

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO MICRO-TIG PARA COSTURA EM ARAME TUBULAR FABRICADO POR CONFORMAÇÃO

Carolina Martins Abreu, abreu.carolinabr@gmail.com¹
Alexandre Queiroz Bracarense, queiroz@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – R. e, Belo Horizonte (MG)

Resumo: O processo de Soldagem com Arame Tubular tem sido muito utilizado na indústria pela sua alta taxa de deposição, à versatilidade de ligas soldáveis e ao seu fluxo interno. Contudo, o arame tubular pode apresentar altos níveis de hidrogênio, falhas de enchimento, regiões de corrosão e afinamento de sua seção transversal devido ao método de fabricação e armazenagem. Esses problemas afetam a qualidade final do cordão de solda e sua confiabilidade. O objetivo deste desenvolvimento é estudar a viabilidade de implementação do processo MICRO-TIG para costura no arame tubular produzido por conformação (Seam Flux Cored Wires). Ou seja, otimizar a produção do mesmo para minimizar os efeitos citados. Utilizando a bancada disponível no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) foram produzidos Seam Flux Cored Wires, por conformação de fita metálica. A partir do arame produzido foram cortados corpos de prova de 300mm e feita a soldagem manual da emenda desses. Os Seamless Flux Cored Wires foram selecionados por inspeção visual e embutidos a frio. Para análise micrográfica, foi feito o lixamento das amostras e observou-se, em microscópio óptico, a seção transversal do arame. Pode-se concluir que os arames produzidos por soldagem manual apresentaram aparência similar aos arames com produção industrial por indução por alta frequência. Apesar dos resultados encontrados serem parciais, o processo MICRO-TIG é promissor para a aplicação em questão.

Palavras-chave: arame tubular, MICRO-TIG, Seamless FCW, Seam FCW.

1. INTRODUÇÃO

Na Soldagem com Arame Tubular, como nos outros processos de soldagem, as diversas variáveis existentes conferem caráter complexo e permitem a versatilidade desse método de fabricação. O equipamento utilizado, a habilidade do soldador ou a programação do robô, a velocidade de soldagem, as condições ambientais e os consumíveis são algumas das características que podem influenciar na qualidade final do cordão de solda e em sua confiabilidade.

Devido às altas taxas de deposição de metal e à versatilidade de ligas soldáveis, esse processo possui grande aplicação industrial. Seu uso é crescente, especialmente na substituição de outros processos de alto rendimento, como Arco Submerso e Eletroescória, quando o uso destes é inviável tanto por custo, quanto por questões espaciais e geométricas.

Apesar de sua aplicação industrial, o arame tubular possui algumas peculiaridades que podem comprometer o resultado final da solda, o que não é ideal. Dentre todas as variáveis de soldagem que influenciam na qualidade do cordão obtido, pode-se dizer que o eletrodo/aramé tem a maior parcela neste processo. Esse consumível pode apresentar falhas de enchimento, níveis elevados de hidrogênio, regiões de corrosão e afinamento da seção transversal em razão do seu método de fabricação e armazenagem. Assim, muitas vezes é necessário o processo de ressecagem para reduzir os níveis de hidrogênio no fluxo interno devido às suas características higroscópicas.

Em consequência ao crescente uso do Processo de Soldagem com Arame Tubular em diferentes indústrias, como na fabricação de estruturas, é interessante otimizar a fabricação de seu eletrodo, que influencia diretamente na qualidade do cordão de solda. O objetivo geral deste desenvolvimento é estudar a viabilidade de implementação do processo **MICRO-TIG** para soldagem autógena em arames tubulares produzidos por conformação de fita metálica em laboratório. Em outras palavras, produzir *Seamless Flux Cored Wires* (*Seamless FCW*). Apesar de já existirem patentes de produção de arames *Seam* e *Seamless*, o uso da **MICRO-TIG** é inédito nesse campo de aplicação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processo de Soldagem com Arame Tubular

Lincoln (2015) define o *FCAW* como um processo que utiliza alimentação contínua de eletrodo/aramé para fornecer metal de enchimento. O eletrodo não é sólido, mas sim um tubo. Em concordância, Aloraier *et al.* (2006) ressaltam que existe fluxo no interior desse tubo. A parte externa metálica conduz a eletricidade, que forma o arco elétrico. Segundo Bauné *et al.* (2000, parte 1) o fluxo é composto por uma mistura de pós metálicos e não metálicos. A adição destes componentes torna o processo versátil quanto à diversidade de ligas soldáveis.

