sp.gov.br, fabio.elizandro@fatec.sp.gov.br, jose.camargo7@fatec.sp.gov.br, maria.franca4@fatec.sp.gov.br

Resumo

O presente estudo investigou os efeitos da polaridade da corrente elétrica sobre as características geométricas da solda como: profundidade de penetração, largura e altura do cordão utilizando eletrodos revestidos E6013, E6010 e E7018 no processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Foram realizadas soldagens em chapas de aço carbono ASTM A36 sob três condições de corrente: contínua com polaridade inversa (CC+), contínua com polaridade direta (CC-) e alternada (CA). As amostras foram preparadas e analisadas por ensaio de Metalografia e mensuração das dimensões da zona fundida com o auxílio do software ImageJ. Os resultados mostraram que a polaridade inversa (CC+) proporcionou maior penetração e largura do cordão, enquanto a polaridade direta (CC-) resultou em menor penetração e maior altura de reforço. O eletrodo E7018 apresentou o melhor desempenho global, com maior eficiência de fusão e estabilidade do arco, seguido pelo E6010 e, por último, o E6013. O estudo evidenciou que tanto o tipo de eletrodo quanto a polaridade da corrente elétrica são fatores determinantes na qualidade e no desempenho da solda.

Palavras-chave: Soldagem. Polaridade da Corrente. Eletrodo revestido. Penetração.

Área do Conhecimento: Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Introdução

Segundo Martins (2022), a soldagem constitui um dos métodos mais amplamente empregados para a união permanente de materiais metálicos, destacando-se por sua alta versatilidade, baixo custo operacional e relativa simplicidade na execução. Dentre os processos que utilizam arco elétrico como fonte de calor, o processo de eletrodo revestido (também denominado SMAW *Shielded Metal Arc Welding*) é amplamente difundido na indústria. Nesse processo, o eletrodo é composto por uma alma metálica de aço carbono, que conduz a corrente elétrica entre o porta-eletrodo e a peça a ser soldada, e com a isolação de um revestimento externo que, durante a abertura do arco se fundir, gera gases protetores para a poça de fusão, escória estabilizadora e elementos de liga que conferem características metalúrgicas desejáveis à junta soldada.

Os revestimentos dos eletrodos revestidos classificam-se, predominantemente, em quatro tipos: Básico, Rutílico, Celulósico e Ácido, cada qual com propriedades específicas que afetam diretamente o desempenho e a aplicabilidade da solda. O eletrodo Rutílico E6013, amplamente comercializado, possui resistência à tração da ordem de 414 MPa, e permite a realização de soldagens em todas as posições. Apresenta baixa penetração, reduzida emissão de respingos, boa aparência do cordão e excelente estabilidade de arco, sendo indicado para aplicações que exigem acabamento

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

superficial adequado, porém com baixa exigência estrutural. Em contrapartida, o eletrodo Celulósico E6010 exibe maior poder de penetração, mesmo mantendo a mesma resistência à tração (414 MPa), sendo amplamente utilizado na execução de passes de raiz em soldagens de dutos e tubulações, especialmente em posições forçadas. Já o eletrodo E7018, classificado como Básico ou de baixo hidrogênio, apresenta resistência mecânica superior, em torno de 483 MPa, e é recomendado para aplicações estruturais críticas, que envolvem a soldagem de aços de média e alta resistência, frequentemente empregados na indústria pesada, construção civil e setores de óleo e gás (Coelho, 2019).

Nos processos de soldagem a arco elétrico, a configuração da corrente elétrica seja: contínua (CC) ou alternada (CA) e sua respectiva polaridade exercem influência determinante sobre os parâmetros térmicos, a morfologia do cordão de solda e a eficiência da fusão. Quando se emprega corrente contínua, há duas possíveis polarizações: **Polaridade Direta (CC-) (DCEN: Direct Current Electrode Negative)**, em que o eletrodo é conectado ao polo negativo e a peça ao polo positivo, e **Polaridade Inversa (CC+) (DCEP: Direct Current Electrode Positive)**, na qual o eletrodo é ligado ao polo positivo e a peça ao polo negativo. Já na corrente alternada, a inversão da polaridade ocorre de forma cíclica e simétrica com frequência típica de 60 Hz, resultando em 60 alternâncias completas por segundo, o que produz um efeito térmico equilibrado entre eletrodo e peça (Martins, 2022).

