

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE REVESTIMENTOS DUROS À BASE DE CARBONETOS DE TITÂNIO REFUNDIDOS COM LASER PULSADO

G. I. Pontin^{1*}; G. M. P. Egito¹, J. G. F. Júnior¹, V. A. Ventrella¹, J. Gallego¹

1. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica.
E-mail: gabrielguaira@hotmail.com

RESUMO

O desgaste abrasivo é uma das causas de danificações em equipamentos e responsável por prejuízos nos processos industriais. Uma técnica capaz de minimizar os efeitos deste fenômeno é a aplicação de revestimentos duros nas superfícies críticas. Recentemente foram desenvolvidos revestimentos contendo carbonetos de titânio formados pela fusão de misturas contendo cavacos das ligas ASTM F67 e ASTM F136 sobre peças de aço-carbono ASTM A-36. Após a aplicação do processo de soldagem GTAW obteve-se significativa fração volumétrica de TiC grosseiro com elevada dureza. No presente trabalho foi investigada a refusão dessas soldas pelo processo de soldagem a Laser Nd:YAG pulsado. A microestrutura das amostras foi analisada por difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microdureza Vickers. A caracterização microestrutural mostrou que houve refinamento dos carbonetos de titânio (TiC) na matriz ferrítica refundida com o Laser, cujo principal efeito foi um endurecimento do metal de solda. Este comportamento favorece o uso da refusão a Laser para a melhoria da qualidade das superfícies que demandam maior resistência ao desgaste abrasivo.

Palavras-chaves: *refusão a Laser, revestimento duro, microestrutura, ligas de titânio, carbonetos de titânio, desgaste abrasivo.*

INTRODUÇÃO

A preocupação com as falhas e danos ocasionados aos equipamentos é refletida através de seus gastos, estima-se que em torno de 2% a 4% do PIB de países industrializados sejam destinados ao reparo de peças e equipamentos⁽⁴⁾. Uma das formas de mitigar a ação do desgaste, principalmente o abrasivo que se apresenta de forma mais agressiva, é a deposição de revestimentos duros superficiais^(2,3).

Dentre os elementos prejudiciais aos processos produtivos destaca-se o desgaste, que busca prever o comportamento físico dos sistemas para melhorar a produtividade e reduzir os custos de manutenção do setor^(1,3). No ramo sucroalcooleiro temos o desgaste abrasivo nas ferramentas que envolvem o corte, desfibramento e a moagem da cana; as facas e os martelos desfibradores são os primeiros elementos a entrarem em contato com a cana-de-açúcar^(5,8).

Por meio da soldagem, seja ela por eletrodo revestido ou GTAW, temos a formação de carbonetos metálicos através da adição de carbono em conjunto de metais com elevada dureza como o cromo (2150 HV), titânio (2800 HV), tungstênio (2350HV), vanádio (2900 HV), entre outros; lembrando-se que a dureza é um indicador comparativo referente a resistência a abrasão^(6,7). Os carbonetos metálicos apontam estabilidade química, elevado ponto de fusão e alta dureza. Outra forma de alterar as propriedades do material após a soldagem é refundindo o material pelo processo a laser, buscando assim refinar os carbonetos do processo anterior⁽⁵⁾.

Na busca de redução de custo para o processo temos o reprocessamento de cavacos, por exemplo, de ligas de titânio ASTM F67 e ASTM F136 utilizadas normalmente em implantes ortodônticos para formação da camada carbonetante a ser soldada no metal de base, assim temos a criação de soluções alternativas para reinserção deste elemento, considerado refugo, na cadeia produtiva. O objetivo do presente trabalho é caracterizar a refusão dos carbonetos de titânio à laser primordialmente formado pelo processo de soldagem TIG a partir da deposição de misturas de finos de cavaco de titânio e grafite em pó averiguando as mudanças microestruturais e de microdureza dos revestimentos duros⁽⁹⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

A obtenção do titânio para formação dos carbonetos deu-se através de cavacos gerados na fabricação de implantes odontológicos a partir da usinagem das ligas ASTM F67(titânio puro) e ASTM F136(Ti-6Al-4V). Esses cavacos passaram por processos de limpeza grosseira e banho ultrassônico afim de eliminar as impurezas e contaminações providas do fluido de corte do processo de usinagem⁽⁸⁾.