Navedra (2014) afirma que o eletrodo do *FCAW* é similar ao eletrodo do *SMAW*, contudo o fluxo daquele é no interior de um invólucro flexível, ao invés de no exterior de um eletrodo rígido. Conforme apresentado na Fig 1, o fluxo está representado figurativamente em verde e o invólucro metálico em azul.

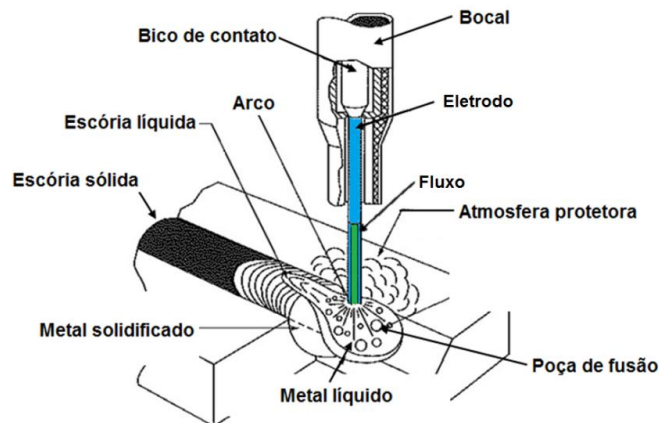


Figura 1 (adaptada). Desenho esquemático do processo *FCAW* com detalhe ao eletrodo. ESAB (2004)

Segundo Navedra (2014), o Processo de Soldagem com Arame Tubular evoluiu da soldagem *GMAW*, melhorando a estabilidade do arco elétrico, a transferência de metal, as propriedades do metal depositado e o acabamento do cordão de solda, graças à adição de fluxo. Esab (2004) complementa afirmando que o desenvolvimento do arame tubular foi em função da necessidade das empresas manterem-se competitivas, aumentando a produtividade e reduzindo custos.

2.2. Método de fabricação do arame tubular

Existem diversos processos patenteados de manufatura dos arames. Dentre eles, dois tipos de arames podem ser classificados, conforme seu método de fabricação industrial. A Figura 2 apresenta micrografias da seção transversal de eletrodos, sendo o *Seam Flux Cored Wire* (A1 e A2) e o *Seamless Flux Cored Wire* (B). É evidente a emenda do eletrodo do tipo *Seam FCW*. Sendo H5 e H10, os níveis nominais de hidrogênio de 5 e 10ml/100g respectivamente.

