



DESENVOLVIMENTO DE UM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO COM NÍQUEL PARA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA

Eduardo J. S. Lobo^{1*}, Ariel R. Arias¹, Andrés M. M. Uribe¹, Orlando M. C. Gonzalez¹ e
João V. W. Almeida¹

ejsanchezl@ufmg.br, arielra@demec.ufmg.br, andresmauriciomu@ufmg.br, mauriciocg@ufmg.br,
joaovitorwaka@gmail.com.

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de
Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627- Pampulha, Belo Horizonte, 31270-901, Minas Gerais,
Brasil.

ejsanchezl@ufmg.br

RESUMO

O trincamento induzido pelo hidrogênio é um dos principais problemas na soldagem molhada, pois as grandes quantidades de hidrogênio dissociados da molécula de água pela ação do arco elétrico, se difundem na ZTA, e deste modo, somado ao resfriamento rápido, aumentam a susceptibilidade do aparecimento de trincas e conseqüentemente, um detrimento das propriedades mecânicas da junta soldada. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta a metodologia relacionada à avaliação do comportamento operacional de um arame tubular autoprotetido fabricado em laboratório com teores de níquel entre 35 e 45%, já que o uso deste elemento promove a estabilização de austenita em temperatura ambiente, a qual diminui a susceptibilidade de trincamento a frio, por causa da alta solubilidade do hidrogênio nesta fase. Para isto, foram executadas deposições na posição plana, nas duas polaridades da corrente e na profundidade simulada de 300 mm; coletando sincronamente os sinais de tensão e corrente para gerar posteriormente, ciclogramas de potência. Posteriormente, foram estabelecidos gráficos de intervalos para ao heat input, penetração máxima e diluição do cordão de solda comparando as medias ajustadas dos valores obtidos em soldas com eletrodo positivo e negativo. Em conclusão, foi possível determinar nuvens com maior dispersão nas regiões de extinção de arco e curto-circuito na soldagem molhada. Além disso, uma maior penetração e diluição foram obtidas na polaridade DCEP por causa de um maior heat input.

Palavras-chave: Soldagem molhada, Arame tubular autoprotetido, Níquel, heat input, diluição

INTRODUÇÃO

Na soldagem molhada, o contato direto com a água aumenta a taxa de resfriamento da junta provocando microestrutura com alta dureza, somado às grandes quantidades de hidrogênio absorvidas na poça de fusão, e tensões residuais derivadas do processo de soldagem e a interação com o ambiente aumentam a probabilidade do trincamento à frio¹. Em relação a este fenômeno, distintos investigadores têm proposto soluções relacionadas aos consumíveis utilizados: no processo SMAW, a adição de hematita² tem se mostrado atrativo por causa da decomposição desta molécula em FeO, formando uma monocamada na interface escória/metal enquanto a pressão parcial do hidrogênio no arco é reduzida devido à diluição do oxigênio,

reduzindo o teor de hidrogênio no metal de solda depositado³. Por outro lado, eletrodos revestidos austeníticos⁴ diminuíram a quantidade de hidrogênio difusível se comparando com o teor medido para o metal de solda altamente ferrítico. Tomkóv⁵ encontrou esta mesma tendência mudando apenas a composição química da película que impermeabiliza o revestimento, por parafina.

Já no processo FCAW, o qual tem sido apresentado como uma alternativa promissória⁽⁶⁻⁷⁻⁸⁾ por causa da viabilidade da automatização, estudos executados no Instituto tecnológico do Harbin priorizam o uso de fitas de níquel, pois este elemento fornece uma matriz austenítica, sendo que a solubilidade do hidrogênio é significativamente maior nesta fase que na ferrítica. Ao mesmo tempo, a taxa de difusão do hidrogênio na austenita é significativamente reduzida em comparação com a ferrita. Assim, após o processo de soldagem, o metal de solda austenítico pode reter mais hidrogênio e, portanto, à temperatura ambiente sua difusibilidade é fortemente inibida e a difusão da rede austenítica para as áreas martensíticas da ZTA é muito improvável. Consequentemente, o risco de trincas induzidas por hidrogênio pode ser reduzido. Além disso, estudos indicam que o uso de este elemento aumenta as propriedades mecânicas relacionadas à ductilidade⁹ e tenacidade¹⁰.

