

# AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A-TIG EM UM AÇO BAIXO CARBONO COM MICROADIÇÃO DE MOLIBDÊNIO\*

Ailanderson José Magalhães Gurgel <sup>1</sup>

Vinicius Aleixo Silvestre <sup>2</sup>

Frank de Mello Liberato <sup>3</sup>

Mônica Aline Magalhães Gurgel <sup>4</sup>

Andersan dos Santos Paula <sup>5</sup>

## Resumo

A soldagem A-TIG (*Active Flux TIG Welding*) utiliza-se em seu processo fluxos simples que auxiliam no aumento da penetração do cordão de solda. Nesse trabalho realizou soldagem TIG convencional comparado com a solda A-TIG com distintos fluxos, um de Óxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ) e outro de Óxido de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) em um aço baixo carbono com microadição de molibdênio na condição de laminado a quente. Essa caracterização tem o intuito de maior entendimento do comportamento desse tipo de soldagem nessa classe de aços, através de uma avaliação da microestrutura via microscopia óptica e ensaios de dureza ao longo da espessura do cordão de solda e do metal base. Verificou-se que o processo A-TIG é satisfatório e promove maior penetração. No entanto, a corrente de soldagem e a velocidade de soldagem são parâmetros que interferem no resultado da penetração podendo promover descontinuidade, conforme o observado em um dos fluxos utilizados neste trabalho.

**Palavras-chave:** Soldagem; Fluxo ativo; TIG; A-TIG.

## EVALUATION OF THE A-TIG WELDING PROCESS IN A LOW CARBON STEEL WITH MOLYBDEN MICROADCTION

### Abstract

The A-TIG welding (*Active Flux TIG Welding*) is used in its simple process flows that assist in increasing the penetration of the weld bead. In this work, we performed conventional TIG welding compared to A-TIG welding with different flows, one of Silicon Oxide ( $\text{SiO}_2$ ) and another of Chromium Oxide ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) in a low carbon steel with microaddition of molybdenum in hot rolled condition. This characterization is intended to better understand the behavior of this type of welding in this class of steel through an evaluation of the microstructure through optical microscopy and hardness tests along the thickness of the weld bead and base metal. It has been found that the A-TIG process is satisfactory and promotes greater penetration. However, welding current and welding speed are parameters that interfere with the penetration result and can promote discontinuity, as observed in one of the flows used in this work.

**Keywords:** Welding; Active flows; TIG; A-TIG.

<sup>1</sup> Graduando em Eng. Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Congonhas, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando em Eng. Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Congonhas, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Metalurgista, D.Sc., Professor Adjunto do EBTT, Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Congonhas, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Eng<sup>a</sup> Metalurgista, M.Sc., Doutoranda em Ciência dos Materiais do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PGCM), SE-4, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Eng<sup>a</sup> Metalurgista, D.Sc., Professora Associada do PGCM e da Graduação, SE-4, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) consiste em um arco elétrico formado entre o eletrodo de tungstênio não consumível e o material a ser soldado, a proteção nesse processo é feita através de um ou da mistura de gases inertes. A aparência do cordão de solda é boa, devido ao arco elétrico ser bastante suave, tendo pouca ou nenhuma limpeza após a operação [1,2,3]. Este processo possui um excelente controle da energia transferida para a peça, além de uma proteção eficiente contra contaminação, possibilitando a soldagem de materiais de difícil soldabilidade. Entretanto, possui algumas limitações uma delas é a baixa produtividade devido a sua baixa taxa de deposição e penetração rasa nas juntas.

