

EFEITOS DO PREENCHIMENTO DO FLUXO COMPOSTO DE CAVACOS DE TITÂNIO EM ARAMES TUBULARES DO TIPO MCAW

Izabel Lima Criscuolo

José Gedael Fagundes Júnior

Universidade Estadual de Minas Gerais, Av. Brasília, 1304 - Baú, João Monlevade – MG

bebelcriscuolo@gmail.com

gedaelfagundes@gmail.com

Ariel Rodriguez Arias

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte – MG

arielra@demec.ufmg.br

bracarense@ufmg.br

Resumo. O presente trabalho investigou os efeitos das propriedades das soldas depositadas com arames tubulares do tipo MCAW, para a formação de carbonetos de titânio (TiC) na microestrutura da solda. Para a fabricação dos arames, foi utilizado fitas metálicas de diferentes espessuras com o objetivo de promover diferentes condições de soldagem pelas diferentes taxas de preenchimento do fluxo. Como componentes do fluxo foram utilizados grafite (carbono) e pós metálicos de titânio, obtidos a partir da moagem de cavacos das ligas Ti6Al4V, gerados na fabricação de implantes ortodôntico. Os cordões formados a partir da deposição dos arames com fita de espessura menor apresentaram maiores frações volumétricas de TiC e consequentemente maiores valores de dureza. Os carbonetos apresentaram a formação de partículas com formatos facetados e dendríticos com distribuição uniforme em matriz ferrítica. As frações volumétricas de TiC e os valores de microdureza foram proporcionais a taxa de preenchimento do fluxo nos arames.

Palavras chave: Carbonetos de titânio. Morfologia. Reciclagem.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de arames tubulares para a deposição de revestimento duro tem gerado grande interesse tecnológico, devido a sua grande versatilidade e possibilidade de ajuste da formulação pelos componentes do fluxo. Geralmente o cromo é um dos principais elementos presentes no fluxo dos arames tubulares, quando se deseja uma solda com elevada dureza e resistência ao desgaste, principalmente pela formação dos carbonetos (Cr_7C_3) na microestrutura. Contudo, a literatura aponta diversos trabalhos investigando as propriedades dos revestimentos duros compostos de carbonetos de titânio (TiC) na solda. Os carbonetos de titânio apresentam valores de dureza superior aos carbonetos de cromo, 3100 HV e 1800 HV, respectivamente. Conforme reportado por Gahr (1987), a dureza de um revestimento não significa resistência ao desgaste atuando apenas como um indicativo. Entretanto, os revestimentos a base de carbonetos de titânio têm apresentado boas propriedades de resistência ao desgaste abrasivo, comparado ao carboneto de cromo, com dureza mais baixa, conforme reportado por Fagundes *et al.* (2015a). De acordo com o trabalho de Holleck (2008), os carbonetos de titânio também apresentaram melhor comportamento quanto ao desgaste, comparado a carbonetos de dureza superior, como o carboneto de boro (B_4C).

A deposição dos revestimentos duros a base de TiC pode ser realizada a partir de diversos processos de soldagem. Wang, *et al.* (2005) utilizaram componentes no revestimento de eletrodos (SMAW) para a formação de uma solda repleta de TiC. Wang *et al.* (2006) aplicaram o fluxo composto de titânio e grafite diretamente sobre a superfície do metal de base e realizou a fusão desta camada, utilizando uma tocha GTAW como fonte de calor. Emamian *et al.* (2010) promoveram a formação de TiC utilizando processos de soldagem a laser. Gallo *et al.* (2013) avaliaram os efeitos da composição química do fluxo sobre a morfologia dos TiC formados por processos de soldagem a laser. A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura mostra que são utilizados pós comerciais de titânio na forma de ferro ligas, apresentando grau de pureza em torno de 35% de titânio e custo muito elevado, fazendo com que para aplicações em largas escalas o cromo seja o elemento de melhor custo benefício.