Nesse sentido, o presente trabalho exploratório apresenta a metodologia relacionada à avaliação operacional de um arame tubular autoprotetido fabricado para soldagem subaquática molhada, contendo níquel no fluxo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi produzido o eletrodo-aramé de 1,6 mm de diâmetro, com uma máquina experimental e um procedimento similar ao explicado na literatura⁽¹¹⁻¹²⁾, contendo óxidos orgânicos e com um determinado teor de Níquel (Tabela 1) em um fluxo formulado em laboratório. Assim, o consumível foi desenvolvido a partir da conformação de uma fita de aço carbono SAE 1006 de 0,3 mm de espessura e 10 mm de largura. Foram depositados 3 cordões de solda, para cada condição de operação, na posição plana sobre um aço estrutural de 19 mm de espessura, dentro de um aquário utilizado para simular 300 mm de coluna de água (profundidade conhecida como Lâmina de água), nas polaridades DCEN e DCEP, além de ser executados ensaios em condições atmosféricas (soldas ao ar) com o intuito de avaliar o efeito da água no processo. O deslocamento do metal de base foi realizado com o auxílio de um dispositivo de deslocamento linear a uma velocidade constante de 250 mm/min para todos os ensaios (Figura 1). A tensão do arco, stick-out e velocidade de alimentação do arame também foram mantidos constantes, sendo 28 V, 30 mm e 4,5 m/min, respectivamente. A fonte utilizada foi uma multiprocesso eletrônica modelo AristoMig5001i Multivoltagem (fabricante ESAB), o sistema de alimentação empregado foi o AristoFeed 30-4W M0 do mesmo fabricante, com um controlador de aceleração e desaceleração do arame. Sincronamente, foram armazenados os dados de tensão do arco e corrente por um sistema de aquisição SAP V4¹³ a uma taxa de coleta de 5000 pontos por segundo. É importante destacar que os parâmetros de soldagem resultaram de testes exploratórios previamente executados pelos pesquisadores do LRSS na área de soldagem molhada com arames tubulares¹⁴.

Tabela 1: Composição química do fluxo

Elemento	Ni	Cr	TiO ₂	Outros óxidos orgânicos e elementos de liga
Teor (%)*	35-45	15-25	10-20	Balance