Com o intuito de evitar essas limitações o “*Paton Welding Institute*” na primeira metade dos anos 60 desenvolveu uma nova técnica, na qual denominaram de soldagem A-TIG (*Active Flux TIG Welding*), que consiste em depositar uma fina camada de um fluxo, geralmente, uma mistura de óxido e fluoretos sobre a superfície da peça antes da soldagem. Resultados experimentais demonstraram que a capacidade de penetração do processo A-TIG poderia ser aumentada em até três vezes em relação ao processo TIG convencional. Durante a soldagem o calor do arco funde e vaporiza a camada de fluxo, produzindo alterações na poça de fusão e no arco elétrico, levando a um aumento na penetração [4,5,6]. Em diversas aplicações da soldagem a arco, a obtenção de uma maior penetração pode representar um ganho importante de produtividade. Neste sentido uma técnica notável é a utilização de fluxos ativos no processo de soldagem TIG, onde esse fluxo ativo é uma mistura de material inorgânico suspenso em meio volátil [7,8].

Sendo assim, o fluxo ativo (óxidos e/ou halogênios) em forma de pó fino geralmente são misturados com acetona, essa mistura é passada na superfície do componente a ser soldado. A acetona evapora deixando uma camada de fluxo suficiente aderida à superfície do material, permitindo o uso da soldagem A-TIG em diversas posições [1]. Com isso, este processo possui diversas vantagens, incluindo alta produtividade [9], baixo custo [10], menor tensão residual e distorção [11], baixo teor de microinclusões [12], melhoria nas propriedades de ruptura de fluência [13] e capacidade de soldar grandes espessuras devido à maior penetração [14].

Buscando entender melhor o processo A-TIG foi realizado testes desse tipo de soldagem em um aço baixo carbono com microadição de molibdênio na condição de laminado a quente. Este aço pertence à classe dos aços avançados de alta resistência por possuir uma excelente relação de resistência e tenacidade tornando-o assim, um importante material a ser utilizado na indústria automotiva, pois permite diminuir o peso de componentes estruturais mantendo suas propriedades mecânicas. Sendo a microestrutura presente nessa classe de materiais a responsável por suas características diferenciadas quando comparadas com os aços convencionais [15].

Portanto este trabalho visa compreender o processo de soldagem A-TIG nesse tipo de material fazendo ensaios de soldagem do processo convencional TIG e do processo A-TIG. No processo A-TIG utilizou-se dois fluxos um de Óxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ) e o outro óxido de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Sendo feita uma análise da microestrutura via microscopia óptica, uma avaliação via ensaios de dureza nesse material,

verificando a dureza ao longo da solda e do metal base, e uma avaliação do poder de penetração comparado com o processo convencional TIG.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Material e Métodos

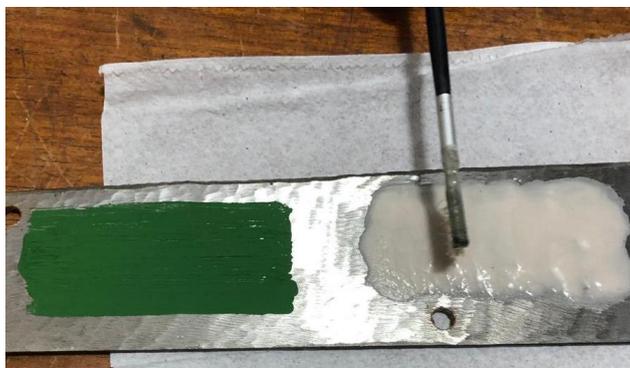
O material utilizado neste estudo para a realização da soldagem TIG e A-TIG, foi um aço baixo carbono com microadição de molibdênio na condição de chapa laminada a quente com uma espessura de 3,2 mm. A composição química dessa liga é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço em estudo.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
0,082	1,606	0,016	0,008	0,005	0,014	0,009	0,020
Mo	Sn	Al	N	Ti	Nb	V	B
0,155	0,003	0,028	0,006	0,002	0,014	0,005	0,000