Após o processo de limpeza os cavacos foram triturados em um aparato baseando-se em um moinho de grãos, no qual instalou-se duas pedra de granito em uma furadeira de coluna vertical em baixa rotação (90 rpm). Os finos retirados do processo de moagem foram classificados com peneiras de 40 Mesh (0,42 mm) e sua composição química determinada pela técnica de difração de raio-X (DRX). Para formação da camada carbonetante adicionou-se aos cavacos moídos, de acordo com a estequiometria do carboneto de titânio (tipo MC), 3 g de grafite em pó para cada 10 g de cavacos moídos e 2% em massa de silicato de sódio (Na_2SiO_3) utilizado como agente vitrificante. A mistura foi umedecida com uma pequena quantidade de água destilada afim de formar uma pasta a ser inserida no molde (uma chapa de 3 mm de espessura com um canal de 6 mm x 80 mm) sobre a superfície do metal base ASTM A-36 (10 mm x 32 mm x 80 mm) a ser soldado pelo processo GTAW - Gas Tungsten Arc Welding.

Para soldar o revestimento utilizou-se uma fonte de energia da marca LINCOLN ELECTRIC com eletrodo de tungstênio com 2% de tório de 3,25 mm de diâmetro. Um trator de corte automático portátil White Martins MC46 foi adaptado para fixação da tocha visando uma melhor continuidade e qualidade no processo. As amostras foram submetidas ao processo com uma corrente máxima de 230A, tensão de 29 V, velocidade do trator de 100 mm/min e uma energia de soldagem de 1,8 kJ/mm. Assim cortou-se a parte central da amostra com 27 mm para ser refundida pelo processo de soldagem a laser pulsado Nd:YAG, com frequência de 9Hz, largura temporal de 10 ms, potência de pico 0,5 W, energia de pulso de 5 J, velocidade de

soldagem de 3,56 mm/s e sobreposição de 50% definidos através de testes buscando uma melhor identificação do processo de refusão.

Dessa forma, as superfícies das amostras foram preparadas através dos métodos convencionais para análise microestrutural e realização de ensaios de dureza. Iniciou-se pelo corte transversal dos revestimento duros refundidos, sendo embutidos em resina de poliéster para o processo de lixamento com lixas de 80 a 1200 granas, polidos em alumina de 1µm. Aplicou-se banhos ultrassônicos para remoção de resíduos químicos e atacou-se as amostras com Nital 2% para revelação microestrutural.

Examinou-se as fases do revestimento pela difração de raio-X (DRX) usando um difratômetro com tubo de cobre (Cu K_{α} =1,5405Å) e monocromador de grafite e a identificação das fases baseando-se nas fichas cristalográficas CIF consultadas pelo banco de dados do ICDS - Inorganic Crystal Structure Database⁽¹²⁾. A variação da microdureza foi medida através de um ultramicrodurômetro da marca SHIMADZU – DUH 211s pela microdureza equivalente Vickers HV*⁽¹³⁾, com carga máxima de 1N durante cinco segundos. As medidas foram retiradas a partir de 0,02 mm da superfície da solda, depois à 0,02mm para identificação da refusão, 0,2 mm para solda GTAW e 0,7 mm para o metal base; para fins estatísticos os cálculos das médias baseou-se em uma série de cinco medições por amostra.

As caracterizações microestruturais das amostras foram feitas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o equipamento ZEISS EVO – LS15 pela detecção da emissão de elétrons retroespalhados (BSE). As imagens foram feitas em pontos distintos das amostras com ampliações de 5000 e 10000 vezes, mostrando o contraste de número atômico no qual elementos mais leves geram tons escuros e elementos mais pesados geram tons mais claros na micrografia. As análises quantitativas geradas pelas imagens de MEV são determinadas pelos recursos do *ImageJ*[®], assim as imagens foram convertidas em tons de cinza e depois desmembradas para caracterização dos carbonetos. A análise das imagens permitiu a determinação de parâmetros como circularidade, diâmetro equivalente, diâmetro de Feret e fração volumétrica das partículas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises por meio da difração de raio-X determinaram as fases presentes nos cordões de soldados pelo processo GTAW e refundidos à laser com auxílio das fichas CIF⁽¹¹⁾ indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetro cristalográficos das fases encontradas por difração de raio-X.

