

# Reciclagem de Cavacos de Titânio para a Deposição de Revestimentos Duros por Soldagem<sup>a</sup>

José Gedael Fagundes Júnior<sup>1</sup>, Vicente Afonso Ventrella<sup>1</sup>, Juno Gallego<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais e Processos Tecnológicos – MAPROTEC, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

Recebido: 05 Fev., 2015

Aceito: 19 Abr., 2015

E-mail:

fagundes\_mecanica@hotmail.com  
(JGFJ)

**Resumo:** O titânio é um metal nobre e possui excelentes propriedades biomecânicas, podendo assim ser plenamente aceito pelo organismo humano. A grande demanda na utilização de implantes dentários, fabricados a partir de ligas de titânio traz consigo um aumento significativo na geração de resíduos (cavacos), resultantes dos processos de usinagem empregados. Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais, soluções alternativas para a reutilização de tais resíduos têm sido estudadas. O carboneto de titânio (TiC) possui elevada dureza, o que potencialmente permitiria a sua utilização como reforço em revestimentos antidesgaste aplicados em equipamentos das indústrias sucroalcooleira e mineradoras. Neste trabalho cavacos de ligas a base de titânio foram processados e utilizados como matéria prima para a fabricação de consumíveis experimentais de soldagem. Cordões de solda foram produzidos sobre amostras de aço-carbono por soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (tradução do termo inglês GTAW). A caracterização microestrutural do metal de solda foi realizada por MEV e difração de raios-X. O comportamento mecânico dos revestimentos foi analisado por meio de um ultramicrodurômetro digital. Verificou-se que a microestrutura do metal de solda era composta por partículas não prismáticas de alta dureza distribuídas em uma matriz ferrítica. Medidas feitas por microanálise EDS mostraram diferenças na concentração de titânio entre a matriz e as partículas duras, onde maiores teores deste elemento foram identificados. A análise cristalográfica confirmou que houve a formação de carbonetos de titânio envoltos por uma matriz de ferrita.

**Palavras-chave:** Revestimento duro; GTAW; Reciclagem de cavacos; Carboneto de titânio; Análise microestrutural.

## Recycling of Titanium Chips for Hardfacing

**Abstract:** Titanium element is a noble metal and owns excellent biomechanical properties. The necessity for utilization dental implants fabricated with titanium alloys have caused an increased in generation of residue as a result of fabricating processes. Aiming to reduce the environmental impact, alternative solutions for reutilization of these residues have been studied. Titanium carbide (TiC) has high hardness and can be applied as coating reinforcement against wear. In this work, chips of titanium cast were processed and used in the fabrication of experimental hardfacing consumables. Coatings were produced in cast steel specimens using the GTAW process. The microstructures were investigated by means of scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The mechanical behavior of the coatings was analyzed by a dynamic ultra-micro hardness tester. The microstructure of the welding metal was composed of particles non-prismatic and high hardness surrounded by a ferritic matrix. The measures made by electron dispersive spectroscopy (EDS) showed difference of the concentration of titanium trough the particle, where larger contents of titanium were found, and the matrix. The crystallographic analyses reinforced the formation of titanium carbides embedded in a ferrite matrix into welding metal.

**Key-words:** Hardfacing; GTAW; Chips recycling; Titanium carbide; Microstructure characterization.

## 1. Introdução

A formação de carbonetos metálicos tem sido uma das formas aplicadas no combate ao fenômeno do desgaste [1-5], sendo este um dos principais causadores de danos e falhas em peças e equipamentos industriais. Estima-se que cerca de 2% a 4% do PIB de um país industrializado seja destinado ao reparo de peças e equipamentos sujeitos aos danos causados pelo desgaste [1], se destacando o desgaste abrasivo, como a forma mais

<sup>a</sup> Contribuição técnica apresentada e integrante dos Anais do XL CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 2014, realizado em São Paulo, SP, Brasil, editado pela Associação Brasileira de Soldagem – ABS.



comum e mais agressiva [2]. Entre as principais características dos carbonetos metálicos se destacam a alta dureza, a estabilidade química e apresentam elevado ponto de fusão [6]. A deposição de revestimentos duros pode ser feita através de diversas técnicas [2,3], levando em consideração o mecanismo de desgaste atuante e a espessura da camada de reforço. A soldagem é uma técnica que mais tem sido utilizada na deposição de revestimentos duros em componentes sujeitos ao desgaste abrasivo, principalmente na utilização de metais de adição contendo cromo e carbono (Fe-Cr-C) para a formação de carbonetos de cromo (2150HV) [5-11]. Por outro lado, a literatura reporta que existem outros elementos que na forma de carbonetos, são capazes de apresentar propriedades de dureza semelhante ou superior ao carboneto de cromo, nos quais se destacam o vanádio (2900HV), tungstênio (2350HV), titânio (2800HV), entre outros [5,6]. Dizer que um material é duro não significa resistência ao desgaste, porém esta é a propriedade mais importante para os revestimentos duros e pode ser utilizada como um indicador de resistência à abrasão na comparação de diversos materiais [1]. Comercialmente, o cromo é mais viável por apresentar menor custo nos processos de fabricação de consumíveis de soldagem quando comparado aos demais elementos citados, o que favorece a sua utilização majoritária na deposição de revestimentos duros.

Diversas ligas de titânio, ASTM F67 (titânio puro) [12] e ASTM F136 (Ti6Al4V) [13], têm sido bastante utilizadas na fabricação de aparelhos ortodônticos. Geralmente essas peças são obtidas por processos de usinagem onde é gerado um volume elevado de resíduos (cavacos). A grande vantagem destas ligas é que elas são constituídas em sua grande parte do elemento titânio (mínimo de 90% em massa), tornando assim um grande atrativo no estudo e análise destes cavacos para aplicação em insumos para a formação de elementos resistentes ao desgaste e assim criando soluções alternativas para a reinserção destes resíduos na cadeia produtiva.

O objetivo deste trabalho é a aplicação de cavacos de titânio como insumos de soldagem no metal de adição para a formação de uma solda a base de carbonetos de titânio a partir da deposição da mistura contendo finos de cavacos das ligas de titânio e carbono (grafite em pó) sobre o metal de base e posteriormente fundidos por soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio, tradução do termo inglês *gas tungsten arc welding (GTAW)* conforme NBR 13043 [14]. A metodologia de deposição em forma de pré-camada (termo utilizado para definir a camada da mistura antes da soldagem) é uma continuidade dos estudos anteriores com a aplicação de cavacos, onde tal mistura era inserida em tubos de inox [15].