A fonte de energia utilizada para as operações de soldagem foi uma fonte transistorizada multiprocessos (INVERSAL 300 da IMC). Os testes de soldagem foram realizados utilizando, uma tocha refrigerada a água com um bocal de proteção cerâmico de diâmetro interno igual a 10 mm e um eletrodo de tungstênio dopado com óxido de tório com diâmetro de 3,2 mm. A tocha foi acoplada a uma haste fixada sobre a bancada de testes, permanecendo estática durante a soldagem. A aquisição dos sinais elétricos, corrente e tensão foram coletadas pelo sistema de aquisição citado anteriormente. Para o deslocamento do corpo de prova durante a soldagem foi utilizada uma tartaruga modelo 3001 West Carson ST da BUG-O. Esse dispositivo permite controlar a velocidade e o sentido de deslocamento de soldagem dentro de uma faixa de operação de 5 a 600mm/min.

Para aplicação dos fluxos sobre o corpo de prova usou-se pincel flexível (Figura 1). O gás de proteção utilizado no teste de soldagem foi argônio com pureza de 99,99%. Os fluxos empregados nos testes de soldagem foram o óxido de Cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ) que já estavam preparados na forma de pós com granulometria inferior a 400 mesh segundo o fabricante (ESAB), o qual também forneceu certificados que indicavam pureza típica de 99,8% para o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e 99,2% para o  $\text{SiO}_2$ .



**Figura 1.** Aplicação do fluxo sobre a chapa.

Os parâmetros utilizados nos processos de soldagem foram baseados nos resultados obtidos por Liberato [16] onde o autor buscou caracterizar o efeito da soldagem A-TIG em um aço inoxidável ferrítico UNS S41003 com a variação dos parâmetros de soldagem e do tipo e quantidades de fluxos utilizados.

Tendo como base esses parâmetros fez-se as soldagens TIG e A-TIG com o objetivo de verificar o comportamento da soldagem no metal de base empregado, verificando os efeitos desses parâmetros sobre a geometria do cordão de solda e microestrutura.

Os parâmetros de soldagem utilizados para a realização deste trabalho estão indicados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem.

Eletrodo	EWTh-2
Diâmetro (mm)	3,2
Ângulo de ponta do eletrodo (°)	90
Corrente (A)	100
Velocidade (m/min.)	0,2
Gás de Proteção	Argônio Pureza 99,99%
Vazão (L/min.)	12
Comprimento do arco (mm)	2
Polaridade	CC-
Posição	Plana

*Observação: A corrente utilizada para soldar a amostra com fluxo de Óxido de Silício foi de 70A*

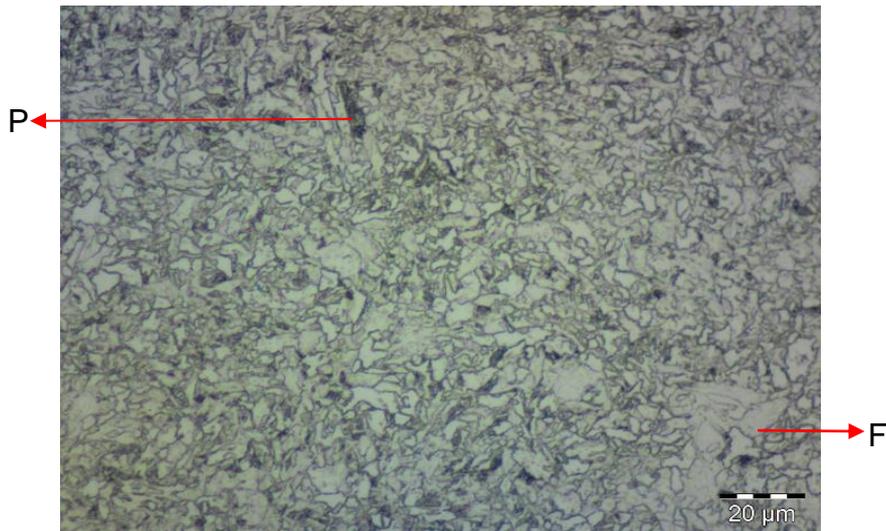
O procedimento de preparação metalográfica para determinação das características microestruturais do metal base e da zona fundida dos corpos de prova, para os distintos processos de soldagem, consistiu no corte transversal do cordão de solda em uma cortadeira Arotec cor 40, lixamento utilizando uma lixadeira rotativa e lixas com granulação de 220 a 2000mesh, seguido de polimento mecânico com pasta de diamante de 9  $\mu\text{m}$  e 3 $\mu\text{m}$  e posteriormente para revelar a microestrutura do cordão de solda procedeu-se um ataque químico por imersão com Nital 4%.