Fase	Ficha ICSD	Parâmetro de rede [Å]		
		a	b	c
α -Ti	44390	2,951	2,951	4,679
β -Ti	44391	3,331	-	-
TiC	44494	4,318	-	-
Ferrita	38308	2,866	-	-

Dessa forma tem-se que o titânio foi o elemento predominante nos cordões de solda das ligas ASTM F67 e F136 (Figura 1) confirmando assim a formação de carbonetos de titânio compostos pela camada carbonetante.

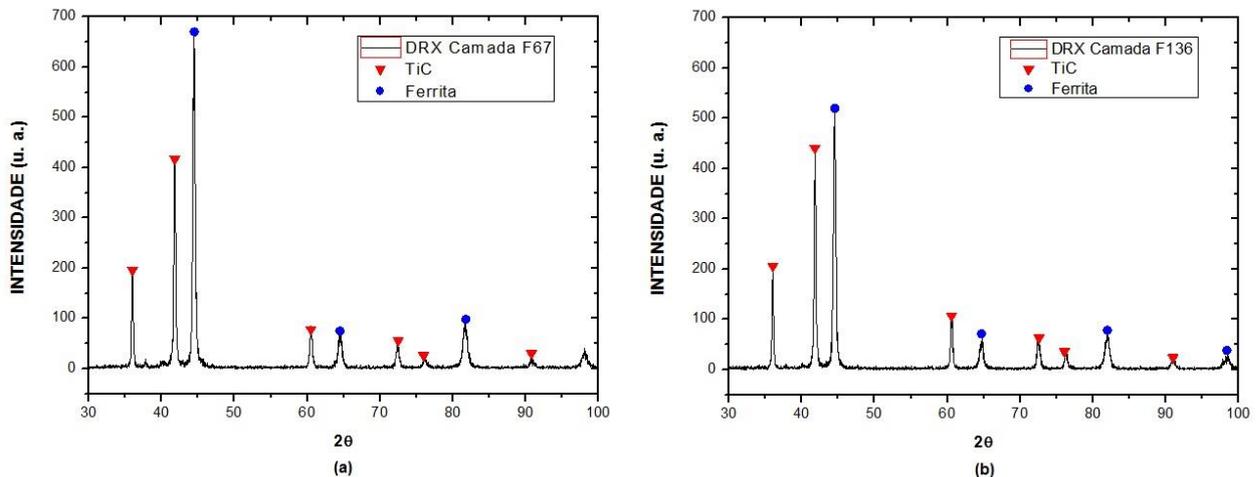


Figura 1. Difratoograma dos cordões de solda com camada carbonetante de (a) Liga F67 (puro) e (b) Liga F136 (Ti6Al4V).

Analisando-se os dois difratogramas em conjunto é possível identificar que os picos de titânio são coincidentes para as duas ligas utilizadas na camada carbonetante como mostra a Figura 2.