## 2. Materiais e Métodos

Para o presente estudo foram utilizados cavacos das ligas ASTM F136 e ASTM F67, cujas composições químicas nominais são indicadas na Tabela 1. Os cavacos foram submetidos a etapas de limpeza para remoção dos fluidos de corte utilizados nos processos de usinagem. Os cavacos foram deixados imersos em solução de água e detergente, conforme indicado na Tabela 2 e em seguida aplicou-se banhos ultrassônicos para uma limpeza mais apurada, sendo o segundo banho ultrassônico com a finalidade de enxague do material. Após a limpeza os cavacos foram deixados em estufa por pelo menos 24 horas.

Para alcançar a granulometria necessária, os cavacos foram moídos através de um dispositivo composto de duas partes metálicas com peças em granito: a haste, fixada no mandril e o porta-cavacos instalado na bancada de uma furadeira de coluna. O seu funcionamento se faz através do movimento rotativo e a pressão da haste contra os

**Tabela 1.** Composição química nominal das ligas de titânio [12,13].

Liga	Ti	Al	V	Outros elementos
F-67	Bal.	-	-	0,5-0,9
F-136	Bal.	5,60-6,40	3,85-4,15	0,5-0,8

**Tabela 2.** Procedimento de limpeza dos cavacos de titânio.

Etapas	Água [l]	Detergente [ml]	Tempo mínimo
1º Imersão	10,0	400	24 h
2º Imersão	10,0	400	1 h
1º B. Ultrassônico	0,5	20	5 min
2º B. Ultrassônico	0,5	-	3 min

cavacos dentro da “câmara de moagem”, Figura 1. Este dispositivo foi fabricado durante o desenvolvimento deste trabalho se mostrando mais eficiente, principalmente pela adição das peças em granito, quando comparado ao anterior, composto somente de partes metálicas [15]. Os finos obtidos na moagem foram classificados de acordo com a granulometria, utilizando uma peneira com grana de 40 mesh (0,42 mm), onde os finos que passavam pela peneira foram utilizados na formação da mistura. O material retido na peneira foi submetido a novas operações de moagem.

Pré-camada foi o termo utilizado para definir a mistura dos elementos químicos sobre o metal de adição antes do processo de soldagem. A proporção de cavacos de titânio e carbono (grafite) corresponde conforme a estequiometria TiC, ou seja, o grafite e os cavacos foram combinados no raio molar ( $m_{Ti} : m_{C} = 1:1$ ). Houve acréscimo de 10% da massa do carbono em relação à estequiometria para favorecer que todo o titânio disponível forme carbonetos durante a reação química e cobrir eventuais perdas. Assim a proporção em massa,  $m_{cavacos\ de\ titânio} / m_{grafite}$  ficou definida em 10:3 para ambas as ligas. Houve uma adição de 2% em massa de silicato de sódio e pequenas adições de água destilada para promover a vitrificação da mistura após a eliminação da umidade. A Tabela 3 apresenta a composição química nominal da pré-camada.

Como metal de base foi utilizado barras de aço ASTM A-36 nas dimensões de 76,2 mm × 28 mm × 10 mm, previamente lixadas para remoção da camada oxidada e limpas com álcool etílico. Com utilização de um molde (Figura 2a), a mistura foi depositada sobre a superfície do metal de base formando uma saliência nas dimensões de 76,2 mm × 6 mm × 2,5 mm. Durante a soldagem, entre as amostras foram utilizadas duas barras chatas na espessura de 12,7 mm para abertura e fechamento do arco elétrico fora da pré-camada (Figura 2b).

Foi utilizada uma fonte de energia para o processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (GTAW) da marca LINCOLN ELECTRIC modelo “PRECISION TIG” 225, equipada com um trator de soldagem da marca WHITE MARTINS, modelo MC 46, para fixação da tocha (Figura 2c). Os parâmetros de soldagem utilizados como referência foram definidos a partir de consultas a trabalhos de diversos autores [16-19] adaptados aos parâmetros dos equipamentos disponíveis para o desenvolvimento deste trabalho, e assim vários testes foram feitos até atingir um perfil de cordão de solda satisfatório para o corte das amostras, indicados na Tabela 4.

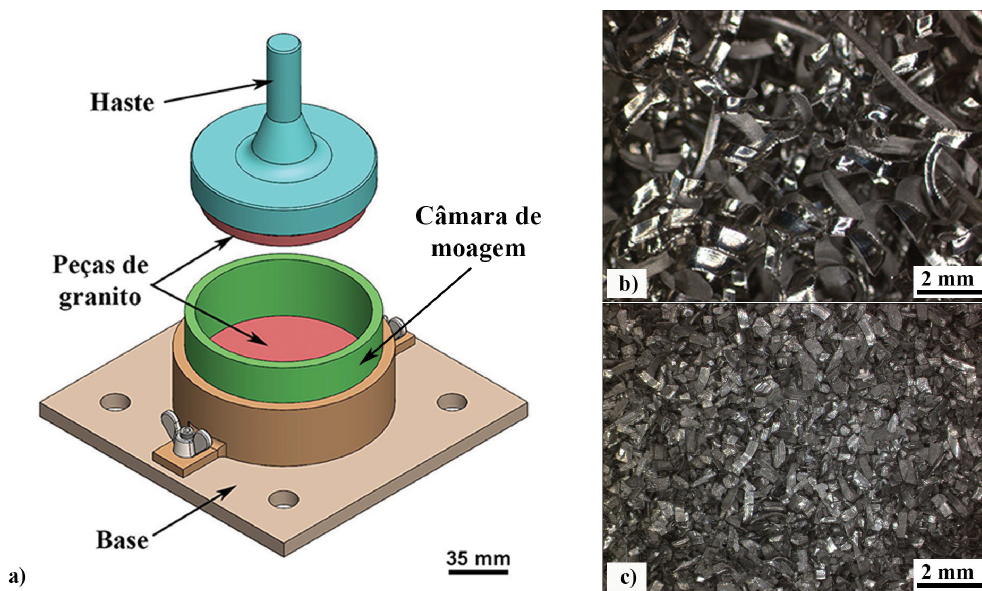
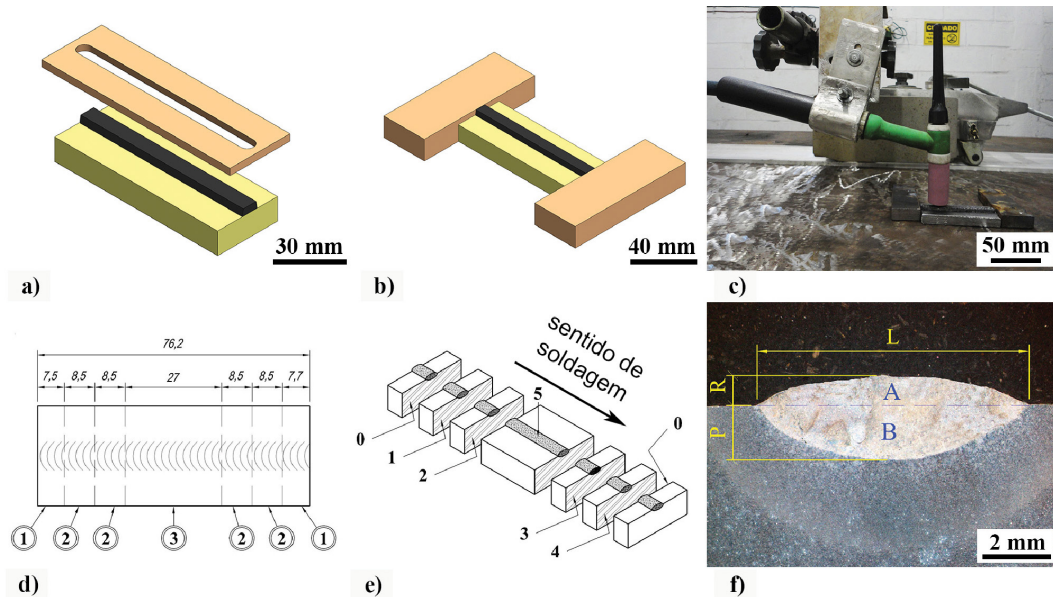