Para as análises microestruturais foi utilizado um microscópio Óptico Olympus, modelo BX41M-LED. As imagens foram obtidas através do programa LCmicro e as medições do cordão de solda das amostras foram feitas utilizando o programa IMAGEJ.

O ensaio de dureza Vickers foi realizado no metal base e na zona fundida de cada processo de soldagem utilizado com uma carga de 1 kgf, e um tempo de penetração de 20s. Este ensaio foi realizado estabelecendo um perfil de dureza a partir de medidas ao longo da espessura da zona fundida (ZF). A partir dessas medidas calcularam-se os valores médios e o desvio padrão.

## 2.2 Resultados e Discussão

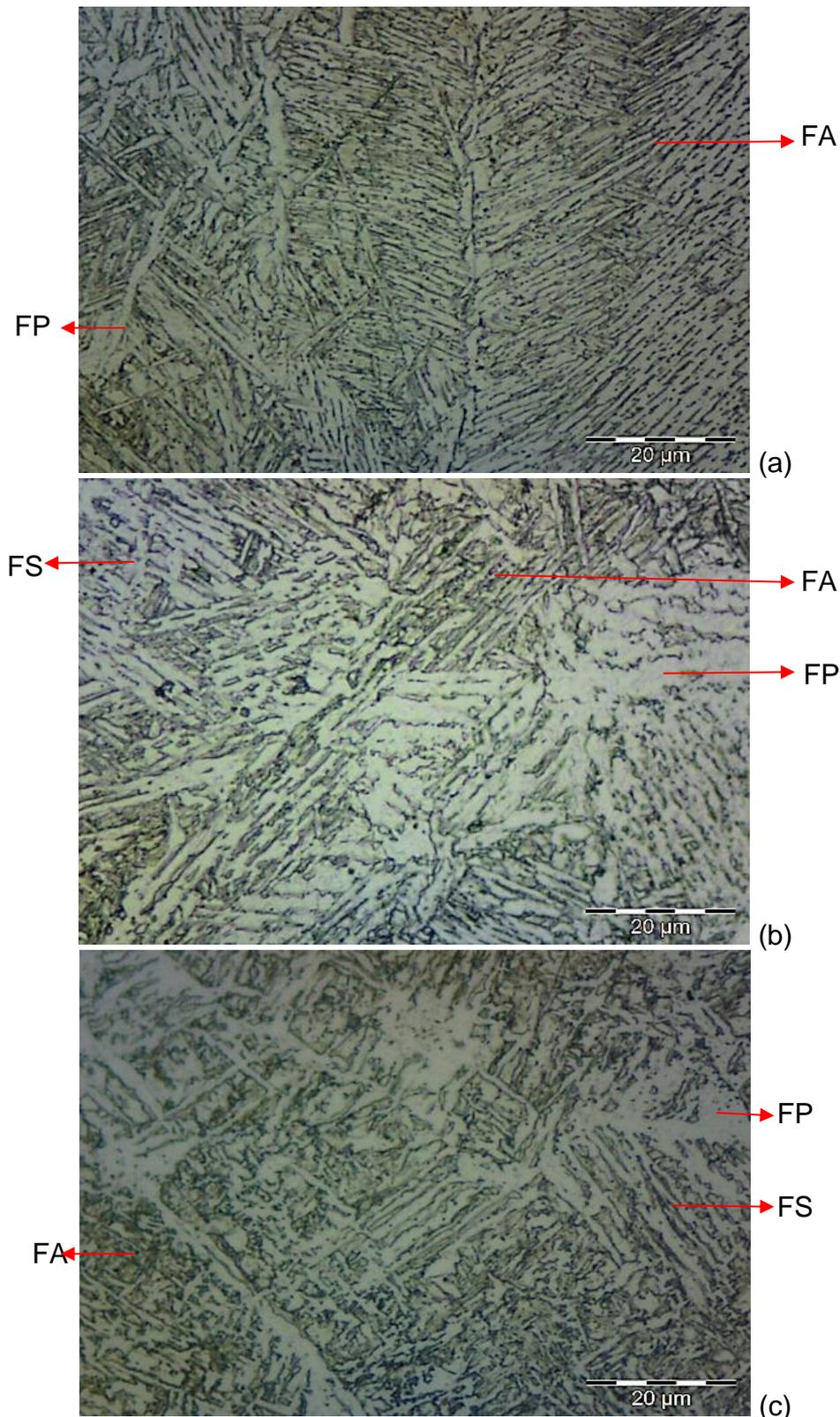
A partir da observação microestrutural do metal base, por microscopia óptica após o ataque com Nital 4% (Figura 2), verifica-se uma microestrutura refinada com a presença de uma matriz ferrítica (regiões claras), associada a grãos com aspecto tendendo a poligonal em conjugado com uma pequena fração de grãos escuros, possivelmente associado as regiões perlíticas.