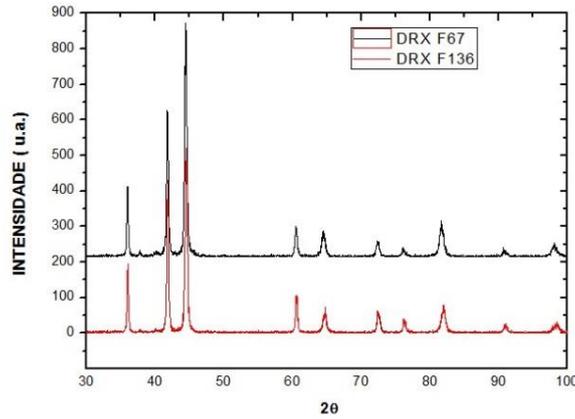
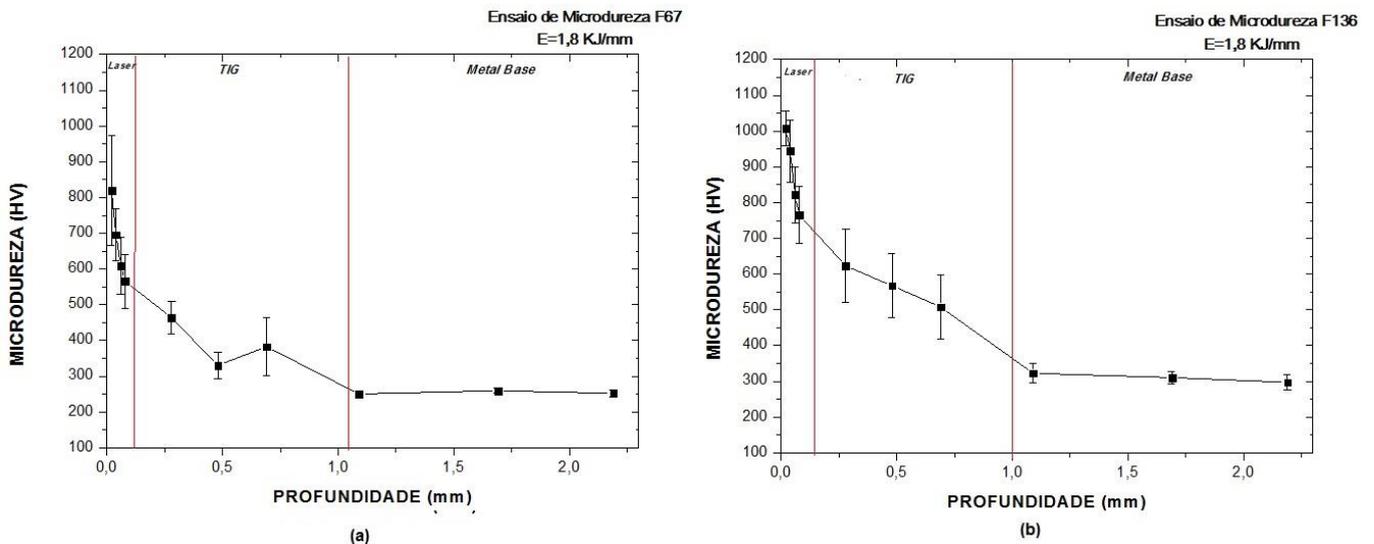


Figura 2. Comparação dos resultados de DRX dos cordões de solda F67 e F136.

As medições de microdureza pelo DUH mostraram que houve um aumento progressivo de acordo com a proximidade da superfície do material, assim a camada refundida apresentou maior dureza que a camada soldada, que por sua vez foi maior que o metal base (Figura 3). A elevação na microdureza dentro do cordão foi determinada pela presença e o tamanho dos carbonetos de titânio formados, e a dispersão dos valores em cada ponto determinada pelo perfil da região do indentador Vickers é observada em regiões com grandes densidades de carbonetos de titânio tem-se valores de dureza mais altos comparados a regiões com baixa



densidade.

Figura 3. Variação da microdureza do metal base, soldagem GTAW e refusão à laser (a) F67 e (b) F136.

As análises micrográficas pelo MEV através do detector de elétrons retroespalhados mostra a matriz ferrítica como fase predominante e os carbonetos de titânio como segunda fase (Figura 4). Verifica-se uma distribuição uniforme dos carbonetos na matriz, a microdureza confirma que a presença desta partículas favoreceu o aumento da dureza na superfície, as ramificações dendríticas são características de tais elementos sendo que na refusão tem-se uma maior dispersão deste elementos na matriz ferrítica.

