



PRODUÇÃO DE CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM RESISTENTES AO DESGASTE COM FLUXO DERIVADO DO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE TITÂNIO E INSERTOS DE METAL DURO À BASE DE WC

Vieira, P.C.¹ – poliane.vieira@unesp.br
Fagundes Júnior, J. G.¹ – gedael.fagundes@unesp.br
Firmo, L. K. M.¹ – leticia.firmo@unesp.br
Ventrella, V. A.¹ – vicente.ventrella@unesp.br
Arias, A. R.² – ariela@demec.ufmg.br
Gallego, J.¹ – juno.gallego@unesp.br

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Grupo de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais e Processos Tecnológicos (MaProTec). Av. Brasil, 56, Ilha Solteira - SP, 15385-007.

²Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901.

RESUMO

O desgaste abrasivo é o tipo mais comum e agressivo de desgaste em sistemas tribológicos, causando danos significativos e falhas em componentes industriais, o que gera altos custos de manutenção e substituição. A técnica de deposição de revestimento duro por soldagem (*hardfacing*) é eficaz na mitigação desse problema, reduzindo custos e o tempo de manutenção. Entre os carbonetos usados nos revestimentos duros, destacam-se o carboneto de tungstênio (WC) e o carboneto de titânio (TiC) por sua alta resistência ao desgaste. A pesquisa investigou o uso de pastilhas de metal duro e cavacos de titânio reciclados como fontes de carbonetos em soldagem. Os resultados indicaram que a soldagem pelo processo GTAW resultou na formação de TiC e WC em uma matriz ferrítica, com aumento da dureza na área soldada. A reciclagem desses materiais demonstrou ser uma alternativa sustentável e eficaz na produção de revestimentos duros.

Palavras-chave: desgaste abrasivo, GTAW, revestimento duro, sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

O fenômeno do desgaste é um processo inevitável que resulta em danos e falhas em componentes e estruturas, sendo particularmente relevante em contextos industriais. Entre os mecanismos de desgaste, o desgaste abrasivo se destaca como o mais severo e comum, caracterizado pela remoção de material devido ao riscamento

superficial (1,2). Os custos associados ao controle e à manutenção contra esses mecanismos, bem como à substituição de peças afetadas, são substanciais, com impactos especialmente significativos nos setores de siderurgia, mineração e agricultura, onde há uma intensa manipulação de partículas de materiais como minerais, matérias-primas e impurezas (3). Esse cenário enfatiza a importância e o interesse da indústria em estudos voltados à mitigação e ao combate dos efeitos do desgaste.

Uma alternativa eficaz para o combate ao desgaste abrasivo é a aplicação de revestimento duro (*hardfacing*), que consiste em um processo de usinagem no qual um material de maior dureza é adicionado ao metal de base por meio de um método de soldagem (4). Esta técnica de baixo custo para deposição de material sobre superfícies é capaz de prolongar a vida útil de estruturas ou componentes, economizando até 80% dos custos em relação ao uso de ligas metálicas, além de reduzir o tempo de paradas para manutenção (4,5). Dessa forma, estudos que investigam o combate ao desgaste através do uso de revestimentos duros têm mostrado resultados significativos, com particular ênfase no uso da soldagem *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)* (4,6,7,8,9).

Dentre os materiais utilizados para revestimentos duros, os carbonetos de titânio (TiC) e de tungstênio (WC) se destacam devido à sua elevada dureza, alta resistência e rigidez, elevado ponto de fusão, estabilidade química e resistência ao desgaste (10). Quando aplicados como revestimento, esses carbonetos auxiliam na redução do desgaste, prevenindo a fadiga superficial e a oxidação por atrito. Isso permite a utilização de aços de menor custo em substituição a aços com propriedades superiores, mas de elevado valor de aquisição. Além disso, esses carbonetos podem ser combinados para potencializar as propriedades do revestimento, especialmente a resistência ao desgaste, oferecendo uma solução mais econômica em comparação com outras técnicas.