*Porcentagem em peso

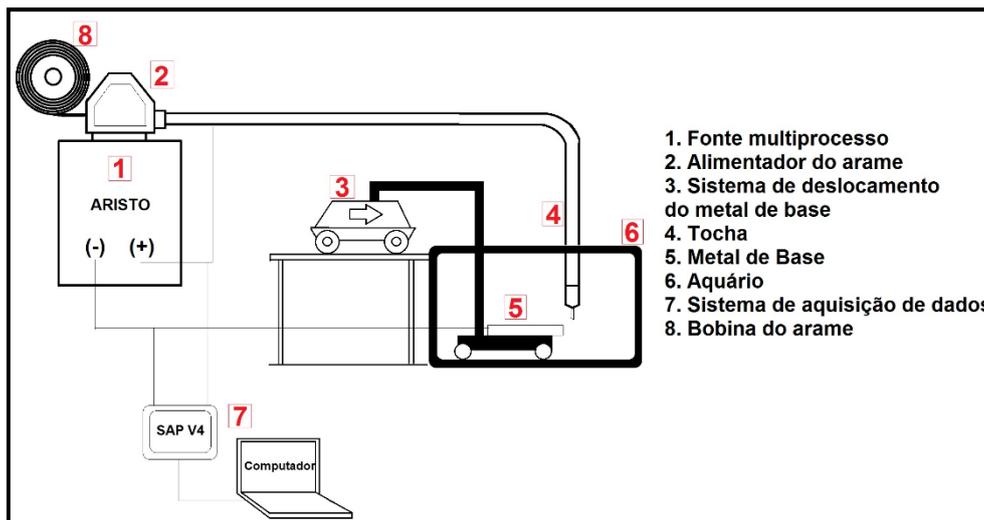


Figura 1: Esquema de soldagem utilizado nos testes

Após os testes, foi utilizado um software especializado que permitiu a análise dos dados de tensão do arco e corrente, e a geração de ciclogramas de potência que auxiliaram no estudo do comportamento elétrico do arco nos dois ambientes de trabalho (Lâmina de água e soldagem atmosférica). Esses dados foram analisados entre o terceiro e o decimo-primeiro segundo do processo de soldagem, sendo chamado de início do regímen quase-estável do processo a fim de não contabilizar os pontos registrados na abertura e encerramento do arco, onde existam perturbações derivadas da alimentação do arame, inercia do deslocamento do metal de base, etc. Posteriormente, foram gerados gráficos de intervalos para o heat input, penetração máxima e diluição do cordão de solda comparando as medias ajustadas dos valores obtidos em DCEP e DCEN.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode ser evidenciado nos ciclogramas da Figura 2 a caracterização das três regiões de interesse do estudo: *RE= Região de extinção do arco*⁷ (Valores da tensão do arco acima de 50 V), *RA= Região de Arco Aberto*⁷ e *RC= Região de curto-circuito*⁷ (Valores da tensão do arco menores a 14 V). As variações da tensão foram relativamente menores em comparação com às registradas na corrente de soldagem, o que já é esperado devido a característica estática da fonte usada neste estudo (tensão constante). Messler¹⁵ explica que estes tipos de fontes são ideais para processos de eletrodos alimentados continuamente (FCAW, GMAW, SAW), porque é causada uma grande mudança na corrente uma vez que a taxa de fusão varia rapidamente em resposta a manter esse comprimento de arco constante. Além disso, é possível evidenciar o efeito da água no processo: é notória a grande dispersão das nuvens de pontos em lâmina de água profundidade se comparado o comportamento elétrico na soldagem atmosférica, mostrando maiores áreas de nuvens nas regiões RE e RC.

Contudo, a polaridade também é um fator determinante na geração de calor no metal de solda: nos dois ambientes, é possível ver o aumento da penetração, e em consequência, da diluição na configuração DCEP, tal como é mostrado na Figura 3. OM e Pandey¹⁶ mediante modelos empíricos desenvolveram uma técnica estatística que permitiu determinar menores diluições em DCEN para o processo SAW, devido a que foi obtida uma menor força do arco como resultado de uma menor heat input nesta polaridade. Além disso, Rontescu et. al¹⁷ explicam que

em DCEP aproximadamente o 70% do calor gerado pelo arco concentra-se no metal de base, provocando uma penetração mais profunda¹⁸.

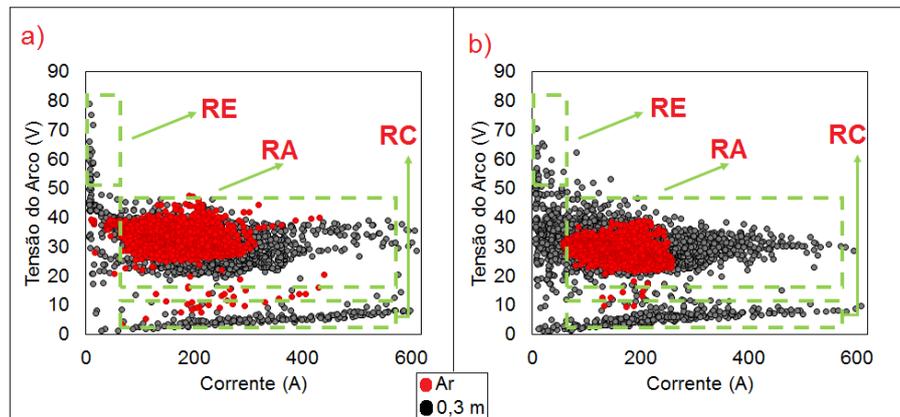


Figura 2: Ciclogramas de potência ao ar e lâmina de água de profundidade (a) DCEP (b) DCEN.