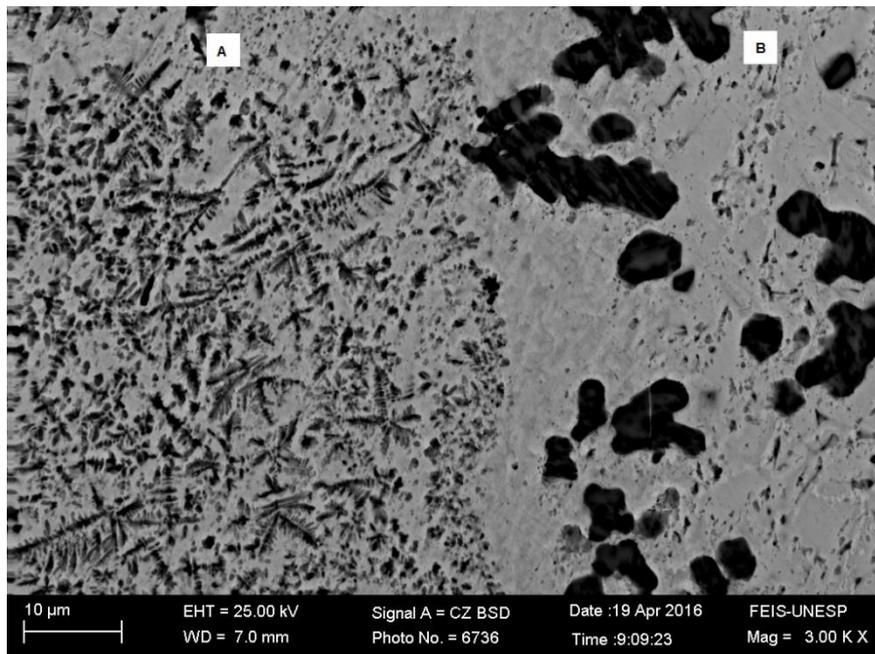


Figura 4. Micrografia da amostra na divisão entre o processo de refusão a laser (A) e o de soldagem GTAW (B).

A fração volumétrica é representada pela densidade dos carbonetos na matriz, assim os resultados obtidos, Figura 5(a), demonstram que a fração volumétrica de carbonetos de titânio na formação dos cordões está entre 32,42% e 58,77%. Através do software *ImageJ*® foi possível identificar o diâmetro de Ferret, Figura 5(b), considerado o diâmetro de uma circunferência com a mesma área da partícula, nota-se uma variação entre o tamanho entre o puro e o ligado em torno de 10 µm.

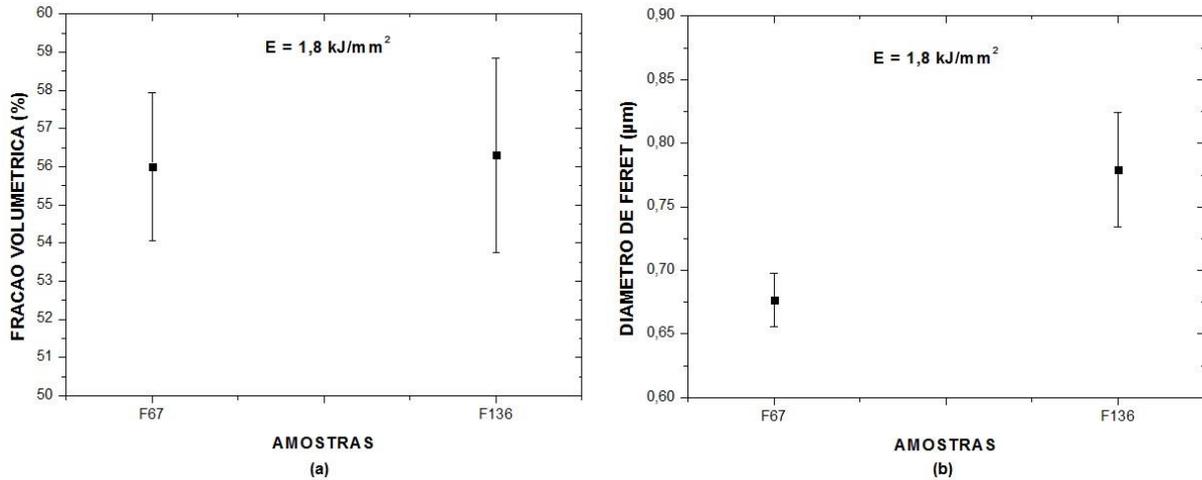


Figura 5. Variação da fração volumétrica (a) e do diâmetro de Feret (b) para refusão das ligas soldadas por GTAW e refundidas por laser F67 e F136.

A definição da morfologia dos carbonetos é de grande importância para definição dos revestimentos duro, sendo quanto mais próximo do formato circular a partícula melhor é sua resistência ao desgaste devido não ter concentração de tensões na interface da matriz. A circularidade nos traz a medida de quão próximo as partículas estão do formato circular, conforme a Figura 06 – a, temos os valores das partículas da camada carbonetante F67 e F136 e comparado com valores dos formatos das partículas temos que sua forma está entre um pentágono e um triângulo pela sua formação dendrítica.