As pastilhas de metal duro são ricas em carboneto de tungstênio, enquanto os cavacos de ligas de titânio, derivados de implantes odontológicos, constituem uma fonte de titânio de baixo custo. Contudo, esses materiais frequentemente não são reaproveitados de maneira eficiente, o que representa um desafio em termos de custos de descarte. Dada a relevância das propriedades desses carbonetos e a importância da economia circular, esses materiais podem ser empregados como fluxos de soldagem na geração de superfícies resistentes ao desgaste abrasivo, o que

configura a proposta deste trabalho. Ressalta-se que a reciclagem de resíduos metálicos por meio da aplicação de revestimentos duros também se apresenta como uma solução para a escassez de recursos minerais, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, caracterizando-se como uma proposta de desenvolvimento tecnológico sustentável.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a utilização de pó de cavacos de ligas de titânio e de pastilhas de metal duro ricas em carboneto de tungstênio como fluxo de soldagem para a aplicação de revestimento duro resistente ao desgaste abrasivo, utilizando o processo de soldagem *GTAW*. Foram estabelecidas duas condições experimentais distintas: uma envolvendo o uso exclusivo de metal duro (MD) e outra caracterizada pela combinação de metal duro e carboneto de titânio (MD-Ti-C). A partir dessas condições, foi realizada uma avaliação abrangente das propriedades mecânicas, metalúrgicas e estruturais da solda obtida.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizados como fluxo de soldagem os insertos de metal duro e cavacos de titânio, ambos disponíveis na forma de pó, com granulometria inferior a 40 Mesh (0,42 mm). Os cavacos de titânio foram obtidos a partir da usinagem de ligas de titânio da classe ASTM F136 (Ti-6Al-4V), fornecidos pela Neodent, o metal duro, por sua vez, foi disponibilizado pela DURUM do Brasil.

Dado que a liga de titânio ASTM F136, ao contrário do carboneto de tungstênio proveniente dos insertos de metal duro, não contém quantidades suficientes de carbono para a formação dos carbonetos de titânio, foi necessária a adição de carbono na forma de grafite, material disponibilizado pela CADIMINAS. Assim, foi realizado um cálculo estequiométrico para a liga, com o objetivo de determinar a quantidade adequada de carbono a ser incorporada na mistura, levando em consideração as diferentes composições dos materiais. Cabe destacar que, devido à presença de titânio e vanádio na liga F136, que atuam como formadores de carbonetos metálicos na forma MC, essas variáveis foram incorporadas nos cálculos estequiométricos (10) (Tabela 1). Considerando uma massa inicial de 10 g de cavacos de titânio e com o objetivo de favorecer a formação dos carbonetos de titânio sem perdas significativas, bem como assegurar que o titânio na mistura se encontrasse predominantemente na

forma de carboneto, a proporção entre a massa de cavacos de Ti e a massa de carbono a ser considerada foi de aproximadamente 10:3 para a liga.

Tabela 1. Composição química nominal da liga de titânio ASTM F136 (% peso).

| Ti | Al | V | Demais elementos |
|------|-----|-----|------------------|
| 89,5 | 6,0 | 4,0 | 0,5 |

Fonte: Norma ASTM F136 (2013) (11).

Para as condições de mistura, foram adotadas as seguintes composições: 100% MD; e uma combinação de aproximadamente 50% TiC e 50% MD. Silicato de sódio (Na_2SiO_3) foi adicionado em uma proporção de 3% em relação à massa total da mistura, com o objetivo de melhorar a adesão ao substrato (8).

O material utilizado como metal de base foi o aço SAE 1020 em barras com dimensões aproximadas de 6 mm x 25 mm x 65 mm. Antes da deposição da mistura, as peças foram esmerilhadas e, em seguida, limpas com álcool etílico. A aplicação da mistura sobre a superfície do metal de base foi realizada com o auxílio de um gabarito, que consistia em uma chapa usinada com um canal de 6 mm x 60 mm e 3 mm de espessura. Após o preenchimento do canal com a mistura, o gabarito foi removido e o metal de base com a mistura depositada foi colocado em uma estufa a uma temperatura média de 75°C por 24 horas antes do início do processo de soldagem.