Figura 1. a) Dispositivo de metálico de moagem dos cavacos. b) Cavacos após usinagem. c) Cavacos moídos e peneirados (40 mesh).

Tabela 3. Composição química nominal da pré-camada (% massa).

Liga	Ti	C	Al	V	Outros elementos
F-67	Bal.	22,6	-	-	2,5
F-136	Bal.	22,6	4,5	3,0	2,4



**Figura 2.** a) Fabricação da pré-camada. b) Complementos para início e fim do arco elétrico. c) Esquema de montagem da tocha no carrinho. d) Esquema de corte das seções: 1. Descarte, 2. Análise microestrutural e microdureza, 3. Difração de raios-X. e) Indicação da seção de análise. f) Geometria do cordão de solda.

**Tabela 4.** Parâmetros de soldagem selecionados.

	<b>Corrente [A]</b>	<b>215-230</b>
Tensão [V]		27-29
Velocidade soldagem [mm/min]		100 ± 3
Vazão Argônio [l/min]		12-15
Eletrodo		W-Th (2%)
Polaridade		DCSP

As amostras foram retiradas em diferentes partes do cordão de solda (Figura 2d) e identificadas como P1, P2, P3, P4 e P5 para o revestimento a base de cavacos da liga ASTM F67 e como L1, L2, L3, L4 e L5 para os revestimentos a base de cavacos da liga ASTM F136. A Figura 2e indica a seção de análise das amostras conforme a identificação. As amostras P5 e L5 foram preparadas para análises com difração de raios-X.

As amostras foram embutidas em baquelite. O lixamento foi feito a partir de lixa de grana 120 e sequencialmente 220, 320, 400, 600 e 1200 com movimentos alternados de 90° para cada troca de lixa. Foi aplicado um polimento com alumina de 1,0 µm e 0,3µm. O ataque químico para revelação da microestrutura foi feito com NITAL 2%. Banhos ultrassônicos foram aplicados antes e durante a operação do polimento, na troca da granulometria da alumina e também após o ataque químico para eliminar a retenção do reagente dentro dos poros do cordão.

As macrografias foram feitas em um estereomicroscópio da marca ZEISS, modelo DISCOVERY V.8. Com estas imagens se fez a análise da geometria do cordão de solda assim como a zona afetada termicamente (ZAT) e o cálculo da taxa diluição ( $\delta$ ) que define o percentual da massa do metal base que se une ao metal de adição (Figura 2f), onde são consideradas a área do reforço (A) e a área da penetração (B) [2,20-22] conforme a Equação 1.

$$\delta = \left( \frac{B}{A+B} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

A microestrutura foi examinada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), através das imagens obtidas nas regiões conforme apresentadas na Figura 3. A fase dos revestimentos foi realizada por difração de raios-X (DRX) usando um difratômetro SIEMENS DL-5005 equipado com tubo de cobre (Cu K $\alpha$  = 1,5405Å) e monocromador de grafite. A intensidade difratada pelas amostras foi registrada no intervalo entre 20 a 100°, varrida com velocidade

de 2° por minuto. A identificação das fases foi baseada nas fichas cristalográficas CIF, as quais foram consultadas no banco de dados do *Inorganic Crystal Structure Database* [23]. Por meio de um ultramicrodurômetro digital da marca SHIMADZU, modelo DUH 211S, foram determinadas medidas equivalentes de microdureza Vickers HV\*, conforme estabelecido na norma ISO 14577-1 [24]. A medida HV\* é determinada a partir da dureza sob carregamento máximo e considerando o indentador Vickers com geometria ideal. A carga máxima utilizada para os ensaios foi de 1N (HV0,1), mantida durante 5 segundos. Para levantamento da variação de microdureza nos cordões de solda, as medidas foram feitas com um espaçamento de 0,2 mm, até atingirem o metal base. Para fins estatísticos o cálculo da média foi baseado numa série de quatro medições.

Todo o procedimento de materiais e métodos pode ser resumido conforme fluxograma representado na Figura 4.

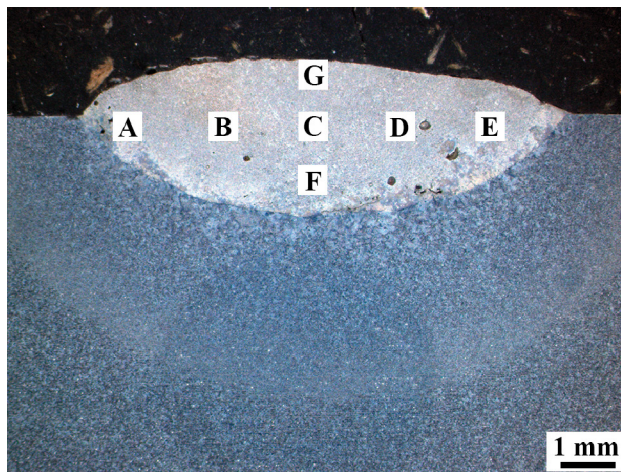


Figura 3. Regiões dos cordões para caracterização microestrutural da estrutura formada na solda.