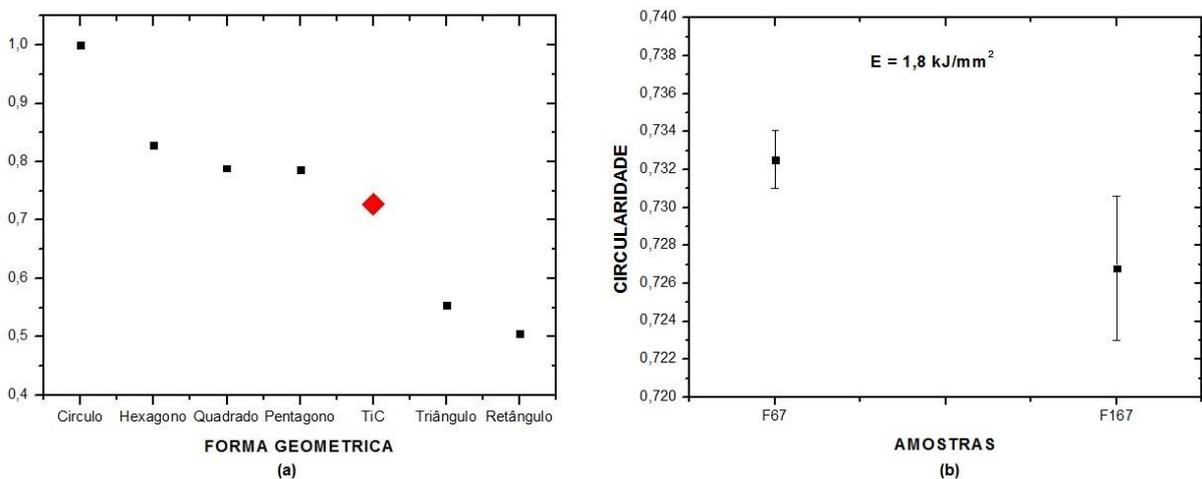


Figura 06. Forma geométrica carbonetos de titânio (a) de acordo com a sua variação de circularidade (b).

O diâmetro equivalente, que é determinado pela medida de uma propriedade do tamanho da partícula com dimensão linear, foi analisado pelo ImageJ. O tamanho do diâmetro equivalente dos carbonetos variou entre 3,45 e 3,87 μm , Figura 7(a), e comparado a outros autores^(8,9,10) que trabalharam com o processo GTAW tem-se uma maior dispersão devido ao processo de refusão da solda.

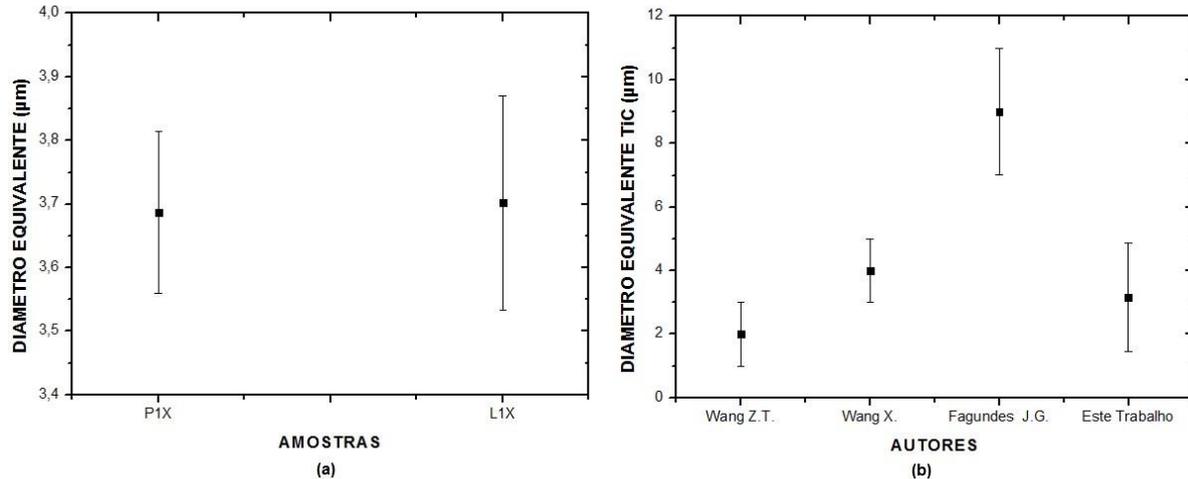


Figura 7. Diâmetro equivalente para as amostras F67 e F136 (a) e comparação com outros autores (b).