A fonte de soldagem utilizada foi fabricada pela BALMER, modelo MaxxiTIG 300P AC/DC, empregada no processo de soldagem GTAW. Os parâmetros de soldagem foram definidos com base em resultados de estudo semelhante (12), conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem.

| | |
|--|----------|
| Corrente, I (A) | 200 |
| Velocidade de Soldagem, v_s (mm/min) | 90 – 100 |
| Eletrodo – composição | W-Th |
| Eletrodo – diâmetro (mm) | 2,5 |
| Arc Gap, (mm) | 3 |
| Gás – composição | Argônio |
| Gás – vazão, (l/min) | 12 - 14 |

Após a soldagem, as amostras foram seccionadas por uma policorte e preparadas conforme os métodos metalográficos convencionais, incluindo ataque

químico com Nital 2%. Em seguida, foram submetidas a análises macrográficas, microestruturais e a ensaios de microdureza, sendo os resultados avaliados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA).

Inicialmente, as amostras foram submetidas à análise macrográfica utilizando o estereomicroscópio DISCOVERY V.8, da ZEISS, que permitiu capturar a totalidade da área do cordão de solda e calcular a taxa de diluição. Esta taxa determina a proporção de metal de base incorporado ao metal de adição (%), conforme descrito na Eq. (1), em que: A representa a área do reforço e B a área da penetração da solda.

$$\text{Taxa de diluição} = \frac{B}{A+B} * 100 \quad (1)$$

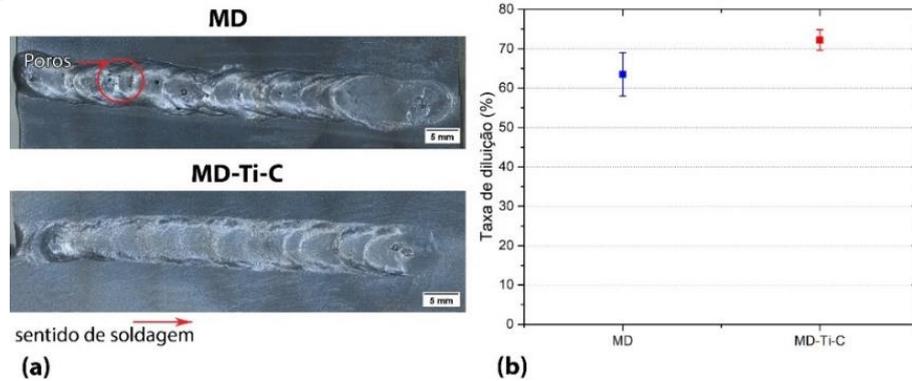
O ensaio de microdureza foi realizado utilizando o microdurômetro SHIMADZU, modelo HMV-2, com uma carga de 0,3 kgf. As medições começaram na superfície do cordão de solda e se estenderam até o metal de base, com um espaçamento uniforme de 300 micrômetros entre os pontos de medição. Em seguida, a caracterização microestrutural foi conduzida por meio de imagens obtidas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), assim como o mapeamento químico por Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS). Para a análise e extração de dados das imagens, foi utilizado o software *ImageJ*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cordões de solda exibiram boa aparência, especialmente na condição MD-Ti-C (Figura 1.a). No entanto, na condição MD, a superfície formada apresentou poros nos cordões. Em contraste, os cordões de MD-Ti-C mostraram um perfil mais uniforme e uma aparência superior. Essa uniformidade pode ser atribuída à presença do carboneto de titânio, cuja densidade inferior à do WC pode reduzir a porosidade e melhorar a aparência da solda, já que carbonetos de menor densidade tendem a produzir depósitos mais homogêneos (1). Os cordões gerados pela condição MD apresentaram uma menor taxa de diluição em comparação aos cordões formados por MD-Ti-C. A média de diluição dos cordões de MD-Ti-C foi de 72,2%±2,6%, enquanto os cordões de MD obtiveram uma média de 63,5%±5,5%, valores significativamente superior aos recomendados para a formação de revestimentos duros (Figura 1.b). No entanto, a análise de variância (ANOVA) indicou, com um nível de confiança de 95%,