**Figura 2.** Microestrutura do metal base, F = Ferrita; P = Perlita.

A avaliação da área do metal de solda é de suma importância, pois é considerada a região da junta soldada que apresenta uma grande preocupação, pois ela define a qualidade do processo de soldagem em relação às propriedades exigidas no material soldado. A análise de microscopia óptica revalidou a complexidade dessas microestruturas que podem estar presentes no cordão de solda de aços com baixo carbono, que geralmente são compostas por ferrita (F) (e suas diferentes morfologias) e perlita (P) [17].

A Figura 2 apresenta as microestruturas encontradas na zona fundida (zona central) do cordão de solda das três condições de soldagem utilizadas neste trabalho com aumento de 1000X.



**Figura 3.** Microestrutura da Zona fundida, amostra soldada pelo processo a) TIG convencional; b) A-TIG com Fluxo de Óxido de Cromo; c) A-TIG com Fluxo de Óxido de Silício, FA = Ferrita acicular; FP = Ferrita primária; FS = Ferrita com segunda fase alinhada.

A Figura 3a são apresentados os aspectos microestruturais resultantes da soldagem TIG convencional onde observa uma zona fundida com o aspecto da estrutura com predominância de ferrita acicular (FA) e algumas regiões com ferrita primária (FP). A

presença da ferrita acicular favorece à tenacidade, pois não propicia caminhos preferenciais à propagação de trincas, exigindo grande perda de energia para a propagação de uma trinca, na medida em que suas ripas de ferrita acicular obrigam a trinca a mudar de direção constantemente [18].

Nas Figuras 3b e 3c são mostradas as microestruturas da zona fundida da soldagem A-TIG, observa-se uma microestrutura com presença de uma fração menor de ferrita acicular (FA), em conjunto com uma maior presença de ferrita com segunda fase alinhada (FS), e/ou ferrita primária (FP) em comparação a solda TIG. Já ao comparar as amostras com os distintos fluxos utilizados verifica-se que a amostra com óxido de cromo possui maior fração de ferrita com segunda fase alinhada em relação a amostra com óxido de silício.