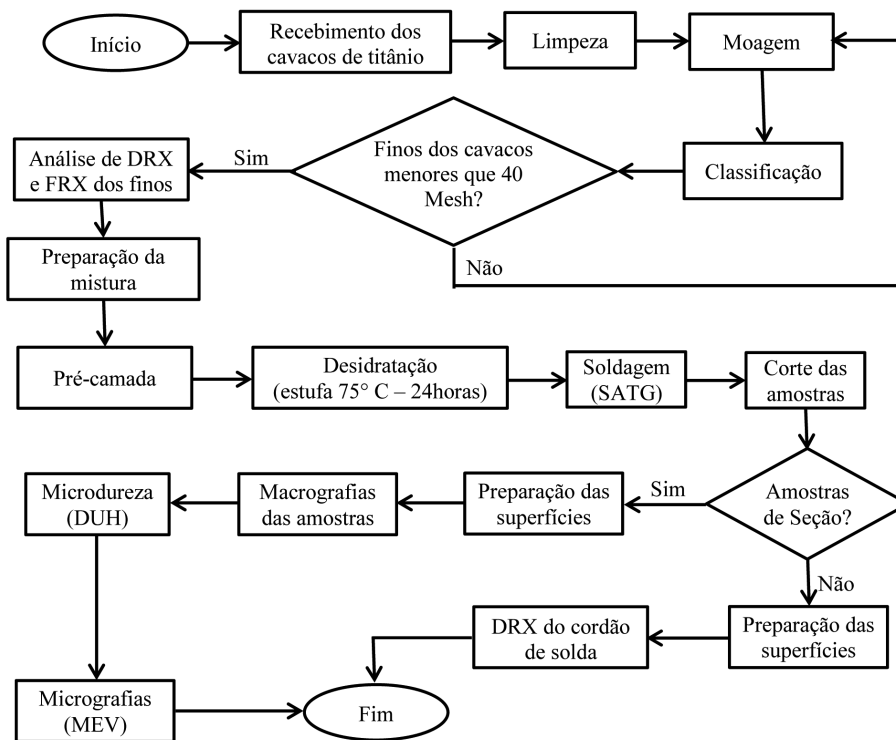


Figura 4. Fluxograma do procedimento adotado em materiais e métodos.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Geometria do cordão de solda

A Figura 5 apresenta imagens macrográficas das amostras. Pode se observar algumas descontinuidades no cordão tais como porosidades, falta de fusão e trincas na linha de solda com o metal de base. Trincas surgiram como consequência da alta corrente (230A) e a alta taxa de resfriamento durante a solidificação da poça de fusão [25]. Os testes experimentais em cordões depositados com correntes mais baixas formaram soldas com má qualidade, não possibilitando a formação de amostras. A corrente elétrica é um dos parâmetros de maior significância na soldagem afetando a geometria do cordão de solda, penetração e consequentemente a taxa de diluição [26], o gráfico representado pela Figura 6a mostra que os valores da taxa de diluição foram superiores a 55%, muito acima dos índices de 10% a 20% recomendados pela literatura para a soldagem de revestimentos duros para o processo GTAW [27,28]. Também é possível observar a variação da diluição ao longo de cada seção dos cordões de solda. A elevada taxa de diluição do metal base com o metal de solda afeta as propriedades do revestimento reduzindo a quantidade de partículas duras, determinadas pelo metal de adição (TiC) e promovendo durezas mais baixas pelo fato da solda apresentar maior influência do metal de base (aço carbono) ao invés do metal de adição (TiC) [21,22,29].

A Figura 6b mostra a variação ZTA ao longo do cordão de solda. A ZTA é afetada pelo ciclo térmico da soldagem. No início da solda, a chapa (metal base) se encontrava em temperatura ambiente e a espessura da chapa, ou sua massa, foi pequena para dissipar o calor gerado durante a soldagem, determinando o aumento da profundidade da ZTA na solda, mesmo que submetida a mesma corrente de soldagem.

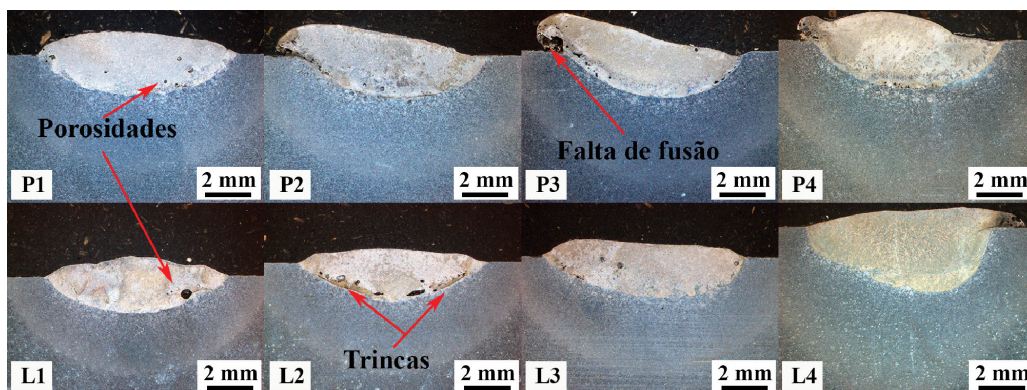


Figura 5. Macrografias das seções analisadas. Ataque com NITAL 2%.