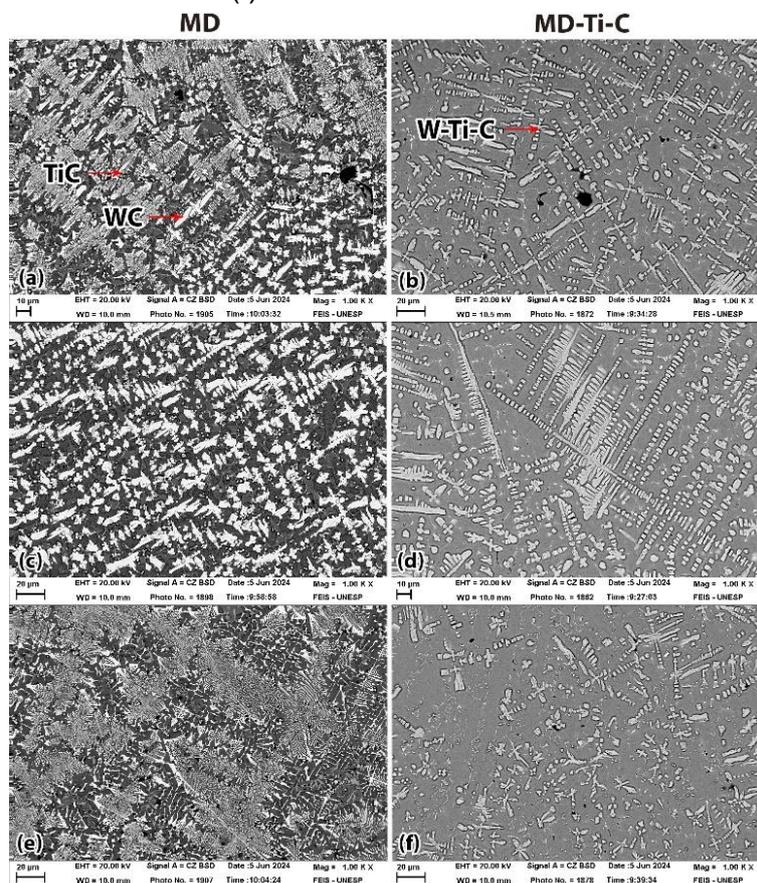
que não há diferenças estatisticamente significativas entre as médias das taxas de diluição dos cordões de solda originados do fluxo de MD e daqueles de MD-Ti-C.

Figura 1. (a) Macrografia dos depósitos. (b) Taxa de diluição da solda.



A investigação da formação de carbonetos revelou uma distribuição uniforme na microestrutura dos cordões depositados, conforme demonstrado através das imagens obtidas via MEV (Figura 2). Essa figura ilustra a microestrutura do revestimento em três regiões distintas: topo; centro e fundo do cordão.

Figura 2. Microestruturas de soldas. (a) MD – topo do cordão. (b) MD-Ti-C – topo do cordão. (c) MD – meio do cordão. (d) MD-Ti-C – meio do cordão. (e) MD – fundo do cordão. (f) MD-Ti-C – fundo do cordão.



A microestrutura dos depósitos de liga de tungstênio tipicamente consiste em fases de carboneto de tungstênio, substâncias altamente duras, dispersas em uma matriz de liga mais macia. É importante destacar que a redução no tamanho das partículas de carboneto de tungstênio resulta em maior dispersão na poça de fusão, o que promove uma maior proporção de carbonetos primários nos depósitos. Essa característica contribui para o aumento da dureza e, conseqüentemente, para o aprimoramento das propriedades de resistência ao desgaste (13). Nos depósitos gerados pela condição MD, observou-se a presença de dendritas de WC, bem como TiC com morfologia globular, ambos distribuídos ao longo da matriz ferrítica (Figura 2.a, c, e; Figura 3.a). Foi identificada, ainda, a presença de Co disperso na microestrutura, o qual atua como elemento ligante dos carbonetos nas pastilhas de metal duro, sendo a combinação WC e Co a mais comum. Tais achados são corroborados pelo mapeamento químico realizado por EDS (Figura 4).