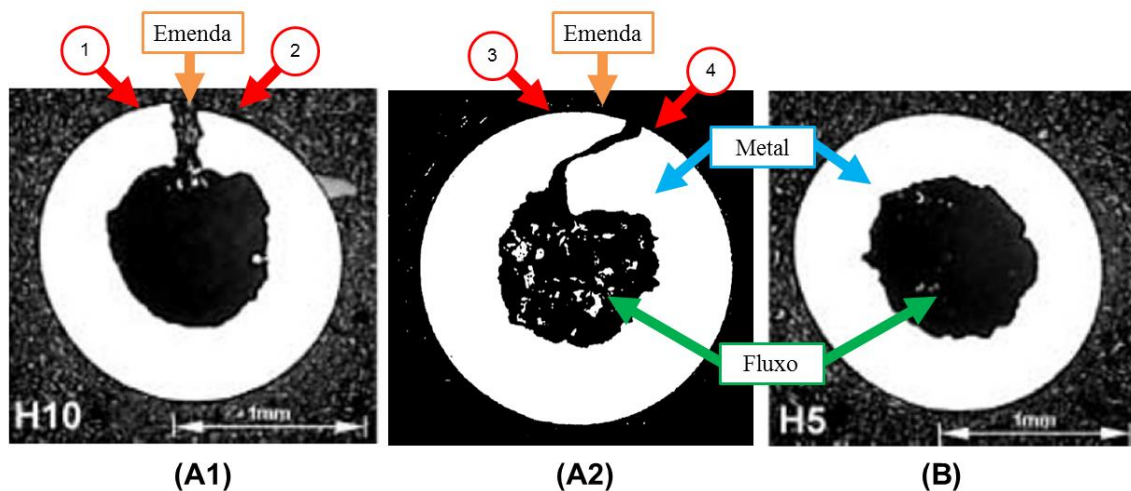


Figura 2 (adaptada). Micrografias das seções transversais dos arames: (A1 e A2) *Seam FCW*; (B) *Seamless FCW*. (A1 e B): Pitrun *et al.* (2004); (A2): Kim *et al.* (2005)

Vale ressaltar que “*seam*” refere-se à presença de emenda da fita metálica. O leitor deve ter atenção para não confundir o termo “*seam*” com “cordão de solda”, já que aquele pode ser traduzido como “costura”. Portanto, *Seam FCW* é arame com emenda e *Seamless FCW* é arame sem emenda.

Gerth *et al.* (2010) comentam a fabricação dos arames *Seam* do tipo apresentado na Fig2 (A1), na qual as extremidades (1) e (2) são paralelas, conhecido como “*butt seam*”. Gloor *et al.* (1970) ressaltam que este método de fabricação não é desejável quando o fluxo tem a tendência de ser higroscópico ou que oxide facilmente.

Gerth *et al.* (2010) comentam ainda que alterando etapas do processo, especialmente os roletes, é possível produzir arames como apresentado na Fig 2 (A2), na qual as extremidades (3) sobrepõe a (4), conhecido como “*lap seam*”. Contudo Gloor *et al.* (1970) advertem que experimentos evidenciaram que este tipo de junta não promove resistência à umidade. Além de ser extremamente difícil de produzir.

O custo de fabricação e o preço de venda dos eletrodos *Seamless* são superiores quando comparado ao *Seam FCW*. Aquele utiliza Processo de Soldagem por Alta Frequência e sua manufatura é complexa e onerosa. Como o foco deste estudo é a fabricação de eletrodos *Seam* com posterior soldagem *MICRO-TIG*, será detalhado apenas o método de fabricação de *Seam FCW*.

Este processo é apresentado na Fig 3, na qual é apresentada um foto da bancada existente no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG. Navedra (2014) descreve a fabricação deste tipo de arame em cinco etapas. Primeiramente, uma fita metálica estreita, fina e plana (A) que passa por roletes (B) que a conformam em formato de seção transversal “U”. O perfil então passa um dispositivo de enchimento (C), no qual uma quantidade específica de fluxo granular é adicionada ao mesmo. Este fluxo é armazenado em um silo. A tira em forma de “U” cheia de fluxo passa por roletes de fechamento (D). O tubo formado é puxado através de trefilas (E) para reduzir o seu diâmetro. O eletrodo pode passar por processo de secagem conforme a composição do seu fluxo.

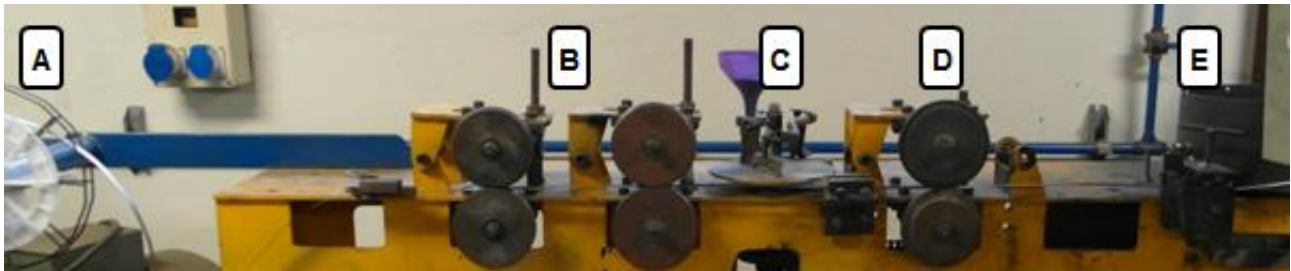


Figura 3. Processo de Fabricação de arame tubular no LRSS: (A) Fita metálica; (B) Roletes de conformação; (C) Dispositivo de enchimento; (D) Rolete de fechamento e (E) Trefila.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