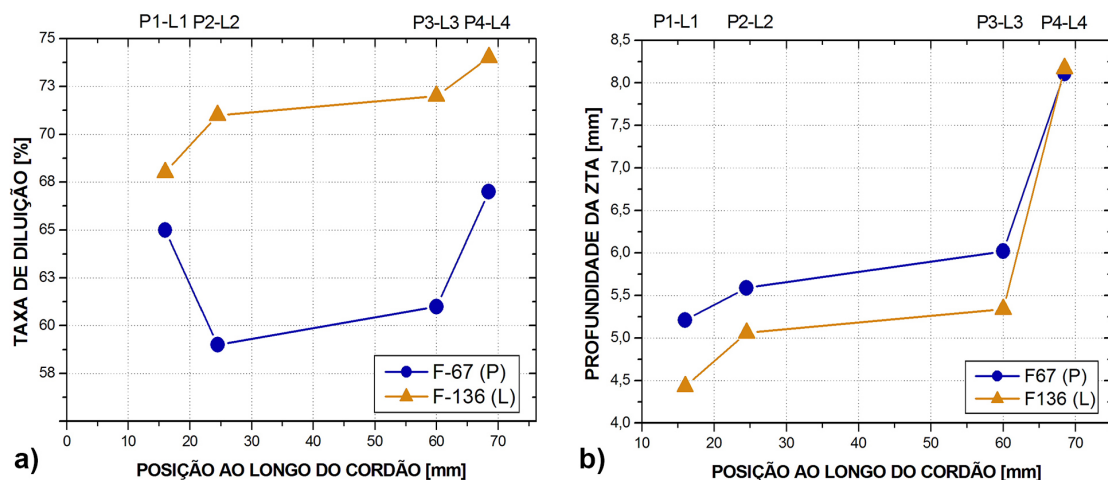
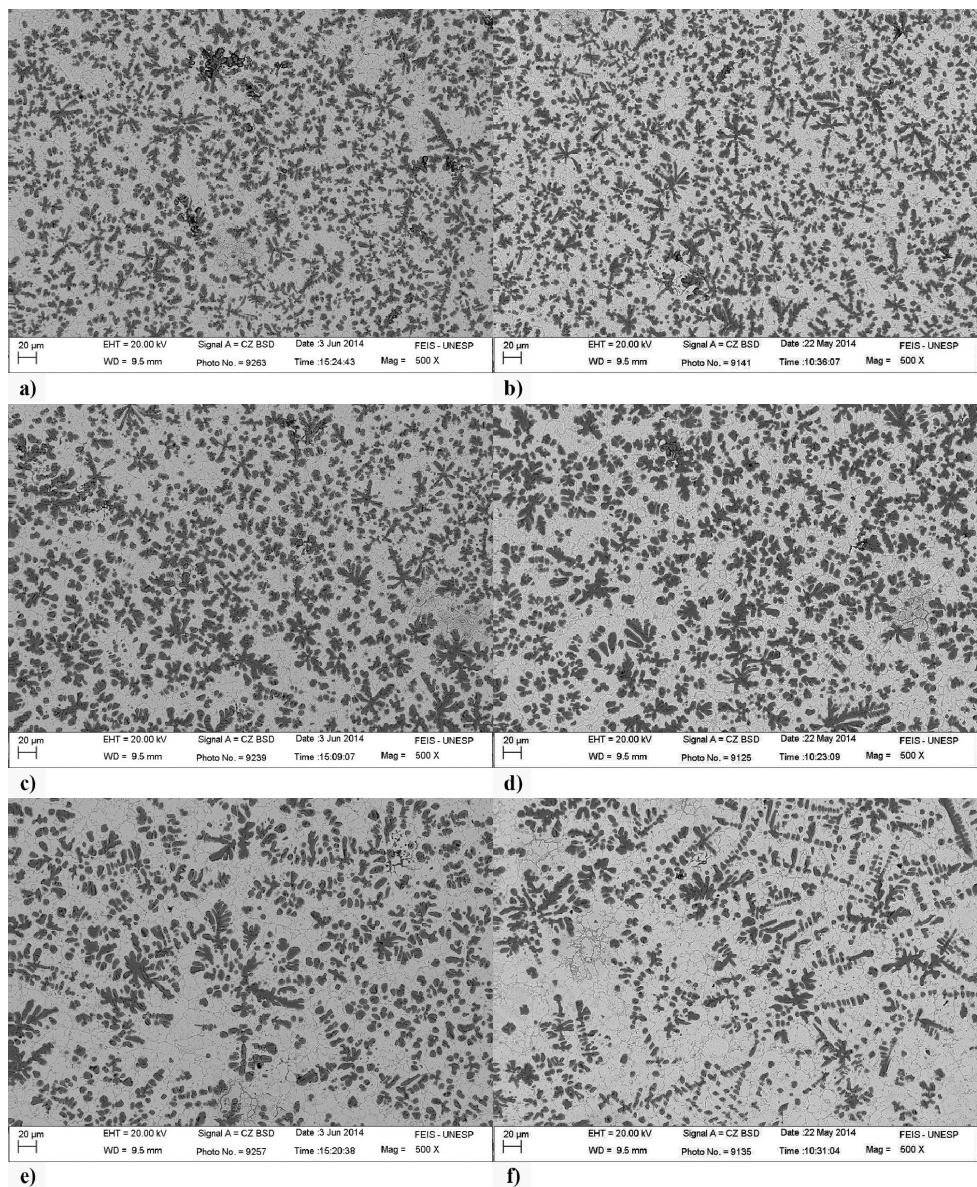


Figura 6. a) Taxa de diluição nas seções ao longo do revestimento. b) Variação da profundidade da ZTA ao longo do comprimento do cordão.

### 3.2. Análise microestrutural

A Figura 7 apresenta a microestrutura do revestimento em três regiões diferentes: superfície G, centro C e linha de solda F, conforme esquema indicado na Figura 3. Observa-se que as partículas de TiC apresentam a forma dendrítica e estão separadas uma das outras ao longo da matriz de ferrita e apresentando uma menor evidência nas regiões próximas a linha de solda. À medida que se aproxima para o centro do revestimento, nota-se um crescimento no tamanho dos carbonetos, conforme também observado por Lima et al. [22] onde se analisou a formação de carbonetos de cromo [22]. Durante a soldagem, o metal de base atua como um cadinho suportando a poça de fusão. Nessas regiões a solidificação do metal líquido é mais acelerada quando comparada as demais zonas da poça de fusão, assim a reação foi interrompida quando a temperatura atingiu valores onde a formação de carboneto não é mais possível. Enquanto isso na região central da poça de fusão onde o resfriamento é mais lento a reação do carbono com o titânio acontece por um intervalo de tempo maior, favorecendo a formação de partículas mais grosseiras de carbonetos.