Por outro lado, o grande interesse pelos implantes de titânio (F67) e suas ligas (F136 – Ti6Al4V) geram grandes quantidades de cavacos nos processos de fabricação (usinagem), tornando um grande atrativo para a reutilização destes materiais. Entre as vantagens destacam-se a composição química, pelo menos 90% de titânio (em massa) e o baixo custo

por se tratar de resíduo industrial, considerado como sucata. Alguns trabalhos já indicam a viabilidade na utilização destes materiais como componentes dos fluxos de soldagem, apresentando resultados bem interessantes. Fagundes *et al.* (2015b) utilizaram fluxos composto de cavacos de titânio das ligas F67 e F136 que foram depositados diretamente na forma de uma “pré-camada” sobre o metal de base. A fusão foi realizada com a utilização de uma tocha GTAW. A microestrutura dos depósitos formados apresentou elevadas frações volumétricas de TiC com valores superiores a diversos trabalhos onde foram aplicados pós de titânio comercial. Em outro trabalho mais recente, Fagundes *et al.* (2018) utilizaram fluxo de arames tubulares, composto com a mesma composição química da “pré-camada” utilizada na condição anterior. Contudo, notou-se que a morfologia dos carbonetos presentes na microestrutura dos depósitos com a utilização dos arames tubulares, apresentou formas facetadas e prismáticas e não globulares ou arredondadas conforme foi observada nos depósitos formados pelo processo GTAW. Este comportamento pode ser atribuído as baixas frações volumétricas como resultado do coeficiente de preenchimento do fluxo que determina a proporção em massa do fluxo comparado a massa do arame tubular reportado por Widgery (1994), devido a utilização de uma fita grossa (0,5 mm) para a conformação e fabricação dos arames experimentais.

O objetivo do presente trabalho é investigar os efeitos gerados durante a soldagem e na microestrutura pela deposição de cordões de solda, utilizando fluxo compostos de cavacos de titânio (Ti6Al4V) nos arames tubulares com diferentes taxas de preenchimento do fluxo variadas a partir da conformação e trefilação de fitas metálicas com diferentes espessuras.

2. METODOLOGIA

Os cavacos de titânio foram submetidos a etapas de limpeza e moagem, seguindo procedimento padrão conforme já realizado em trabalhos prévios realizados por Fagundes *et al.* (2018). Após a limpeza, a moagem dos cavacos foi realizada a partir da utilização de um moinho pulverizador de placas. Os finos foram classificados utilizando peneiras com malha entre $-400\ \mu\text{m}$ a $+50\ \mu\text{m}$ (o sinal de menos indica passagem na peneira e o sinal positivo indica retenção), Figura 1. Finos com granulometria superior a $400\ \mu\text{m}$ foram submetidos novamente a operação de moagem, enquanto que os finos menores que $50\ \mu\text{m}$ foram destinados a ensaios de difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX) para caracterização.



Figura 1 – Aspectos dos cavacos de titânio desde o aspecto recebido, durante e após a moagem.

A proporção de cavacos de titânio e grafite (carbono) foi determinada a partir dos cálculos estequiométricos, onde se determinou que para cada 10 g de cavacos de titânio, serão necessários 3 g de grafite. A mistura contendo cavacos de titânio e grafite foi utilizada como fluxo dos arames tubulares.

A fabricação dos arames foi realizada em uma máquina de conformação e trefilação de arames tubulares experimentais, Figura 2. O processo se inicia pela conformação de uma fita metálica com seção retangular (1), geralmente de aço com baixo carbono. Na sequência, ao forçar a passagem por entre o par de roletes (2) a fita é conformada em U (3), onde através de um transportador de correia, o fluxo (mistura de cavacos e grafites) é alimentada ao arame (4). A fita passa por uma guia de alinhamento (5) e ao passar pela fieira de entrada (6), ocorre a conformação de perfil em U para tubo. A medição que o processo ocorre, o arame produzido é enrolado no tambor de tração (7). Após esta etapa, o arame é trefilado por diversas etapas de trefilação até atingir o diâmetro requerido. Para a presente investigação foram adotados dois tipos de fita metálica, com seção apresentando as dimensões de 10 mm x 0,5 mm e 10 mm x 0,3mm, em aço SAE 1008. Os arames foram trefilados até o diâmetro de 2,0 mm. Os cordões de solda formados foram denominados de AT5 e AT3 para os arames fabricados com fitas de espessura igual a 0,5 mm e 0,3 mm, respectivamente.