CONCLUSÕES

A refusão a laser promoveu significativa alteração da microestrutura do revestimento GTAW. Houve redução do tamanho dos carbonetos de titânio formados, que resultou no endurecimento dos revestimentos refundidos à laser.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LCE – Laboratório de Caracterização Microestrutural do DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais/UFSCar pelo apoio na caracterização microestrutural; à Implalife Biotecnologia pelos insumos e as bolsas concedidas pela CAPES e CNPq durante o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

1. BULLOCH, J. H.; HENDERSON, J. L. Some Considerations of Wear and Hardfacing Materials. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Cape Province, 19 novembro 1990. 251-267.
2. BLAU, P. J.; et. Al. Friction, lubrication, and wear technology. ASM Internacional Handbook Committee, v.18, 1992.
3. IBGE. Índice de categoria por uso de atividade, 2015 Indicadores industriais selecionados. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/industria/pimpfuso_atividade/default.shtm>. Acesso em: 15 jun. 2016.
4. GARCÍA, D. B. C. Aplicação de revestimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia – MG, 2011.
5. GAHR, K.H. Z. Microstructure and wear of materials. New York: Elsevier, 1987. V.10
6. BUCHELY, M. F.; et. Al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. Wear. Medellín – Colombia, 3 de Março de 2005, 54–60.
7. Lima, A. C. e Winck, L. B. Análise Comparativa de Dois Eletrodos Revestidos Utilizados na Aplicação de Revestimentos Duros em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar. XXXII Consolda – Congresso Nacional de Soldagem, Belo Horizonte, MG. 2 a 5 de outubro, 2006.
8. FAGUNDES JÚNIOR, J. G., MANERA, R. S., TOKIMATSU, R. C., VENTRELLA, V. A., GALLEGO, J. Aplicação de Cavacos de Titânio para Produção de Revestimentos Resistentes ao Desgaste. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 19, p. 264-270, jul/set 2014. DOI: 10.1590/0104-9224/SI1903.09.
9. WANG, Z. T.; ZHOU, X. H.; ZHAO, G. G. Microstructure and formation mechanism of in-situ TiC-TiB₂/Fe composite coating. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Harbin, v. 18, n. 4, p. 831-835, 2008.
10. WANG, X. H. et al. Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process. Materials Science and Engineering, Jinan, v. 441, n.1/2, p. 60-67, 2006.
11. INORGANIC CRYSTAL STRUCTURE DATABASE (ICSD). Arquivos cristalográficos no formato CIF (Crystallographic Information Framework) disponíveis em <http://www.fiz-karlsruhe.de/icsd.html> . Acesso em Julho de 2016.
12. ISO 14577. Metallic materials – Instrumentation indentation test for hardness and materials parameters – Part 2: Verification and calibration of testing machines, International Standard Organization, 2002.

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF HARDFACING BASE OF TITANIUM CARBIDES REMELTED WITH PULSED LASER

G. I. Pontin^{1*}; G. M. P. Egito¹, J. G. F. Júnior¹, V. A. Ventrella¹, J. Gallego¹

1. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica.
E-mail: gabrielguaira@hotmail.com

ABSTRACT

The abrasive wear is a cause of damage to equipment and responsible by losses in industrial processes. A technical able to minimize the effects of this phenomenon and the application of hardfacing on critical surfaces. Recently, there were developed hardfacing containing carbides of titanium formed by mixtures of fusion swarf containing the ASTM F67 alloy and ASTM F136 about carbon steel parts ASTM A-36. After the GTAW welding process the application obtained a significant volume fraction of carbides TiC with high hardness. In present work was investigated one of these solders reflow hair welding process Laser Nd: YAG pulsed. The microstructure of the samples was analyzed by diffraction X-ray (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and microhardness. Microstructural characterization showed was refinement of carbides of titanium (TiC) in the ferritic matrix remelted with the laser, whose main effect was hum weld metal hardening. This behavior favors the use remelting a paragraph of Laser surface quality improvement require greater resistance to abrasive wear.

Keywords: *Laser remelting, hardfacing, microstruture, titanium alloy, titanium carbides, abrasive wear.*