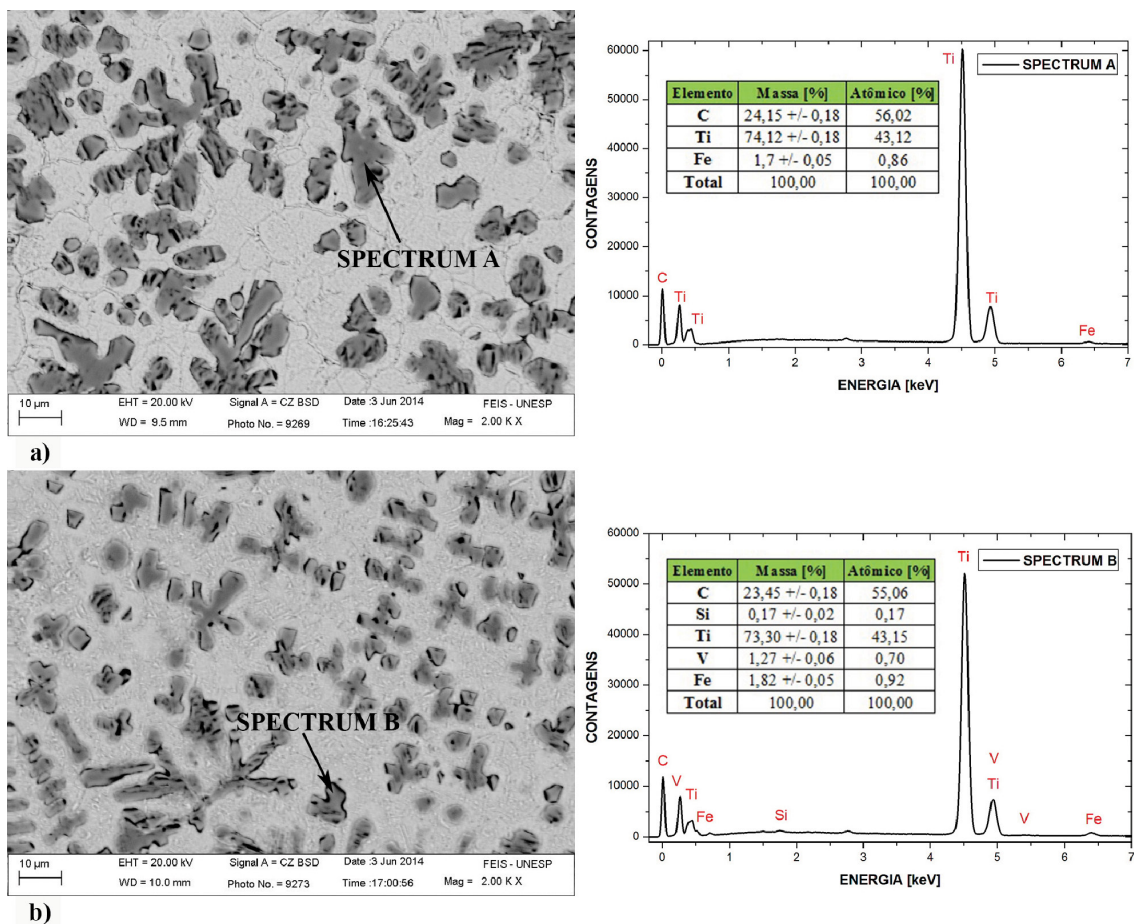


**Figura 7.** Microestrutura dos revestimentos – MEV – 150X. a) Região G - amostra P1 (F67) 150X. b) Região G - amostra L1 (F136). c) Região C - amostra P1 (F67). d) Região C - amostra L1 (F136). e) Região F – amostra P1 (F67). f) Região F – amostra L1 (F136).

Nota-se que formação de TiC ficaram evidentes em ambos os cordões formados a partir das ligas de cavacos (F136 e F67). A porcentagem volumétrica de carbonetos (PVC) foi determinada através do software *ImageJ* [30]. Áreas menores que  $5 \mu\text{m}^2$  foram desconsideradas. A PVC foi obtida a partir da medição da área ocupada pelos carbonetos em oito regiões nas amostras. Para ambas as ligas, a PVC média foi de  $37,2\% \pm 3\%$ . No centro dos cordões foram encontradas PVC mais altas como consequência da velocidade mais lenta de resfriamento nesta região da solda. As menores PVC foram encontradas próximas à linha de solda, onde o valor médio encontrado foi de  $26,7\% \pm 7\%$ . A baixa PVC no cordão em torno da linha de solda pode ser explicada pelo fato de que em tais regiões o efeito da diluição do metal de base na solda é maior, resultando em uma estrutura carente com as fases formadas pelo metal de adição. Considerando a faixa de variação entre os valores da PVC, os resultados foram semelhantes aos obtidos por Xinhong et al. [16] onde os valores ficaram entre 25,4% a 31,6%.

A composição química das partículas foi determinada por EDS (MEV). Na Figura 8 são mostrados exemplos onde se verificou uma razão atômica Ti : C próxima a 1, como seria esperado para os carbonetos de titânio com estequiometria TiC. Observa-se no espectro do carboneto formado com a liga F-136 (Figura 8b) a presença do vanádio onde possivelmente este elemento esteja em solução com o titânio.

Técnicas de difração de raios-X foram aplicadas aos cavacos de titânio, após a moagem (40 mesh) e aos cordões de solda nas amostras identificadas como P5 e L5. Nota-se a presença de titânio com estrutura cristalina hexagonal como fase predominante nos cavacos das ligas utilizadas. No difratograma do cordão de solda as fases predominantes são TiC e ferrita (ferro cúbico de corpo centrado) indicando efetivamente a formação de carbonetos de titânio em ambas as ligas (Figura 9).



**Figura 8.** Microanálise (EDS) de carbonetos identificados em imagens MEV com contraste por elétrons retroespalhados (BSD). a) Cordão de solda a base de cavacos da liga F67 na amostra P5. b) Cordão de solda a base de cavacos da liga F136 na amostra L5.



### 3.3. Variação de microdureza no cordão de solda

Os gráficos apresentados pela Figura 10 apresentam os resultados dos ensaios de microdurezas realizados ao longo da profundidade da solda partindo da superfície até atingir o metal de base. Conforme esperado houve um aumento considerável na dureza superficial das amostras, especialmente para o revestimento com insumos da liga F67 onde a quantidade de titânio é maior. A variação da dureza apresentada no revestimento foi resultado

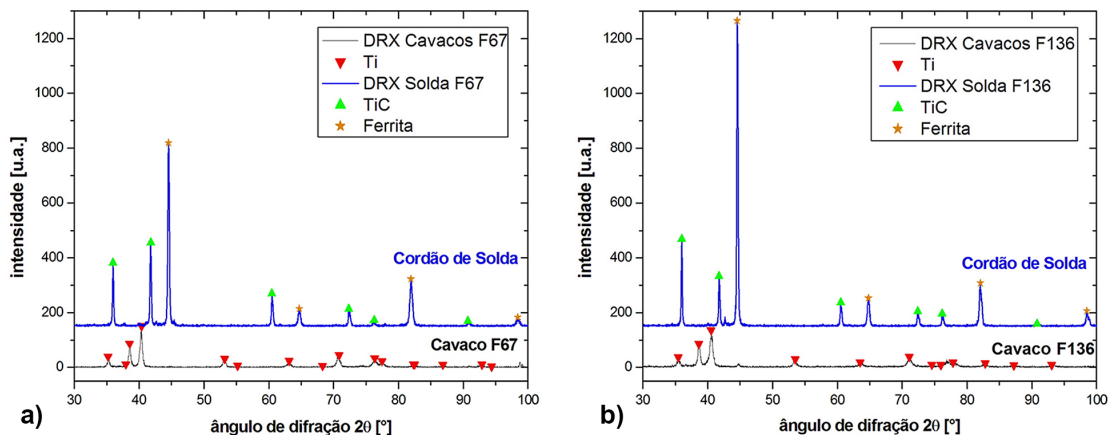


Figura 9. Difração de raios-X dos cavacos e do cordão de solda. a) F67 - amostra P5. b) F136 - amostra L5.