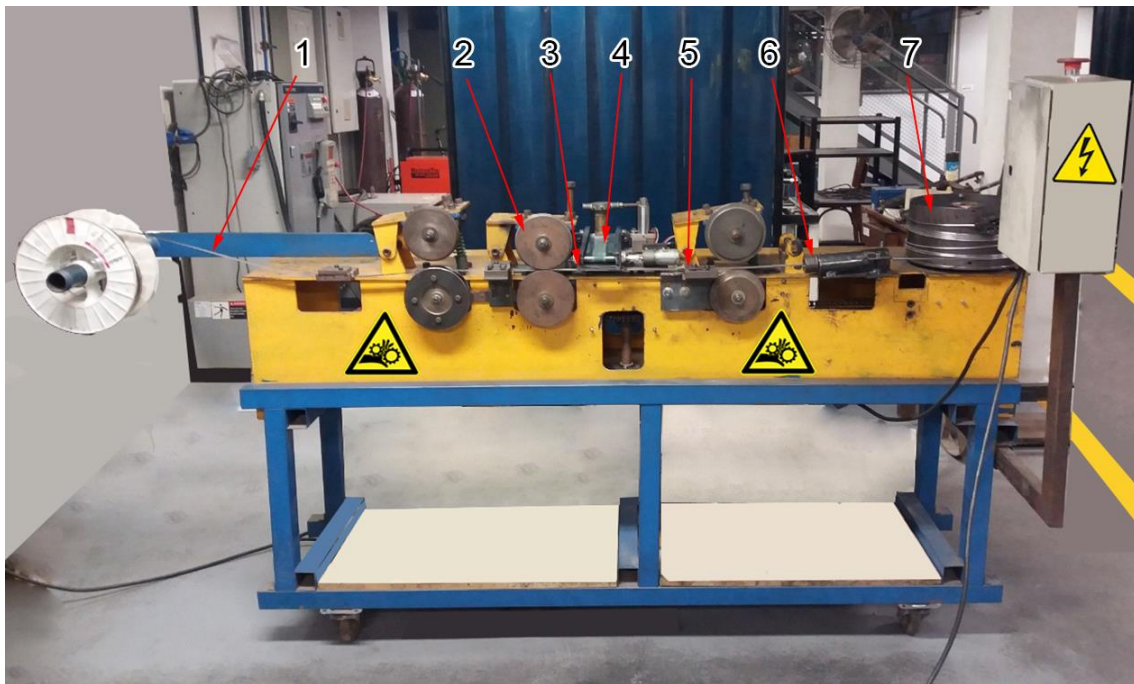


Figura 2 – Máquina utilizada para a conformação e trefilação dos arames tubulares.

A solda foi realizada a partir da utilização de uma fonte com controle eletrônico, operando em tensão constante, marca ESAB, modelo ARISTO Mig 500I Multivoltage (controle sinérgico desligado), equipada com um alimentador de arame AristoFeed 30-40W e painel de controle AristoPendant U82. Para o controle da velocidade de soldagem foi utilizado um trator automático portátil da marca WHITE MARTINS, modelo MC 46, adaptado com um dispositivo para fixação da tocha, Figura 3. Para evitar que o titânio presente no fluxo reagisse com o oxigênio formando óxidos, o argônio (comercialmente puro) foi estabelecido como gás de proteção utilizado. Os parâmetros de soldagem foram definidos a partir de vários testes preliminares dos quais foram possíveis formar cordões de soldas com aspectos satisfatórios para a análise. Desta forma utilizou-se uma tensão de soldagem de 25V, velocidade de alimentação do arame 4 m/min, velocidade de soldagem 240 mm/min, distancia bico de contato a peça (DBCP) 25 mm, vazão do gás em 18 l/min e polaridade inversa (CC+).

O metal de base utilizado foi uma chapa em aço de baixo carbono (A-36) com corpos de prova nas dimensões de 10 mm x 32 mm x 150 mm. A superfície de cada chapa foi esmerilhada e limpa, deixando-a isenta da camada de óxidos e impurezas. Para a presente investigação, as condições de soldagem de cada tipo de arame foram realizadas numa sequência de 3 repetições. De cada corpo de prova, foram retiradas duas amostras para caracterização microestrutural, avaliação da geometria do cordão de solda, presença de discontinuidades (poros e trincas) e ensaio de microdureza. Uma amostra foi retirada da região central do cordão para análises de DRX com o objetivo de identificar as fases que foram formadas, Figura 4. A superfície de todas as amostras foi preparada por técnicas convencionais de preparação metalográfica, utilizando Nital 2%. A microestrutura foi examinada por microscopia ótica, a partir da captura em diferentes regiões das amostras de seções dos cordões de solda. A microdureza foi realizada em um microdurômetro, com carga de HV0,3, com o indentador mantido por 15 segundos sobre a superfície da amostra. Para verificar as variações das microdurezas nas soldas, as medições foram realizadas em um espaçamento de 0,3 mm, iniciando na superfície da solda,

até atingir o metal de base, além da ZTA. Para fins estatístico, a dureza foi estabelecida a partir do cálculo da média baseado numa série de 3 carreiras de medições por amostra.