A escolha da polaridade impacta diretamente a distribuição de calor no arco elétrico. Na polaridade direta (DCEN), aproximadamente 70% da energia térmica é transferida para a peça, resultando em menor fusão do eletrodo, penetração reduzida e baixa taxa de diluição do metal base características desejáveis em aplicações que exigem controle superficial da solda. Em contrapartida, a polaridade inversa (DCEP) concentra a maior parte do calor no eletrodo, promovendo elevada taxa de fusão, maior penetração do cordão e aumento significativo da diluição, sendo, portanto, indicada para passes de raiz e aplicações estruturais críticas. A corrente alternada (CA), por sua alternância periódica de polaridade, apresenta um comportamento intermediário entre DCEN e DCEP, proporcionando penetração e diluição moderadas, além de contribuir para a estabilidade do arco em materiais com óxidos superficiais, como o alumínio (Silva, 2017).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar comparativamente os efeitos da polaridade da corrente elétrica sobre a profundidade de penetração, largura e altura do cordão de solda, utilizando eletrodos revestidos de diferentes classificações e propriedades operacionais especificamente os tipos E6013 (Rutílico), E6010 (Celulósico) e E7018 (Básico ou de baixo hidrogênio) em diferentes regimes de corrente, a fim de compreender sua influência nas características metalúrgicas da junta soldada.

Metodologia

Foi conduzido um ensaio experimental de soldagem de revestimento na posição plana com o processo de soldagem eletrodo revestido com a finalidade de avaliar a influência da polaridade da corrente elétrica na profundidade de penetração, largura e altura do cordão de solda. Para tal, empregou-se uma fonte de soldagem do tipo transformador-retificador, marca *Miller*, modelo *Syncrowave 250 DX*, operando sob regime de corrente alternada (CA) e corrente contínua, com polaridade direta (CC-) (DCEN) e inversa (CC+) (DCEP). Como substrato, foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM A36 cuja a composição química encontra-se descrita na Tabela 1, com dimensões de 50 × 100 × 6,39 mm, preparadas para execução de cordões de solda no centro em passe único. Os consumíveis empregados consistiram em eletrodos revestidos dos tipos E6010 (Celulósico), E6013 (Rutílico) e E7018 (Básico de baixo hidrogênio), todos com diâmetro nominal de 2,5 mm.

Tabela 1 Composição química peso em porcentagem.

C	Mn	Si	P	S	Cu
0,2	0,87	0,22	0,04	0,03	0,06

Fonte: Dias (2024).

Durante a execução do experimento, variou-se sistematicamente a polaridade da corrente aplicada a cada tipo de eletrodo, de modo a observar o comportamento da penetração e possíveis alterações no perfil geométrico do cordão. Os parâmetros de soldagem utilizados incluindo corrente de

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

soldagem, tensão média, tipo de polaridade e velocidade de soldagem encontram-se consolidados na Tabela 2 e cada condição a ser estudada foi identificada conforme Tabela 3.

Tabela 2 Parâmetros de soldagem.

Corrente Polaridade Inversa (CC-)			
Parâmetros de Soldagem	E6010	E6013	E7018
Velocidade de solda [mm/s]	3,1	2,63	2,55
Amperagem [A]	100	100	110
Voltagem [V]	16	16	20
Corrente Polaridade Inversa (CC+)			
Parâmetros de Soldagem	E6010	E6013	E7018
Velocidade de solda [mm/s]	3,0	2,78	2,50
Amperagem [A]	100	100	110
Voltagem [V]	16	16	20
Corrente alternada (CA)			
Parâmetros de Soldagem	E6010	E6013	E7018
Velocidade de solda [mm/s]	3,03	2,51	2,68
Amperagem [A]	110	110	120
Voltagem [V]	18	18	22
Velocidade de solda [mm/s]	2,47	2,45	2,46
Taxa de deposição [kg/h]	0,814	0,781	0,796

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 1 Identificação das amostras estudadas.