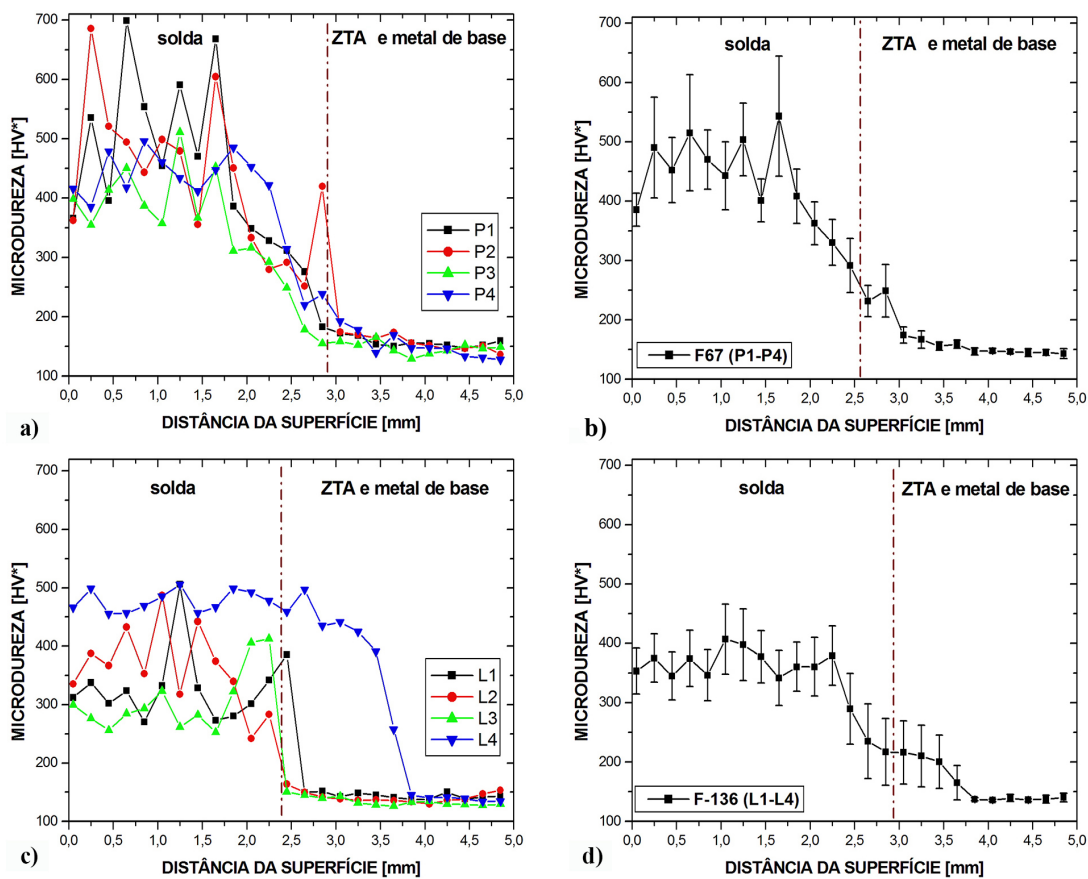
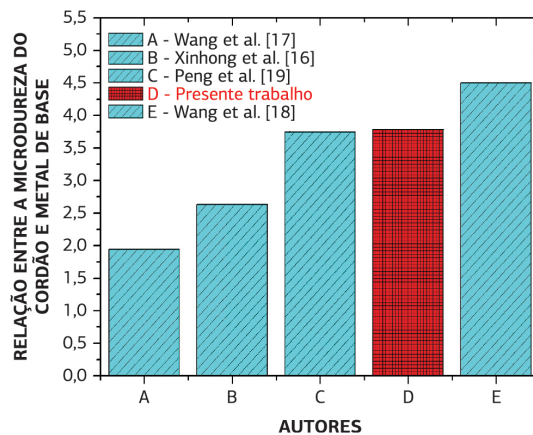


Figura 10. Medidas da microdureza partindo da superfície do cordão ao metal base. a) Microdureza das amostras P1-P4. b) Média das curvas mostradas na Figura 8a. c) Microdureza das amostras L1-L4. d) Média das curvas mostradas na Figura 8c.



**Figura 11.** Relação entre a microdureza do cordão com o metal de base [[Q2]].

da região onde o indentador penetrou na amostra. Quando atingia regiões com grande concentração de TiC os valores foram superiores aqueles de regiões pobres (matriz). Regiões de alto volume de partículas grosseiras de carbonetos apresentam maior resistência à penetração [29].

Comparando os valores da taxa de diluição (Figura 6a) com os valores de microdureza apresentado pelos gráficos da Figura 10, com exceção da amostra L4, as amostras com diluições menores apresentaram microdureza superior. As curvas apresentaram valores aproximados para amostras com diluições diferentes. Cada curva foi obtida através do cálculo da média do levantamento de quatro medições (gráficos à esquerda) e por fim calculou-se a média geral de todas as curvas indicando a variação da dureza para o revestimento como um todo, de acordo com a liga utilizada (gráfico à direita). Como cada amostra apresentou diferentes medidas de penetrações do revestimento, o patamar da zona tratada termicamente (ZTA) indicada nos gráficos foi estimado através da profundidade média do cordão de solda. Com os resultados obtidos nos ensaios de microdureza, é possível fazer uma comparação entre o máximo valor obtido no cordão e no metal de base, com trabalhos reportados pela literatura onde a técnica de deposição da solda foi semelhante a este trabalho, Figura 11 [16-19]. A comparação entre a relação do aumento da dureza na solda com o metal de base nos revestimentos depositados a partir dos cavacos de titânio se mostraram satisfatórios.

#### 4. Conclusões

O reaproveitamento de cavacos de ligas de titânio para a formação de partículas duras no metal de solda foi bem sucedido. As amostras apresentaram taxas de diluição superiores às normalmente esperadas para revestimentos duros. A ZTA aumentou ao longo cordão de solda devido à influência do ciclo térmico durante a soldagem, em razão da baixa massa do metal de base. A caracterização microestrutural confirmou que o metal de solda era composto por carbonetos de titânio primários grosseiros, envoltos por uma matriz ferrítica complexa. A fração volumétrica dos carbonetos de titânio formados foi significativa e resultou em incrementos de dureza Vickers similares ou superiores a outros trabalhos reportados na literatura. As variações de dureza observadas foram associadas à dispersão heterogênea das partículas no metal de solda. Os cordões de solda preparados a partir dos cavacos da liga ASTM F67 (titânio puro) apresentaram níveis de dureza superior àqueles formados com a liga ASTM F136 (Ti6Al4V) em virtude da sua maior concentração de titânio.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar pelo apoio na caracterização microestrutural, à Implalife Biotecnologia (Jales-SP) [31] pelos cavacos de titânio e as bolsas concedidas pelo CNPq (J.G.F.J. e J.G.) durante o desenvolvimento deste trabalho.