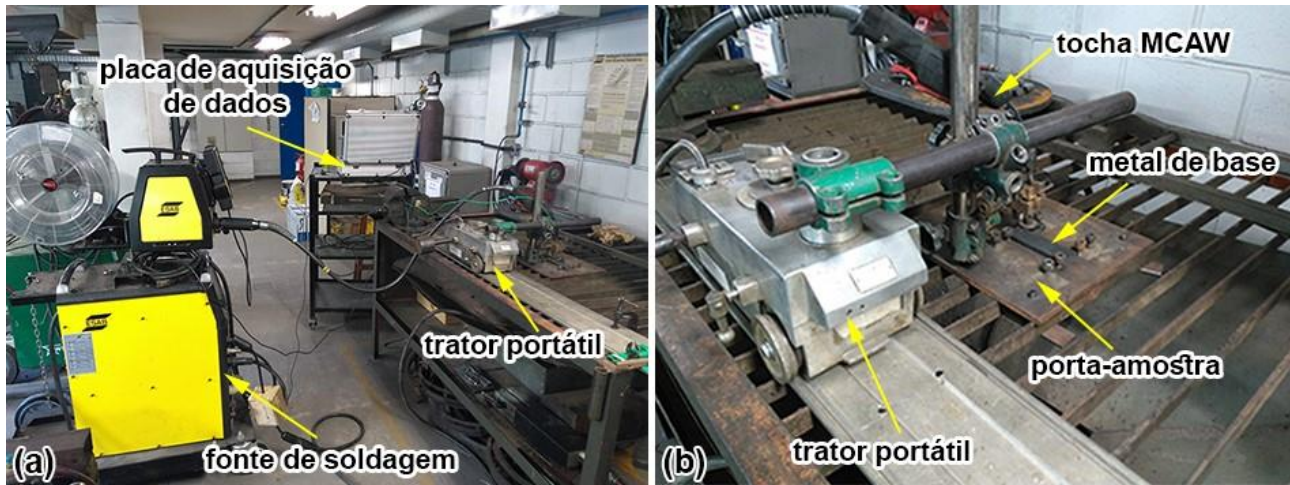


Figura 3 – Procedimento experimental para a realização da soldagem. (a) Indicação da fonte de soldagem e sistema de aquisição de dados. (b) Indicação da deposição dos arames no metal de base.

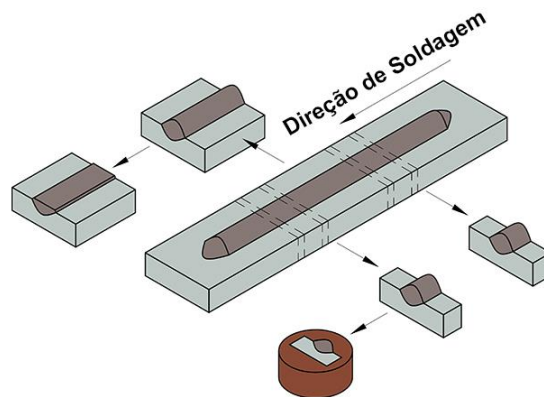


Figura 4 – Corte das amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os arames tubulares apresentaram diferentes diâmetros interno, em função da espessura da fita metálica utilizada. Em consequência, a taxa de preenchimento do fluxo foi igual a $11\% \pm 2\%$ e $17\% \pm 1,0\%$, para as fitas de 0,5 mm e 0,3 mm, respectivamente. Fortes e Welerson (2004) reportaram que os arames tubulares aplicados para revestimentos duros, apresentam taxas de preenchimento com valores entre 30% a 50%. Entretanto, os valores reduzidos apresentado pelos arames experimentais, estão sendo afetados pela baixa densidade dos componentes do fluxo, onde se tem o titânio e o carbono com densidade de 4,54 g/cm³ e 2,25 g/cm³, respectivamente. Já para os arames tubulares comerciais, o cromo, um dos principais elementos presentes nos fluxos, voltados para revestimentos duros, apresenta densidade de 7,18 g/cm³, conforme reportado por Oxtoby *et al.* (2012).