Condições	Revestimento do Eletrodo		
Tipo de Corrente	E6013	E6010	E7018
Polaridade Inversa (CC+)	1A	2A	3A
Polaridade Direta (CC-)	1B	2B	3B
Alternada (CA)	1C	2C	3C

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após a conclusão dos processos de soldagem e subsequente resfriamento natural até a temperatura ambiente, as chapas foram direcionadas ao laboratório de metalografia para preparação das amostras. Utilizou-se uma cortadora metalográfica do tipo disco abrasivo, marca Teclago, modelo CM80, para a realização de um corte longitudinal, que fracionou a chapa ao meio. Posteriormente, foi realizado um segundo corte transversal, no qual foram seccionados segmentos de 15 mm, correspondentes às regiões de interesse para análise metalográfica. As amostras obtidas foram devidamente identificadas e classificadas conforme os parâmetros experimentais estabelecidos, detalhados na Tabela 3 e representados graficamente na Figura 1, para posterior caracterização microestrutural e análise quantitativa.

Figura 1 corte da chapa soldada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na etapa subsequente, procedeu-se ao preparo das superfícies das amostras por meio de lixamento mecânico, utilizando lixadeira da marca Arotec, modelo Duopol. A sequência abrasiva adotada seguiu ordem crescente de refinamento, com lixas de granulação 180, 220, 400 e 600 mesh,

visando à remoção de deformações superficiais e obtenção de acabamento adequado para o posterior ataque químico.

Concluído o lixamento, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de química, onde se realizou o ataque químico sob exaustão controlada, utilizando capela da marca *Permutation*. O reagente utilizado foi Nital a 15%. A aplicação do reagente foi realizada pela técnica de esfregamento manual, com o intuito de evidenciar os contornos microestruturais da zona fundida. Imediatamente após a revelação, as amostras foram submersas em água corrente para cessar da reação ácida, e posteriormente secas com auxílio de um secador de ar quente da marca, modelo RS-3.

As amostras preparadas foram então conduzidas à sala de microscopia para análise macrográfica. A captura das imagens foi realizada com o auxílio de um estereoscópio da marca Olympus, modelo SZ2-ET. As imagens obtidas foram digitalizadas e processadas utilizando o software ImageJ, por meio do qual foram efetuadas medições das dimensões geométricas da zona soldada, tais como profundidade de penetração, altura de reforço e largura do cordão de solda, com precisão adequada à caracterização morfológica do processo.

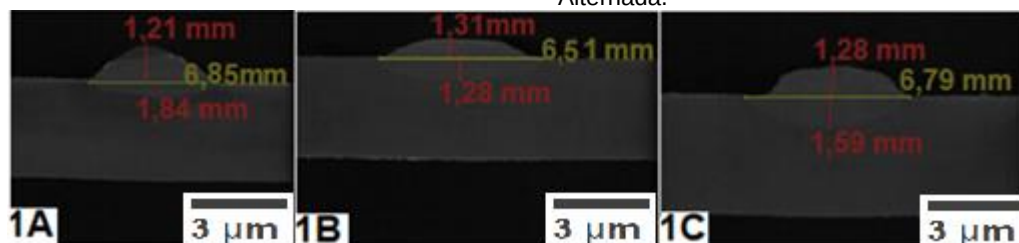
Resultados e Discussão

Na análise da Figura 2, observa-se que a solda realizada com eletrodo revestido E6013 sob corrente contínua polaridade direta (CC+) (condição 1A) apresentou o maior valor de penetração, com 1,84 mm. Este valor corresponde a um incremento aproximado de 14% em relação à solda realizada sob corrente alternada (CA) (condição 1C), que apresentou penetração de 1,59 mm, e cerca de 30% superior à penetração obtida na solda com corrente contínua polaridade inversa (CC-) (condição 1B), que apresentou penetração de 1,28 mm.

Quanto à altura do cordão de solda, a condição CC- (1B) apresentou uma média de 1,31 mm, valor aproximadamente 2% superior ao observado na condição CA (1C), que foi de 1,28 mm, e cerca de 8% superior ao valor obtido na condição CC+ (1A), que apresentou altura de 1,21 mm.

No que se refere à largura do cordão, a condição CC+ (1A) apresentou largura de 6,85 mm, sendo aproximadamente 1% maior do que a largura da condição CA (1C), que foi de 6,79 mm, e cerca de 5% superior à largura da condição CC- (1B), que apresentou 6,51 mm. Esses resultados são consistentes com apresentados por Camargos (2019) em trabalho similar.