Por se tratar de dimensões reduzidas e pela dinâmica do processo, é importante avaliar o comportamento do arame sob influência da *MICRO-TIG* antes de implementar esse processo de soldagem à bancada. Para isso, testes iniciais com soldagem manual permitem que seja analisada a seção transversal do arame e assim estudar a viabilidade de uso do *MICRO-TIG* com a finalidade aqui proposta.

Para realizar este desenvolvimento foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos.

- Produção de *Seam FCW*:
 - Utilização de fita metálica de 12mm de largura de aço baixo carbono;
 - Fluxo E7018;
 - Bancada de produção de arame tubular disponível no LRSS.
- Produção de *Seamless FCW*:
 - Fonte inversora Minarc Evo 180. Fabricante: Kemppi®;
 - Tocha TIG. Fabricante: TBI®;
 - Argônio puro como gás de proteção;
 - Eletrodos de tungstênio (W) de 1,6mm de diâmetro com adição de dióxido tório (ThO₂).
- Material para embutimento a frio:
 - Resina Epóxi + Endurecedor + Desmoldante;
 - Copo plástico de 50ml como molde;
 - Politriz Lixadeira Metalográfica PL02E + lixas (100; 220; 400; 600; 1200; 1500; 3000);
 - Microscópio óptico;
 - Reagente Nital 5%.

3.1. Planejamento experimental

Com o intuito de estudar a viabilidade de implementação do processo *MICRO-TIG*, para realizar costura em arame tubular, foi necessário executar algumas etapas, apresentadas na Fig 4, conforme descritas abaixo:

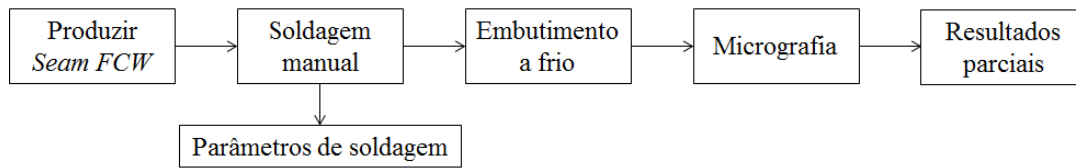


Figura 4. Representação esquemática do planejamento experimental adotado.

- 1. Produção de arames do tipo Seam FCW:** Utilizou-se fita metálica, fluxo e bancada do LRSS para produção de *Seam FCW*. A tocha *MICRO-TIG* será instalada logo após o rolete de fechamento (D), apresentado na Fig 5. Como pode ser observado, a soldagem será feita após o fechamento total do arame e antes da trefila (E). Nesta etapa, utilizou-se a trefila 3,7mm, a qual não promove redução significativa de diâmetro do arame, como pode ser evidenciado pela Eq. (1). Como a fita tem largura de 12mm, ou seja, seu perímetro (P), resulta em um diâmetro (2r) de 3,8mm, com redução de aproximadamente 3% da seção transversal. A priori não será analisada a influência da taxa de redução da seção transversal do arame na dureza do mesmo.

$$P = 2\pi r \quad (1)$$

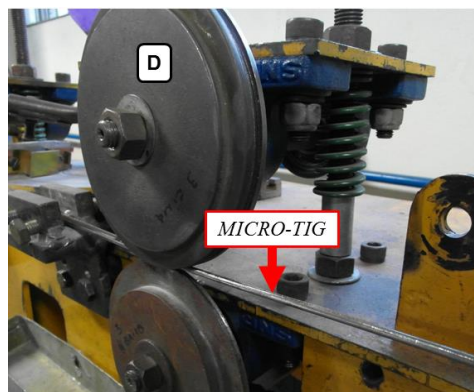


Figura 5. Localização do processo MICRO-TIG na bancada, após rolete de fechamento (D).