## Referências

- [1] Gahr K-HZ. Microstructure and wear of materials. Amsterdam: Elsevier; 1987. (Tribology Series, v. 10).
- [2] Mellor BG. Surface coatings for protection against wear. Boca Raton: CRC Press LLC; 2006.
- [3] Bulloch JH, Henderson JL. Some considerations of wear and hardfacing materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1991;46(3):251-267. [http://dx.doi.org/10.1016/0308-0161\(91\)90073-B](http://dx.doi.org/10.1016/0308-0161(91)90073-B).
- [4] Bayer RG. Mechanical wear fundamentals and testing. 2. ed. New York: Marcel Dekker; 2004.
- [5] Holleck H. Material selection for hard coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology. A, Vacuum, Surfaces, and Films*. 1986;4(6):2661-2669. <http://dx.doi.org/10.1116/1.573700>.
- [6] Pierson HO. Handbook of refractory carbides and nitrides. New Jersey: Noyes Publications; 1996.
- [7] Svensson LE, Grefott B, Ulander B, Bhadeshia HKDH. Fe-Cr-C hardfacing alloys for high-temperature applications. *Journal of Materials Science*. 1986;21(3):1015-1019. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01117388>.
- [8] Atamert S, Bhadeshia HKDH. Microstructure and stability of Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Materials Science and Engineering A*. 1990;130(1):101-111. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093\(90\)90085-H](http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093(90)90085-H).
- [9] Lu L, Soda H, McLean A. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-C eutectic composites. *Materials Science and Engineering A*. 2003;347(1-2):214-222. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00588-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00588-9).
- [10] Chang C-M, Chen Y-C, Wu W. Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy. *Tribology International*. 2010;43(5-6):929-934. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.045>.
- [11] Kenchireddy KM, Jayadev CT. Study on abrasive wear characteristics of Fe-Cr-C hardfacing alloy and effect of welding parameters. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technonlogy*. 2014;3(5):6-13.
- [12] ASTM International. ASTM F67-06: Standard specification for unalloyed titanium, for surgical implant applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700). West Conshohocken: ASTM; 2006. p. 1-5.
- [13] ASTM International. ASTM F136-02a: Standard specification for wrought Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) alloy for surgical implant applications (UNS R56401). West Conshohocken: ASTM; 2002. p. 1-4.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 13043: 1993. Soldagem: números e nomes de processos – Padronização. Rio de Janeiro: ABNT; 1993. 8 p.
- [15] Fagundes JG Jr, Manera RS, Tokimatsu RC, Ventrella VA, Gallego J. Aplicação de cavacos de titânio para produção de revestimentos resistentes ao desgaste. *Inspeção & Soldagem*. 2014;19(3):264-270. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/S1903.09>.
- [16] Xinhong W, Zengda Z, Sili S, Shiyao Q. Microstructure and wear properties of in situ TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding. *Wear*. 2005;260(1-2):705-710.
- [17] Wang XH, Song SL, Zou ZD, Qu SY. Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process. *Materials Science and Engineering A*. 2006;441(1-2):60-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.015>.
- [18] Wang Z-T, Zhou X-H, Zhao G-G. Microstructure and formation mechanism of in-situ TiC-TiB<sub>2</sub>/Fe composite coating. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008;18(4):831-835. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60144-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60144-2).
- [19] Peng D-X, Kang Y, Li Z-X, Chang S-Y. Wear behavior of ceramic powder clad on carbon steel surface by gas tungsten arc welding. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2013;65(2):129-134. <http://dx.doi.org/10.1108/00368791311303492>.
- [20] Ribeiro PPG, Assunção PDC, Santos EBF, Braga EM. Influência dos parâmetros de soldagem GMAW e GMAW-CW sobre a diluição e relação reforço/largura na recuperação de zonas erodidas aplicadas na indústria naval. In: Libro de Ponencias y Conferencias del XXIII Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Costa Afuera e Ingeniería Portuaria COPINAVAL 2013; 2013 Setembro 30 à Outubro 04; Isla de Margarita, Venezuela. Isla de Margarita: IPIN; 2013. p. 299-310.
- [21] Colaço FHG, Maranhão O. Avaliação da perda de massa de revestimento duro depositado por soldagem com arame tubular de liga FeCr-Ti. *Soldagem & Inspeção*. 2014;19(1):58-68. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242014000100008>.
- [22] Lima AC, Ferraresi VA, Gonçalves RA. Avaliação de resistência ao desgaste de revestimentos duros aplicados com arames tubulares de liga de ferro-cromo-carbono. In: Anais do VIII Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica; 2007 Outubro 23-25; Cusco, Peru. Cusco: CIBIM8; 2007. 8 p.
- [23] Inorganic Crystal Structure Database – ICSD [página da internet]. 2014 [acesso em 23 fev. 2014]. Disponível em: <https://icsd.fiz-karlsruhe.de/search/>.
- [24] International Organization for Standardization – ISO. ISO 14577-1. Metallic materials: instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method. Geneva: ISO; 2002. p. 1-25.
- [25] Solomon HD. Fundamentals of weld solidification. In: Lienert TJ, Babu SS, Siewert TA, Acoff VL, editors. *ASM Handbook Volume 6A: welding fundamentals and processes*. Materials Park: ASM International; 1993. p. 110-137.
- [26] Ogborn JS. Submerged arc welding. In: Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR, editors. *ASM Handbook Volume 6: welding, brazing, and soldering*. New York: ASM International; 1993. p. 638-641.
- [27] Jeffus L. *Welding: principles and applications*. 7. ed. New York: Delmar; 2012.
- [28] Davis JR. Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining. In: Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR, editors. *ASM Handbook Volume 6: welding, brazing, and soldering*. New York: ASM International; 1993. p. 1967-2000.
- [29] Buchely MF, Gutierrez JC, León LM, Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*. 2005;259(1-6):52-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>.
- [30] National Institutes of Health. ImageJ: Image Processing and Analysis in Java [página da internet]. 2004 [acesso em 25 maio 2014]. Disponível em: <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>.
- [31] Implalife Biotecnologia [página da internet]. 2014 [25 maio 2014]. Disponível em: <http://www.implalife.com.br/>.