Figura 2 Medidas da Solda eletrodo E6013: 1A) Polaridade Inversa 1B) Polaridade Direta 1C) Corrente Alternada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor

A partir da análise da Figura 3, observa-se que o cordão de solda produzido com eletrodo revestido E6010, sob regime de corrente contínua com polaridade direta (CC+) condição 2A, apresentou a maior profundidade de penetração, atingindo 2,82 mm. Este valor representa um incremento de aproximadamente 8,9% em relação à penetração obtida sob corrente alternada (CA) condição 2C, que foi de 2,59 mm, e um aumento de cerca de 17% quando comparado ao valor medido na condição com corrente contínua de polaridade inversa CC- condição 2B, que registrou penetração de 2,41 mm.

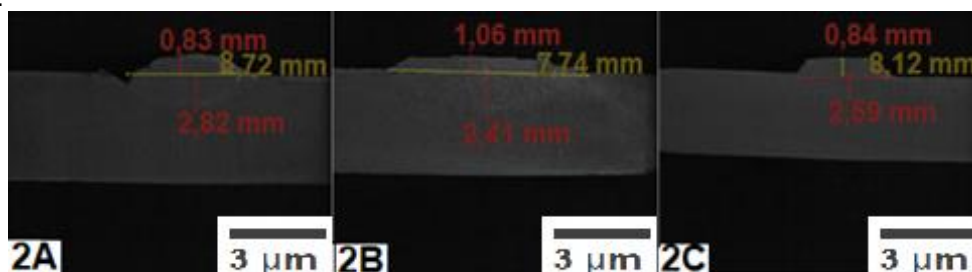
No que se refere à altura do reforço do cordão de solda, a maior elevação foi observada na condição CC- (2B), com 1,06 mm, representando um aumento de 26,2% em comparação à condição CA (2C), cujo valor foi de 0,84 mm, e um acréscimo de aproximadamente 27,7% em relação à condição CC+ (2A), que apresentou altura de 0,83 mm.

Quanto à largura do cordão de solda, a condição CC+ (2A) também apresentou o maior valor, com 8,74 mm, sendo cerca de 7,6% superior ao valor obtido na condição CA (2C), que foi de 8,12 mm,

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

e aproximadamente 12,9% superior à largura registrada na condição CC (2B), de 7,74 mm como visto em trabalho similar de Carraro (2017).

Figura 3 Medidas da Solda eletrodo E6010: 2A) Polaridade Inversa 2B) Polaridade Direta 2C) Corrente Alternada.

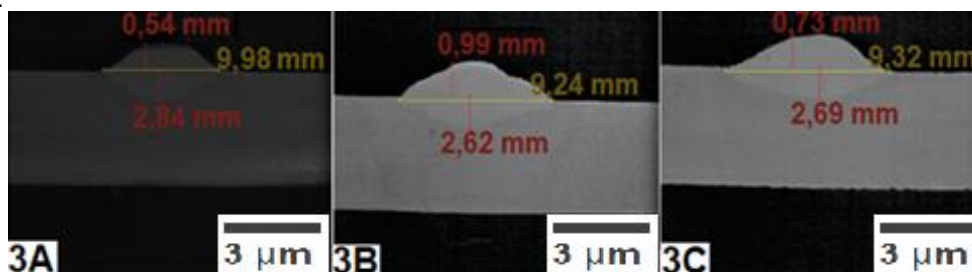


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme apresentado na Figura 4, o cordão de solda executado com eletrodo revestido E7018 sob corrente contínua com polaridade direta (CC+) condição 3A, obteve a maior profundidade de penetração, com valor médio de 2,84 mm. Esse resultado representa um incremento de aproximadamente 5,6% em relação à penetração obtida sob corrente alternada (CA) condição 3C, de 2,69 mm, e cerca de 8,4% superior ao valor observado na solda realizada com corrente contínua de polaridade inversa (CC-) condição 3B, cuja penetração foi de 2,62 mm.