- 2. Preparação dos corpos de prova:** Foram cortadas seções longitudinais de aproximadamente 300mm do arame produzido em etapa anterior, com auxílio de alicate de corte. Neste ponto vale ressaltar que o arame, por ter sido enrolado em formato de bobina está curvo. Foi necessário alinhá-lo, para simular forma, conforme apresentada na Fig 5.
- 3. Soldagem Manual:** Para teste inicial, foi realizada soldagem manual para avaliar viabilidade. Tomou-se nota de parâmetros de soldagem como: afiação do eletrodo, velocidade e corrente de soldagem, bem como níveis de respingos e acabamento superficial do cordão.
- 4. Análise da micrografia:** por inspeção visual foram selecionados cordões de solda com bom acabamento superficial para fazer análise micrográfica. Comparou-se a micrografia da seção transversal do arame soldado e do não soldado.
 - a. Embutimento a frio:**
 - Preparam-se e reservaram-se os copos, de 50ml, com desmoldante;
 - Preparou-se uma mistura de 1 parte de resina Epóxi para ½ parte de endurecedor;
 - Adicionou-se corante líquido para melhor contraste com a amostra;
 - O tempo de cura da resina foi de doze horas;
 - Desmoldou-se e limpou-se a amostra com papel toalha para remoção de restos de resina.
 - Fez-se o lixamento utilizando lixas d'água com os seguintes *meshs*: 100; 220; 400; 600; 1200; 1500 e 3000;
 - Utilizou-se, para ataque químico, reagente Nital 5%;
 - As amostras foram posteriormente analisadas em microscópio ótico.
- 5. Resultados parciais:** neste ponto do estudo, espera-se obter resultados parciais da qualidade do cordão e do arame e a influência da *MICRO-TIG* sob o fluxo.

4. RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO

4.1. Produção de arames do tipo *Seam FCW*

Os *Seam FCW* foram produzidos conforme esperado. Contudo, o alinhamento da fita metálica nos roletes da bancada mostrou-se complexo. Esse alinhamento é essencial para o correto fechamento do arame, como “*butt seam*”, o que possibilita que a *MICRO-TIG* seja implementada. Foi observado, como apresentado no esquema da Fig 6, que ao passar pelo rolete de fechamento (D), o arame pode apresentar torção, fazendo com que sua emenda não seja sempre no mesmo local. Isto dificulta o uso da *MICRO-TIG*, pois sua tocha está afixada em um suporte estático. Assim, o arco elétrico age sob uma área reduzida, podendo ocasionar regiões não soldadas, como representado em (B), na qual a solda autógena pode ocorrer, mas não de forma suficiente para fechar a emenda.

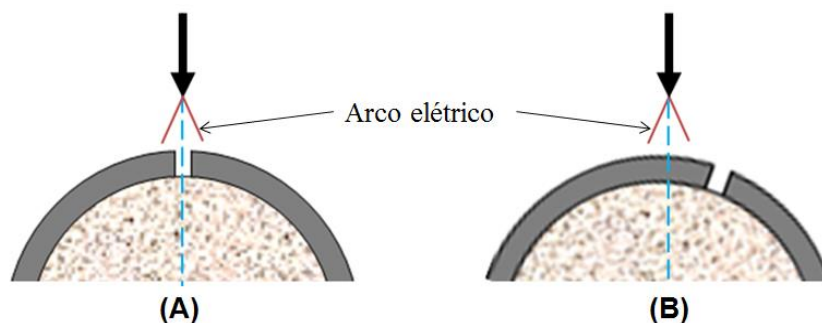


Figura 6. Simulação da *MICRO-TIG* estática em (A) arame com alinhamento correto e (B) arame com torção.