## 2.2.1 Análise do cordão de solda

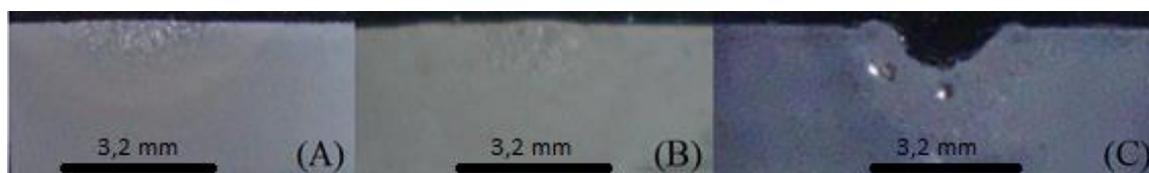
Na seção transversal do corte de cada processo de soldagem fez-se a verificação das medidas geométricas referentes a zona fundida de cada tipo de fluxo empregado. A média da largura e profundidade da zona fundida realizada nos perfis dos cordões de solda são apresentados na Tabela 3 juntamente com o respectivo desvio padrão.

**Tabela 3.** Valores da média e desvio padrão da profundidade e largura dos cordões de solda.

Amostra	Largura (mm)		Profundidade(mm)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TIG	2,367	0,011	0,595	0,005
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,574	0,009	0,888	0,003

Conforme os dados apresentados na tabela 3 verifica-se que houve um aumento na profundidade de 33% e largura de 8% do cordão de solda na amostra com adição do fluxo ativo de óxido de cromo (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), não foram detectadas descontinuidades de soldagem do tipo mordeduras, porosidades e/ou trincas em ambas as amostras comparadas.

Entretanto no cordão de solda onde utilizou o fluxo de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) o resultado não foi satisfatório como mostrado na comparação das macrografias do cordão de solda (Figura 4).



**Figura 4.** Análise macrográfica dos processos de soldagem (a) TIG convencional; (b) A-TIG com fluxo de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (c) A-TIG com fluxo de SiO<sub>2</sub>.

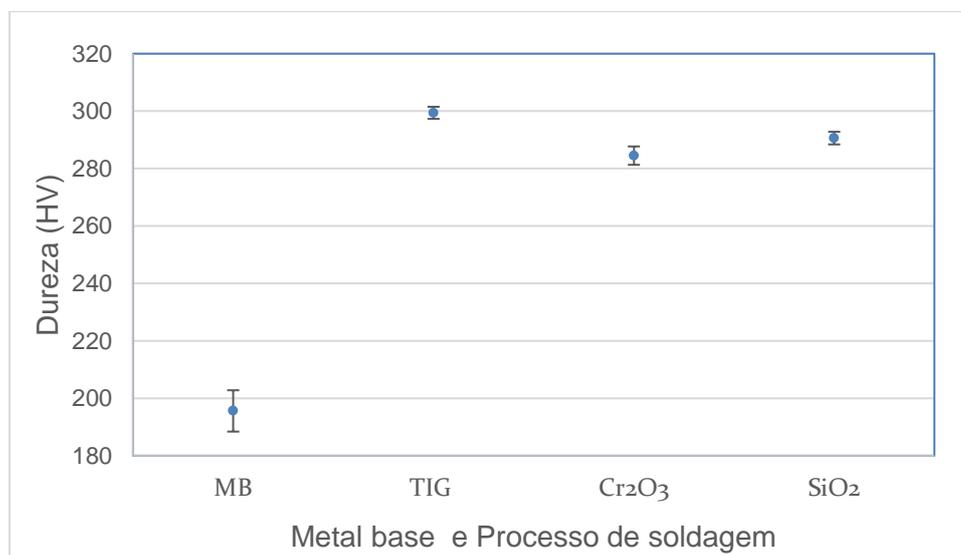
Essa descontinuidade composta de regiões de crateras Figura 4c e regiões de protuberâncias, de maneira alternada, possivelmente pode ser consequência da utilização de correntes e velocidades de soldagem elevadas, pois nessas condições ao invés de formar uma poça metálica líquida sob o arco, como ocorre na soldagem em baixas correntes, conforme a corrente de soldagem é aumentada a pressão do arco também aumenta, e com elevadas correntes a pressão do arco se torna suficientemente grande para empurrar o metal líquido para região posterior da poça de fusão, formando uma cratera sob o arco. Mesmo reduzindo a corrente para esse

fluxo para 70 A, como descrito na Tabela 2, não foi suficiente para obter uma solda sem essa descontinuidade.