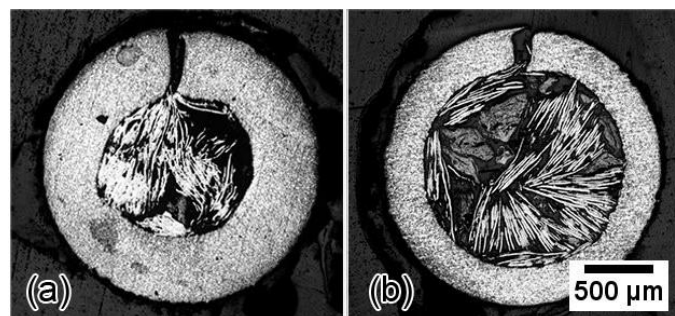


Figura 5 – Seção transversal dos arames tubulares. (a) arames fabricados com fita de 0,5 mm e (b) arames fabricados com fita de 0,3 mm.

Em função da espessura da fita metálica e valores da taxa de preenchimento do fluxo, foi possível calcular a composição química estimada dos arames tubulares, Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química nominal dos arames tubulares experimentais (% massa).

Arame	Ti	C	Al	V	Fe
AT05	6,75 – 6,95	2,30 – 2,45	0,50	0,30	Bal.
AT03	11,60 – 11,90	3,85 – 4,00	0,80	0,50	Bal.

Ambas as condições de soldagem apresentaram a formação de cordões com acabamento irregular, com elevada rugosidade e presença de respingos, Figura 6(a) e Figura 6(b), possivelmente em função da transferência metálica por curto circuito.

A Figura 6(c) e Figura 6(d) apresentam as seções macrográficas selecionadas de alguns corpos de prova a partir da soldagem dos arames. Observa-se boa coalescência entre a solda e o metal de base. Nos depósitos formados com arame de fita grossa, nota-se que os poros estão concentrados na região superior da solda quanto que nas condições de arame com fita fina, a ocorrência de poro foi distribuída ao longo da seção do cordão. A formação de poros, além da possível formação de gases pela possível reação com o oxigênio, pode também ser atribuída a baixa fluidez da poça de fusão, promovida pelos elementos presentes no fluxo, principalmente pelo aumento do teor de titânio e carbono. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que os carbonetos de titânio se formam quando a poça de fusão ainda se encontra em elevadas temperaturas, formando uma mistura entre uma fase sólida (TiC) e outra líquida (Fe). Desta forma, esta fase sólida afeta a fluidez da poça de fusão. Quando se tem uma fluidez deficiente (elevada viscosidade), os gases formados nas reações podem ficar retidos na poça de fusão formando os poros durante a solidificação.

Apesar de apresentar uma redução dimensional na geometria dos cordões depositados com os arames de fita fina, os testes de significância mostraram que não há diferenças significantes entre as variáveis. Em consequência da similaridade das dimensões entre os depósitos, a diluição também não apresentou diferenças, onde os valores calculados foram de $36\% \pm 4\%$ e $31\% \pm 7\%$ para os depósitos utilizando arames com fita grossa e fita fina, respectivamente.