4.2. Corpos de prova e Soldagem Manual

Conforme mencionado, a região para realizar a solda é limitada e a torção do arame dificulta ainda mais a soldagem. Alinhar o arame foi um desafio enfrentado, devido a suas dimensões e à necessidade da emenda não sofrer torção. Foi possível obter uma linearidade aceitável conformando o arame com as mãos e com a ajuda de um alicate universal, sem força exagerada. Foram realizados diversos procedimentos com diferentes parâmetros de soldagem. O que geraram os melhores resultados apresentados na Tab1.

Tabela 1. Dados obtidos dos Parâmetros de Soldagem Manual após experimentação.

Variável	Dados obtidos
Afiação do eletrodo	>90°
Velocidade de soldagem	Avanço moderado
Corrente de soldagem	~11A
Níveis de respingos	Elevado quando em regiões com presença de fluxo ou grafita na emenda
Acabamento superficial	De boa qualidade quando emenda com extremidades paralelas

Apesar da afiação do eletrodo não ter sido variada, a princípio, isso não irá afetar significativamente o processo. Para abrir o arco elétrico, com a fonte utilizada, é necessário contato direto com o arame (metal de base). Isso funde a ponta do eletrodo e o contamina. Foi observada coloração esverdeada no arco elétrico, decorrente da contaminação tungstênio com aço carbono. Ainda não foi desenvolvida uma solução para esse problema.

Observou-se que os melhores acabamentos do cordão foram obtidos com velocidades de soldagem moderadas. Velocidades muito elevadas propiciavam falta de fusão quando a corrente de soldagem era de aproximadamente 11A. Sendo que velocidades muito baixas geravam furos no arame. Na bancada a velocidade de soldagem corresponde à velocidade de fabricação do arame, podendo ser alterada conforme necessidade.

Foi evidenciado que em regiões de emenda com fluxo e/ou grafita, ocorreram respingos. Isso pode ter sido gerado por excesso de fluxo depositado antes do fechamento do arame ou pelo não paralelismo das extremidades da fita conformada, podendo gerar uma região para a grafita se alojar durante o processo de trefila. Se o segundo caso for o motivo, não será um problema, pois a tocha da *MICRO-TIG* será afixada antes da trefila. Logo, antes do contato com a grafita. Se o primeiro caso for o motivo, basta regular com melhor exatidão a quantidade de fluxo depositado, para enchimento do arame.

No geral, contando que a soldagem foi feita de modo manual, os cordões apresentaram bom acabamento superficial. Pode-se notar que as regiões que obtiveram melhores soldas foram as que tinham o melhor alinhamento da fita em “*butt seam*”, sem gerar grandes espaçamentos entre as extremidades.

Os resultados obtidos nesta etapa foram satisfatórios para dar continuidade ao desenvolvimento deste estudo.

4.3. Micrografia

Por se tratar de uma região pequena e delicada para ser analisada, deu-se prioridade ao processo de embutimento a frio, pois esse não é exotérmico. Logo, não danificaria a amostra termicamente. A Fig 7 apresenta os quatro estágios para a confecção dos corpos de prova. Inicialmente o copo de 50ml foi preparado com desmoldante (A). Após a cura de doze horas, a amostra foi desenformada (B). E em (C) amostra lixada e em (D) sua vista superior.