De acordo com Mendez [19], o que irá determinar o aparecimento dessa descontinuidade será o resultado de um complexo balanço entre as forças que agem sobre a poça de fusão. De acordo com a combinação entre os parâmetros de soldagem, principalmente corrente de soldagem (um dos parâmetros mais importantes e fonte de interação com diversas medidas da geometria do cordão de solda) e velocidade de deslocamento da tocha que promove distintas condições, e com isso formam-se crateras. A interface entre o fundo da cratera e a poça de metal líquido é chamada ponto de transição. Com o aumento da velocidade de soldagem, toda a poça de fusão tende a ter uma maior extensão, afastando o ponto de transição e o centro do arco. Sendo assim os parâmetros utilizados durante o processo de soldagem provavelmente não foram suficientes para esse tipo de fluxo em conjunto com o material onde realizou a soldagem (Figura 4c).

### 2.2.2 Dureza

Foram realizadas na zona fundida as medidas de dureza com o objetivo de verificar possíveis diferenças nesta variável com a aplicação dos fluxos. As medidas foram posicionadas na zona fundida de cada cordão de solda. Na Figura 5 são mostrados estes resultados em termos de média e desvio padrão dos pontos medidos via ensaio de dureza Vickers das amostras do metal base, e dos processos de soldagem TIG, e A-TIG com fluxo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , respectivamente.



**Figura 5.** Valores da média e desvio padrão obtidos no ensaio de dureza.

É possível verificar que a dureza da zona fundida ficou entre os valores de 284,5 HV a 299,4 HV, sendo estes valores maiores que a dureza do metal base de 195,6 HV. Esse aumento da dureza na zona fundida é resultante do tipo de microestrutura observada e descrita acima em cada processo de soldagem. Assim o objetivo principal desse ensaio de dureza de observar se havia uma mudança abrupta entre os valores de dureza do cordão de solda da soldagem TIG e da soldagem A-TIG foram satisfatórios e, a mudança do tipo de fluxo promoveu uma pequena variação nos valores, no sentido de decrescer na direção dos valores do MB.

### 3 CONCLUSÃO

As microestruturas encontradas no cordão de solda foram: ferrita acicular (FA), ferrita com segunda fase (FS) e ferrita primária (FP) sendo que a maior proporção foi o microconstituente FA encontrado principalmente na zona fundida da soldagem TIG.

Na soldagem A-TIG com fluxo de  $Cr_2O_3$ , obteve resultados significativos em termos de penetração comparando com a soldagem sem fluxo, o que corrobora para comprovar a boa eficiência do processo de soldagem A-TIG, permitindo um aumento na profundidade do cordão de solda.

Percebeu-se que a corrente e a velocidade de soldagem são parâmetros que interferem no resultado da penetração podendo promover descontinuidade como ocorrido no processo de soldagem A-TIG com fluxo de  $SiO_2$ .

Apesar de serem observadas pequenas variações nas medidas de dureza estas podem ser explicadas devido aos diferentes microconstituintes encontrados ao longo dos pontos medidos. A dureza da zona fundida ficou dentro de uma faixa entre 284,5 HV a 299,4 HV, bem acima da dureza do metal base (195,6 HV).

### Agradecimentos

Os autores agradecem a CSN pela doação do aço, a UFMG pelos recursos para a realização dos processos de soldagem no LRSS/LabSEND. A.S.P. agradece a bolsa de produtividade à pesquisa (PQ-2) do CNPq (Processo 307798/2015-1). M.A.M.G agradece a bolsa de doutorado subsidiada pela CAPES vinculada ao PGCM/SE4-IME.