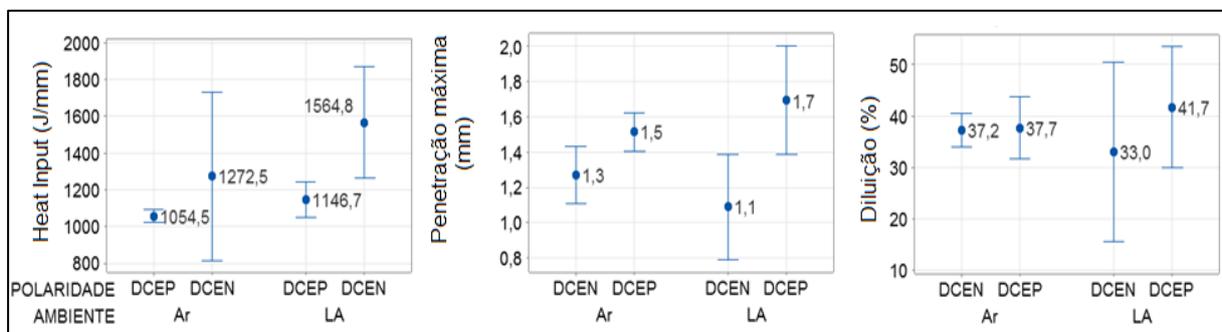


Figura 3: Gráficos de intervalos para heat input, penetração máxima, e diluição nas duas polaridades e ambientes de operação

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi mostrada a avaliação exploratória em relação ao comportamento elétrico de um arame tubular autoprotetido fabricado em laboratório, contendo entre 35 e 45 % de Níquel no fluxo. Foi possível demonstrar o efeito do ambiente no desempenho operacional, sendo notória a grande dispersão das nuvens de pontos em lâmina de água se comparando com a soldagem ao ar, além de mostrar maiores áreas de nuvens nas regiões de extinção do arco e curto-circuito. Também, foram obtidos maiores valores médios de diluição e penetração máxima na configuração DCEP nos dois ambientes de operação, devido a maiores correntes médias resultando no aumento do heat input e, ao calor do arco estar mais concentrado no metal de base.

AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores envolvidos neste projeto agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq; pelo financiamento e infraestrutura fornecidos.