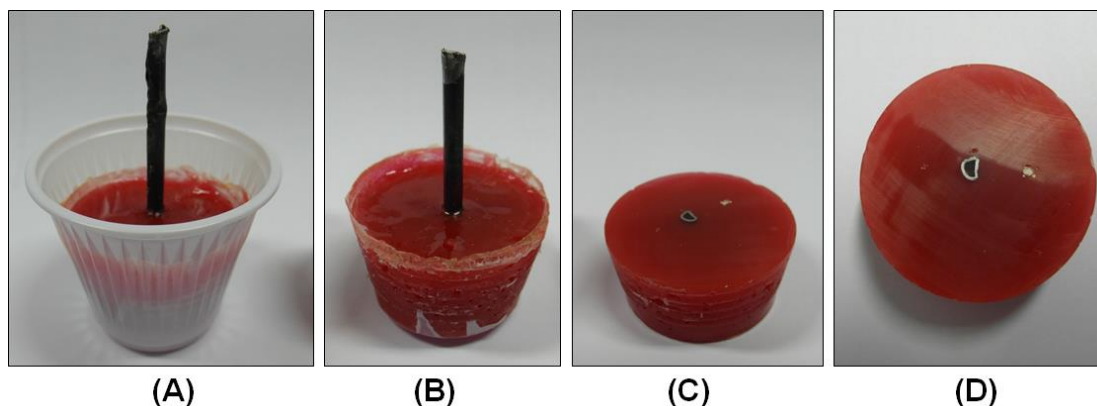


Figura 7. Etapas de embutimento a frio: (A) Copo de 50ml com desmoldante; (B) amostra desmoldada; (C) amostra lixada e (D) vista superior da amostra.

Até essa fase do desenvolvimento nota-se a importância do manuseio correto da resina epóxi para garantir uma boa qualidade na superfície da amostra, para facilitar o lixamento e por consequência a análise da micrografia. Foi evidenciado que após realizar o derramamento da resina no molde, pequenas agitações eram necessárias para retirar as bolhas de ar da mistura. É importante também seguir a dosagem de resina e endurecedor conforme recomendações do fabricante.

A Figura 8 apresenta as imagens das micrografias da seção transversal, feitas por microscópio óptico, das amostras. Em (A) *Seam FCW*, em (B) e (C) *Seamless FCW* obtidos com os parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 1. As setas indicam a região de emenda, sendo (B) e (C) com soldagem.

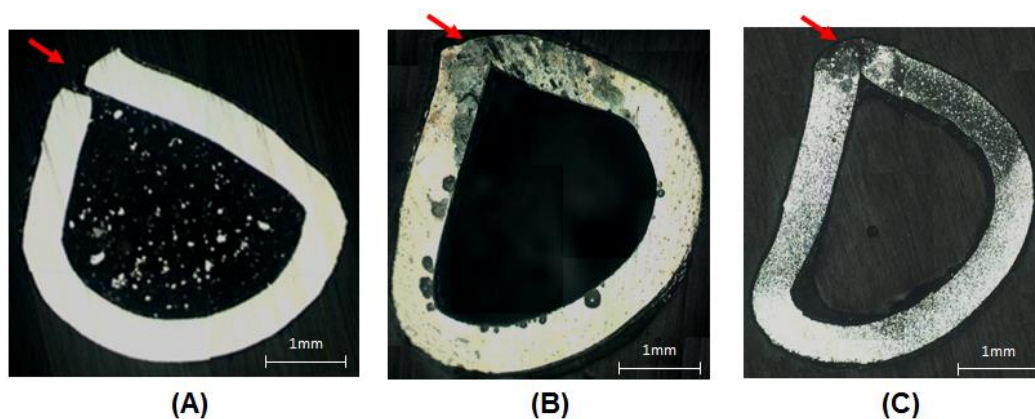


Figura 8. Micrografias das seções transversais dos arames: (A) *Seam FCW*; (B) e (C) *Seamless FCW*

Como se pode observar, as micrografias obtidas assemelham-se às apresentadas na Fig 2. Contudo, nota-se que essas não apresentam circunferência tão definida como aquelas. Isso ocorre provavelmente porque as amostras analisadas não sofreram redução significativa de seção transversal, em passes sucessivos nas trefilas. Em (A) nota-se que o *Seam FCW* não apresentou emenda “*butt seam*”, provavelmente em razão do não alinhamento do rolete de fechamento.

Apesar dos arames *Seamless* (B) e (C) apresentarem formato similar ao arame (A), indicando emenda semelhante, foi possível realizar soldagem MICRO-TIG. É possível concluir que a solda foi efetiva para fechar o arame. A região mais escura próxima da seta em (C) corresponde ao cordão de solda obtido. Acredita-se que a solda não está tão nítida nas imagens (B) e (C) devido ao uso do reagente, seja por questão de quantidade de ácido nítrico, ou por tempo de exposição ao mesmo. (Colpaert, 2008).

Outro ponto a ser mais aprofundado são as irregularidades que as amostras apresentaram na superfície da seção transversal do arame, indicando poros, ou em virtude de um lixamento ruim ou ataque inadequado.