Em relação à altura do reforço do cordão de solda, a condição CC- (3B) apresentou o maior valor, com 0,99 mm, o que representa um aumento de aproximadamente 35,6% em relação à condição CA (3C), que teve altura de 0,73 mm, e cerca de 83,3% superior ao valor observado na condição CC+ (3A), que apresentou uma altura de 0,54 mm. No que diz respeito à largura do cordão, a condição CC+ (3A) apresentou a maior medida, com 9,98 mm, correspondendo a um aumento de aproximadamente 7,1% em relação à condição CA (3C), que apresentou 9,32 mm, e de 8,0% quando comparado à condição CC- (3B), cuja largura foi de 9,24 mm. Tais resultados corroboram os dados obtidos por Martins (2022) em estudo de natureza semelhante, reforçando a influência significativa da polaridade da corrente elétrica sobre as características geométricas do cordão de solda.

Figura 4 Medidas da Solda eletrodo E7018: 3A) Polaridade Inversa 3B) Polaridade Direta 3C) Corrente Alternada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A análise comparativa das Figuras 2 a 4 evidencia que o eletrodo revestido de composição Básica E7018 apresentou as características geométricas mais expressivas, destacando-se pela maior profundidade de penetração, menor altura do cordão e maior largura do cordão de solda. O eletrodo com revestimento Celulósico E6010 apresentou valores intermediários em relação à penetração, altura e largura do cordão. Por sua vez, o eletrodo de revestimento Rutílico demonstrou a menor penetração, os maiores valores de altura do cordão e a menor largura entre os três tipos analisados.

Considerando a influência da polaridade da corrente, verificou-se que, em todos os revestimentos, a corrente contínua com polaridade direta (CC+) proporcionou os maiores valores de penetração e largura, associadas a uma menor altura do cordão. A soldagem em corrente alternada (CA) apresentou valores intermediários para todos os parâmetros geométricos avaliados. Já a corrente

continua com polaridade inversa (CC-) resultou nos menores valores de penetração e largura, concomitantemente aos maiores valores de altura do cordão.

Esses resultados corroboram os achados reportados nos estudos de Martins (2022), Carraro (2017) e Camargos (2019), reforçando a influência conjunta do tipo de revestimento e da polaridade da corrente elétrica sobre as características dimensionais do cordão de solda.

Conclusão

Conclui-se que evidenciou, de forma clara, a influência significativa do tipo de revestimento do eletrodo e da polaridade da corrente elétrica sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda.

Dentre os consumíveis avaliados, o eletrodo E7018, de revestimento básico, apresentou o melhor desempenho global, com os maiores valores de penetração, as menores alturas de reforço e as maiores larguras de cordão. Tais características indicam uma transferência térmica mais eficiente e maior estabilidade do arco elétrico, fatores determinantes para a qualidade da solda.

O eletrodo E6010, com revestimento celulósico, apresentou comportamento intermediário nos três parâmetros analisados (penetração, altura e largura), enquanto o E6013, de revestimento Rutilico, apresentou os piores resultados em termos de penetração e largura, e as maiores alturas de reforço, o que indica menor eficiência de fusão e menor energia entregue ao metal de base.

No que se refere à polaridade da corrente, verificou-se que a corrente contínua com polaridade indireta (CC+) proporcionou os melhores resultados em todos os eletrodos testados, promovendo maior penetração e largura do cordão, com menor altura de reforço. A corrente alternada (CA) apresentou desempenho intermediário, enquanto a corrente contínua com polaridade Direta (CC-) resultou em soldas com menor penetração e largura e maiores alturas de cordão, denotando menor concentração de calor no metal de base.

Referências

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. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

CAMARGOS, T.M. **Avaliação da Influência da Polaridade da Corrente de Soldagem na Taxa de Fusão dos Eletrodos Revestidos** 2019. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

CARRARO, G. **Avaliação da Eficiência Térmica do Processo de Soldagem por Eletrodos Revestidos** 2017. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

DIAS, G. **Certificado de Qualidade Revendedor de Aço**. Certificado de qualidade numero 725859 emitido no dia 02/02/2024. Santo Amaro. São Paulo. 2024.

MARTINS, K. G. **Efeito do Tipo de Corrente Elétrica e da Polaridade Sobre os Parâmetros Geométricos e Metalúrgicos de Cordões de Solda Obtidos com O Processo Smaw em Aço Baixo Carbono**. P42. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto 2022.

MODENESI, P.J; MARQUES, P.V; SANTOS, D.B. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wpcontent/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>. Acesso em: 28/ maio/ 2025.

MARQUES, P., MODENESI, P., & BRACARENSE, A. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2011. 362p.