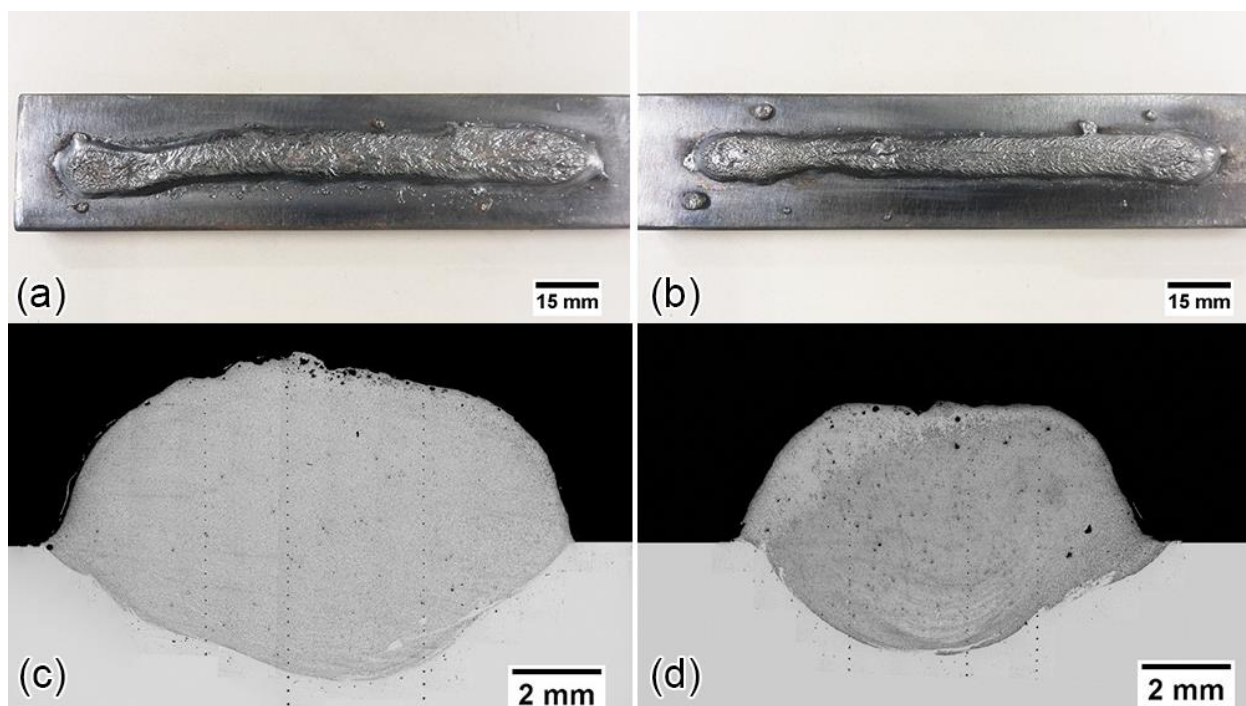


Figura 6 – Cordões de solda depositados com os arames tubulares (a) Fita com espessura de 0,5 mm. (b) Fita com espessura de 0,3 mm. (c) Seção transversal da condição de fita com espessura de 0,5 mm. (d) Seção transversal da condição de fita com espessura de 0,3 mm.

A Figura 7 apresenta a microestrutura da seção dos cordões de solda. Em ambos os casos se nota a formação de carbonetos de titânio de forma bem distribuídas na matriz ferrítica. A fração volumétrica dos carbonetos foi afetada pela taxa de preenchimento do fluxo em função da espessura da fita metálica. Os depósitos apresentaram fração volumétrica de carbonetos de $16\% \pm 4\%$ e $25\% \pm 4\%$ para os arames fabricados com as fitas de 0,5 mm e 0,3 mm, respectivamente. A morfologia dos carbonetos de titânio mostrou ser afetada pelas taxas de preenchimento do fluxo. O aumento na

quantidade de fluxo (fitas finas) promoveu a formação de partículas mais grosseiras, levemente arredondadas com ramificações dendríticas. Este comportamento pode ser atribuído aos efeitos do teor de titânio e carbono durante os estágios de solidificação da solda. Uma maior oferta destes dois componentes aumenta o tempo de crescimento dos carbonetos, afetando o tamanho e a forma das partículas. Contudo, estes efeitos necessitam de uma abordagem mais aprofundada. Gallo *et al.* (2013) reportaram que a adição de silício na solda apresenta uma tendência a formação de partículas com ramificações dendríticas e arredondadas.

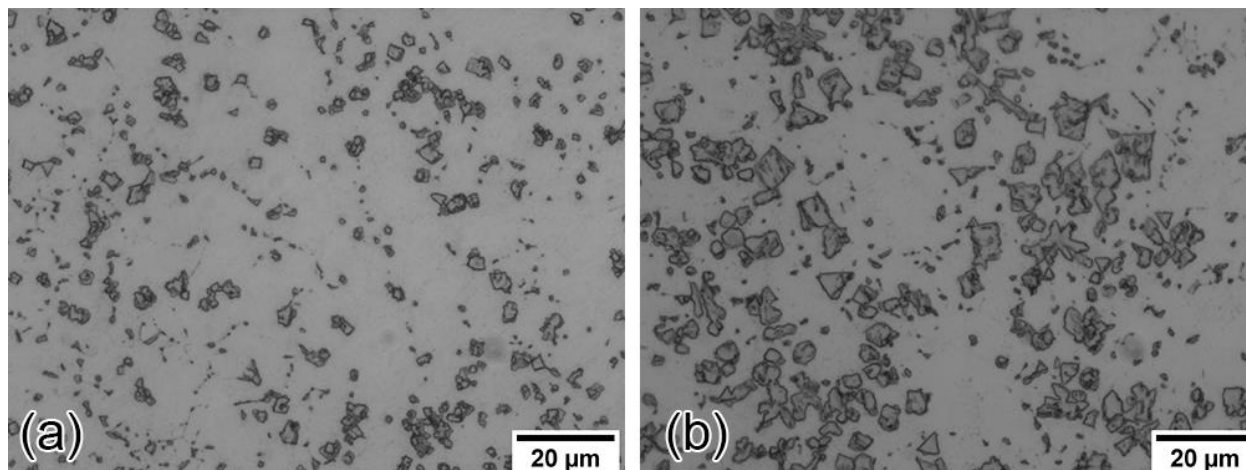


Figura 7 – Microestrutura das soldas fabricadas com arame de (a) fita de 0,5 mm e (b) fita com 0,3 mm