5. CONCLUSÕES

Com as variáveis analisadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os resultados preliminares da implementação da do processo de soldagem *MICRO-TIG* para costura em arame tubular mostraram-se promissores;
- Os parâmetros de soldagem obtidos por soldagem manual foram suficientes para fechar o arame;
- Para obtenção de um cordão de solda ideal é imprescindível minimizar os níveis de torção do arame após rolete de fechamento (D).

Com base neste estudo e nos resultados parciais obtidos, pode-se continuar a pesquisar a viabilidade de implementação da *MICRO-TIG*, para isto os seguintes trabalhos futuros podem ser desenvolvidos:

- Analisar amostras com outro reagente;
- Melhorar lixamento das amostras para remover defeitos;
- Avaliar causas das irregularidades da superfície do arame obtido em micrografia;
- Análise da influência da taxa de redução da seção transversal do arame na dureza do mesmo;
- Propor solução para abertura do arco;
- Testar níveis de hidrogênio do *Seamless FCW* produzido.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Minas Gerais, em especial ao Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação pela disponibilidade de infraestrutura e conhecimento.

7. REFERÊNCIAS

- Aloraier, A., Ibrahim, R., e Thomson, P. (2006). **Artigo:** FCAW process to avoid the use of the post weld heat treatment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, páginas 394-398.
- Bauné, B. E., Bonnet, C., & Liu, S. (2000). **Artigo:** Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable — Parte 1: Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as a Basicity Indicator. *Welding Research Supplement*, páginas 57 - 65.
- Colpaert, Hubertus. **Livro:** Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 672 p. Edição revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva.
- Esab. (2004). **Apostila:** *Arames Tubulares*.
- Gerth, G. A., Soltis, P. T., & McFadden, L. S. (2010). **Patente** N° US 2010/0084388 A1. United States of America.
- Gloor, K., Baach, H., Jacubasch, H. D., Stein, R., & Erhard, H. D. (1970). **Patente** N° US 3,533,152. United States of America.
- Kim, Y. C., & Bang, H. C. (2005). **Patente** N° US 2005/0077277 A1. United States of America.
- Lincoln. (2015). **Apostila:** *Innershield Wire*.
- Navedra. (2014). **Apostila:** Flux Cored Arc Welding. páginas. 1-147.
- Pitrun, M., Nolan, D., & Dunne, D. (2004). **Artigo:** Diffusible Hydrogen Content In Rutile Flux-Cored Arc Welds As A Function Of The Welding Parameters. *Welding in the World*, páginas 2-13.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF FEASIBILITY OF IMPLEMENTATION THE MICRO-TIG PROCESS TO WELD A FLUX CORED WIRE MANUFACTURED BY METAL FORMING

Carolina Martins Abreu, abreu.carolinabr@gmail.com¹
Alexandre Queiroz Bracarense, queiroz@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação, Presidente Antônio Carlos Ave., 6627 – R. e, Belo Horizonte (MG)

Abstract. *The Flux Cored Arc Welding process has been widely used in several industries due to its high deposition rate and its versatility of weldable alloys, because of its core flux. However, the cored wire can have high levels of hydrogen, filling defects, corrosion and thinning areas of its cross section due to the manufacturing and storage method. These problems affect the final quality of the weld bead and its reliability. The aim of this development is to study the feasibility of implementing MICRO TIG process for sewing the cored wire, produced by metal forming, ie to optimize the production, to minimize the effects mentioned above. Using the available bench on Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação Seam Flux Cored Wires were produced by metal forming of a metallic strip. From the wire produced were cut 300mm pieces of wire and it were manually welded. The Seamless Flux Cored Wires were selected by visual inspection and cold embedded. For micrographic analysis, it was done sanding and observed in an optical microscope, the cross section of the wire. It can be seen that wires produced by manual welding wires had similar appearance to industrial production with a high frequency welding process. Despite the partial results, the MICRO-TIG process is promising for the application here in question.*

Keywords: *Cored wire, MICRO-TIG, Seamless FCW, Seam FCW.*