REFERÊNCIAS

1. DIAZ, W. Efeito da profundidade de soldagem sobre o hidrogênio difusível das soldas molhadas. 2012, 123 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica – UFMG, Minas Gerais).
2. MORENO, A. M.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; SANTOS, V. R. Influência da Polaridade Sobre a Estabilidade do Processo de Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Revestido. *Soldagem & Inspeção*, v. 22, n. 4, p. 29–41, 2017. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2204.13>.
3. LI, H.; LIU, S.; MA, Q.; WANG, P.; LIU, D.; ZHU, Q. Investigation of process stability and weld quality of underwater wet flux-cored arc welding of low-alloy high-strength steel with oxy-rutile wire. *Polish Maritime Research*, v. 28, n.3, p. 100 -109, 2021. <https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0037>.
4. KLETT J.; MATTOS, B.F.; MAIER, H.; GONÇALVES, R. H.; HASSEL, T. Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. *Materials and Corrosion*, v. 772, p. 504-516, 2020. <https://doi.org/10.1002/maco.202011963>.
5. TOMKOV, J. Weldability of Underwater Wet-Welded HSLA Steel: Effects of Electrode Hydrophobic Coatings. *Materials*, v. 14, n. 6, p. 1364, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14061364>.
6. CASTELLANOS, O. M.; MORENO, A. M.; RAMON, S. A.; JÁCOME, J. Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW. *Revista UIS Ingenierías*, v. 20, n. 3, p. 47-60, 2021. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021003>
7. CASTELLANOS, O. M.; AGUIAR, R; RODRIGUEZ, A.; MORENO, A. M.; SANCHEZ, E, J. Avaliação das características operacionais e geométricas de soldas desenvolvidas com arames tubulares experimentais em soldagem subaquática molhada. In: XI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, Teresina, 2022. doi://10.26678/ABCM.CONEM2022.CON22-0585.
8. CAMPOS E.; JÁCOME J.; MORENO A. M.; BRACARENSE A. Q. Influence of the formulation of a flux-cored wire on the microstructure and hardness of welded metal. *J Phys Conf Ser*, 2118, 2021. doi:10.1088/1742-6596/2118/1/012010
9. LI, H. L.; LIU, D.; YAN, Y. T.; GUO, N.; FENG, J. C. Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Underwater Wet Flux-Cored Wire Welded 316L Stainless Steel joints. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 1, n. 238, p. 423-430, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.001>.
10. PEREZ, F.; LIU, S.; SMITH, C.; RODRIGUEZ, E. Effect of nickel on toughness of underwater wet welds. In: ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, Cancún, 2003. Disponível em: <http://s3.iran-mavad.com/matshop/pdf/effect-of-nickel-on-toughness-of-underwater-wet-welds.pdf>.
11. FAGUNDES J. G. ; MORENO, A. M. ; RIBEIRO P. H.; ARIAS A. R.; BRACARENSE A. Q. Formation of TiC by the application of Ti6Al4V machining chips as flux compounds of tubular wires. *J Phys Conf Ser*, v. 1126, n. 1, p. 1–7, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1126/1/012027>.
12. CASTELLANOS, O. M.; PRADA, G. C.; JÁCOME, J.; MORENO, A. M.; RODRÍGUEZ, A. Manufactura De Alambre Tubular Autoprottegido Y Evaluación De Condiciones Operacionales En Soldadura Submarina. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, v. 9, n. 1, p. 167-179, 2021. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4015>.
13. MORENO, A. M.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P. The Effect of Polarity and Hydrostatic Pressure on Operational Characteristics of Rutile Electrode in Underwater Welding. *Materials*, v. 13, p.17, 2020. doi: 10.3390/ma13215001
14. CAMPOS, E.; MORENO, A. M; BRACARENSE, A. Q. Effects of PTFE on operational characteristics and diffusible H and O contents of weld metal in underwater wet welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 61, p. 270-279, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.018>.
15. MESSLER, R. W. Principles of Welding. New York: John Wiley & Sons Limited, 2019.
16. OM H.; PANDEY, S. Effect of heat input on dilution and heat affected zone in submerged arc welding process. *Sadhana*, v. 38, n. 6, p. 1369-1391, 2013.
17. RONTESCU, C.; DUMITRU, T; IACOBESCU, G; AMZA, C. The Influence of the Welding Current Polarity on the Geometric Configuration of the Bead. *Advanced Materials Research*, v. 1088, p. 797-801, 2015, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.797.
18. SOUZA, D.; ALVES, A.; SCOTTI, A. A Qualitative Model to Explain the Polarity Influence on the Fusion Rate in the MIG/MAG Process. *Welding International*, v. 24, n. 12, 2010.

DEVELOPMENT OF A NICKEL FLUX-CORED WIRE FOR UNDERWATER WET WELDING

ABSTRACT

Hydrogen Induced Cracking is one of the main problems in wet welding, because the large amounts of hydrogen dissociated from the water molecule by the action of the electric arc, diffuse into the HAZ, and thus, added to rapid cooling, increase the susceptibility of the appearance of cracks and consequently, a detriment of the mechanical properties of the welded joint. In this sense, the present work presents the methodology related to the evaluation of the operational behavior of a self-shielded flux-cored wire manufactured in the laboratory with nickel contents between 35 and 45%, since the use of this element promotes the stabilization of austenite at room temperature, which decreases the susceptibility to cold cracking, due to the high solubility of hydrogen in this phase. For this, deposition was performed in the flat position, in both current polarities and a simulated depth of 300 mm; recording simultaneously the voltage and current signals to subsequently generate power cyclograms. Subsequently, main effects for the heat input were plotted, as well as, maximum penetration, and dilution of the weld bead. comparing the adjusted means of the values obtained in welds with positive and negative polarity. In conclusion, it was possible to determine clouds with greater dispersion in the arc extinction and short circuit regions in wet welding. In addition, greater penetration and dilution were obtained in DCEP polarity because of a greater heat input.

Keywords: *Underwater wet welding, self-shielded flux cored wire, nickel, heat input, dilution.*