### REFERÊNCIAS

- 1 Azevedo, A. G. L. D.; Ferraresi, V. A.; Farias, J. P. Uma Revisão sobre o processo de soldagem A-TIG. Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Mecânica UFU. 2006
- 2 Brandi, S. D. Processo TIG. In: Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, F. D. H. D. Soldagem Processos e Metalurgia. 7. ed. São Paulo: Blucher, v. 1, 1992. Cap. 2c, p. 60-99.
- 3 Marques, P. V.; Modenesi, P. J.; Bracarense, A. Q. Soldagem TIG. In: Marques, P. V.; Modenesi, P. J.; Bracarense, A. Q. Soldagem – fundamentos e Tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 1, 2011. Cap. 13, p. 205-219.
- 4 Liu, L. -M.; Cai, D.-H.; Zhang, Z.-D. Gas tungsten arc welding of magnesium alloy using activated flux-coated wire. Scripta Materialia , 23 Julho 2007. 695-698.
- 5 Azevedo, A. G. L. D.; Ferraresi, V. A.; Farias, J. P. Soldagem de um aço inoxidável ferrítico com o processo A-TIG. Soldagem Inspeção, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 002-009, Março 2009.
- 6 Chern, T.-S.; Tseng, K.-H.; Tsai, H.-L. Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds. Materials and Design, 24 Junho 2010. 255-263.
- 7 Tseng, K.-H.; Chuang, K.-J. Application of iron-based powders in tungsten inert gas welding for 17Cr-10Ni-2Mo alloys. Powder Technology, Pingtung, 11 Maio 2012. 36-46.
- 8 Shyu, S. W. et al. Study of the Performance of Stainless Steel A-TIG Welds. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008. 193-201.
- 9 Vasudevan M, Bhaduri AK, Raj B, Prasad Rao K. Genetic algorithm based computational model for optimizing the process parameters in A-TIG welding of 304LN and 316LN stainless steels. Mater Manuf Processes 2007;22(5):641–9.
- 10 Chandrasekhar N, Vasudevan M. Intelligent modeling for optimization of A-TIG welding process. Mater Manuf Processes 2010;25(11):1341–50.

- 11 Maduraimuthu V, Vasudevan M, Muthupandi V, Bhaduri AK, Jayakumar T. Study of the effect of activated flux on the microstructure and mechanical properties of mod. 9Cr-1Mo steel. Metall Mater Trans B 2012;43(1):123–32.
- 12 Lin H-L, Wu T-M. Effects of activating flux on weld bead geometry of Inconel 718 alloy TIG welds. Mater Manuf Processes 2012;27:1457–61.
- 13 Sakthivel T, Vasudevan M, Laha K, Parameswaran P, Chandravathi KS, Paneerselvi S, et al. Creep-rupture behavior of 9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb P92 ferritic steel weld joint. Mater Sci Eng A 2014;591:111–20
- 14 R.S. Vidyarthi, D.K. Dwivedi, Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration, J. Manuf. Process. 22 (2016) 211–228, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.012>.
- 15 Gorni, Antoni Augusto - Caracterização Topológica da Microestrutura Bifásica. Revista Escola de Minas, 49:1, jan./mar. 1995, p. 40-44, 2008.
- 16 Liberato FM, Soldagem A-TIG em Aços Inoxidáveis Ferríticos UNS S41003, Dissertação de Mestrado, UFMG, 2013
- 17 Modenesi, P J, Marques, P V e Santos, D B. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte, MG : UFMG, 2012.
- 18 Zhang, T et al. Global progress on welding consumables for HSLA steel. ISIJ international, v. 54, n. 7, p. 1472-1484, 2014.
- 19 Mendez, P. F. Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding. Massachusetts Institute of Technology. 1999