Os valores de durezas apresentaram diferenças significantes na comparação entre as duas condições de soldagem, Figura 8(a), como resultado da maior oferta do fluxo, promovida pelos arames fabricados com a fita fina. Gahr (1987) reportou que para um material possuir boa resistência ao desgaste, a dureza por si só não é suficiente para determinar esta característica. Contudo, esta propriedade pode ser utilizada como um indicativo da resistência ao desgaste. Para uma investigação segura da resistência ao desgaste, o sistema tribológico atuante é que irá definir o comportamento quanto a resistência ao desgaste. Deste modo, uma microestrutura apresentando uma baixa fração volumétrica de carbonetos pode ser indicada para determinadas aplicações enquanto que as soldas com elevadas frações volumétricas para outros sistemas tribológicos.

O difractograma dos cavacos de titânio (após a moagem), Figura 8(b), apresentou os mesmos picos para a barra de titânio (antes da usinagem e moagem), indicando que não houve a formação de nenhuma outra fase durante a obtenção dos pós. Para os ensaios de DRX realizados nas soldas, nota-se um comportamento semelhante quanto as fases identificadas, onde as principais fases encontradas foram ferrita, cementita e os carbonetos de titânio. Gallo *et al.* (2013) atribui que devido ao produto das reações dos elementos químicos presentes (Fe e Ti) e mesmo não terem sido evidenciadas no difractograma e nas micrografias, é possível que intermetálicos do tipo FeTi ou FeTi₂ tenham se formado. Na comparação com os espectros do cavaco de titânio, observa-se que todo o titânio presente no fluxo reagiu para a formação de carbonetos de titânio, uma vez que o titânio na fase pura não foi identificado nos difractogramas dos depósitos.

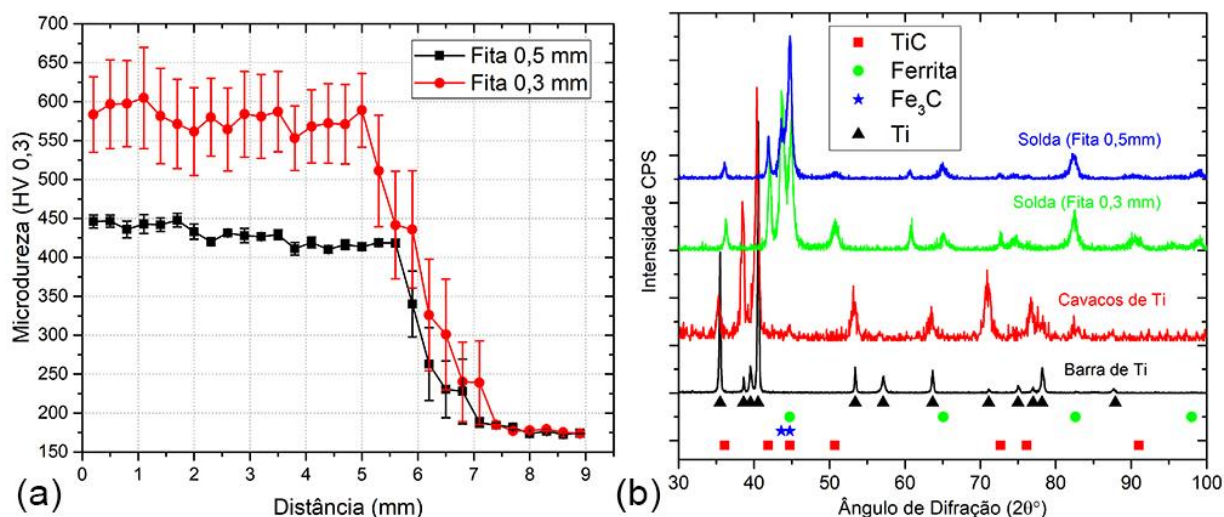


Figura 8 – (a) Comparação dos valores de dureza. (b) Difractogramas dos ensaios de DRX.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados com a comparação das condições de diferentes taxas de preenchimento do fluxo nos arames tubulares, se pode concluir que:

- Apesar da condição de arames tubulares fabricados com a fita grossa apresentar tamanhos maiores, os valores de diluição não apresentaram diferenças significantes para ambas as condições de soldagem. Mesmo apresentando uma maior quantidade de massa para fundir (aramé com fita grossa), a densidade de corrente foi a mesma.
- Maior oferta do fluxo (titânio e carbono) promovem maiores valores de fração volumétrica dos carbonetos e estas, por sua vez, são diretamente proporcionais aos valores de dureza da solda.
- Mesmas as condições de baixas taxas de enchimento do fluxo (fitas grossas) apresentando baixa fração volumétrica de carbonetos e baixos valores de dureza, esta condição pode apresentar melhor comportamento quanto ao desgaste, dependendo do mecanismo atuante.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Neodent pelo fornecimento dos cavacos de titânio utilizados neste trabalho, aos Departamentos de Engenharia Metalúrgica e Materiais (DEMET) e de Minérios (DEMIN), ambos UFMG, pela disponibilização dos recursos de Caracterização Microestrutural (DRX) e Moagem, respectivamente. Ao apoio financeiro da CAPES durante a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Emamian, A., Corbin, S. F., e Khajepour, A., 2010. "The influence of combined laser parameters on in-situ formed TiC morphology during laser cladding". *Surface & Coatings Technology* 206, p. 124-131.
- Fagundes, J. G., Moreno, A. M., Ribeiro, P. H., Arias, A. R., e Bracarense, A. Q., 2018. "Formation of TiC by the application of Ti6Al4V machining chips as flux compounds of tubular wires". *Journal of Physics: Conf. Series* 1126, p. 1-7.
- Fagundes, J.G., Oliveira, D., Pontim, G., Egito, G., Ventrella, V., e Gallego, J., 2015a. "Estudo Comparativo entre Soldas Contendo Diferentes Carbonetos (Cromo ou Titânio), Visando a Produção de Revestimentos Resistentes ao Desgaste". In *XLI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem - Associação Brasileira de Soldagem*, p. 1-9.
- Fagundes, J.G., Ventrella, V., e Gallego, J., 2015b. "Reciclagem de cavacos de titânio para a deposição de revestimentos duros por soldagem". *Soldagem e Inspeção* 20(1), p. 117-127.
- Fortes, C., e Welerson, A., 2004. *Apostila de Arames Tubulares*. ESAB.
- Gahr, Z. K., 1987. *Microstructure and Wear of Materials*, Vol. 10, New York: Elsevier.
- Gallo, S. C., Alam, N., e O'Donnell, R., 2013. "In-situ synthesis of titanium carbides in iron alloys using plasma transferred arc welding". *Surface & Coatings Technology* 225, p. 79-84.
- Holleck, H., 1986. "Material selection for hardfacing". *Journal of Vacuum Science & Technology*, p. 2660-2669.
- Oxtoby, D. W., Gillis, H. P., e Champion, A., 2012. *Principles of modern chemistry* (7ª ed.). Cengage Learning.
- Wang, X. H., Zou, Z. D., Qu, S. Y., e Song, S. L. (2005). "Microstructure and wear properties of Fe-based hardfacing coating reinforced by TiC particles". *Journal of Materials Processing Technology* 168, p. 89-94.
- Wang, X., Song, S., Zou, Z., e Qu, S., 2006. "Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process". *Materials Science and Engineering*, p. 60-67.
- Widgery, D., 1994. *Tubular wire welding*. Cambridge: Abington Publishing.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

Effects of Flux Filling Efficiency of Tubular Wire Compound of Recycled Titanium Chips

Izabel Lima Criscuolo

José Gedael Fagundes Júnior

Universidade Estadual de Minas Gerais, Av. Brasília, 1304 - Baú, João Monlevade – MG

bebelcriscuolo@gmail.com

gedaelfagundes@gmail.com

Ariel Rodriguez Arias

Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte – MG

arielra@demec.ufmg.br

bracarense@ufmg.br

Abstract. *Present work investigated the effects of welds properties deposited with MCAW tubular wires, aiming the formation of titanium carbides (TiC) in the weld microstructure. For the manufacture of wires, metal sheath of different thicknesses were used in order to promote different welding conditions due to the different fluxes filling rates. As components of the flux, graphite (carbon) and titanium metal powders were used, which was generated from the grinding of chips of Ti6Al4V alloys, generated in the manufacture of orthodontic implants. Weld beads formed by the deposition of the wires with the sheath of smaller thickness showed higher volumetric fractions of TiC and consequently higher values of hardness. The carbides showed the formation of particles with faceted and dendritic morphology with uniform distribution in a ferritic matrix. The volumetric TiC fractions and the microhardness values were proportional to the flux filling rate in the wires.*

Keywords: Recycling of residues. TiC morphologies. Titanium carbide.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.