Figura 3. Detalhe ampliado da microestrutura das soldas: (a) MD. (b) MD-Ti-C. (c) Fração volumétrica de carbonetos.

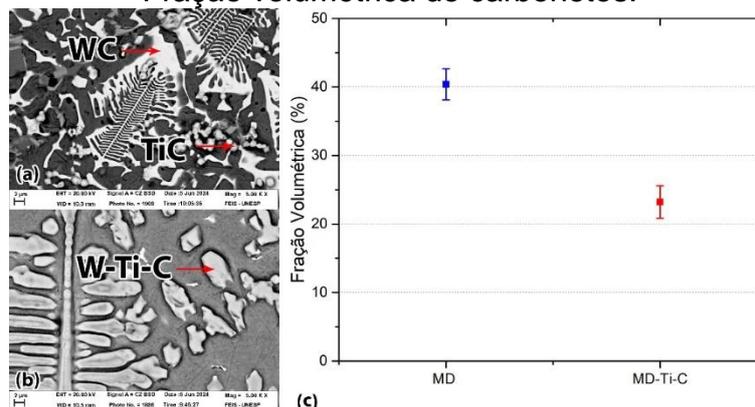
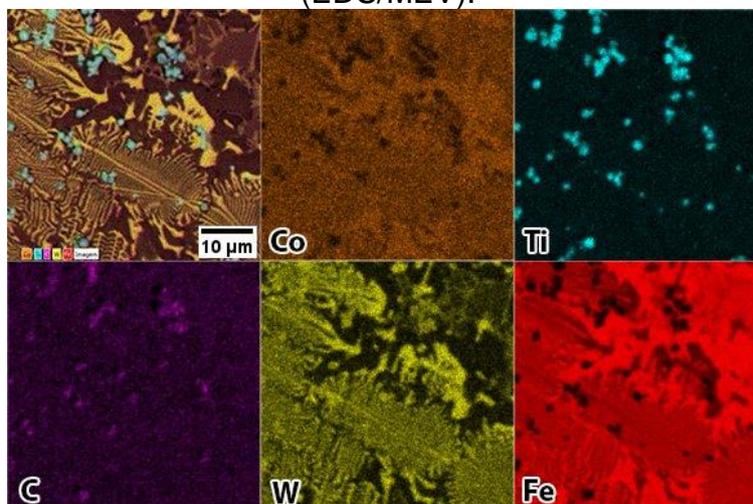
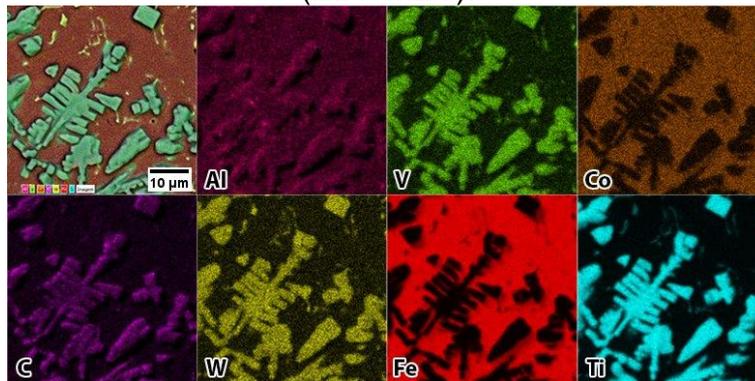


Figura 4. Mapeamento químico da microestrutura da solda com fluxo de MD (EDS/MEV).



A microestrutura resultante da condição MD-Ti-C apresentou a formação de carbonetos de W-Ti-C, com vestígios de V. Também foram identificadas a presença de Al e Co dispersos, sendo o Co predominantemente concentrado na matriz (Figura 5). O Al e o V são provenientes da liga de titânio F137, enquanto o Co origina-se dos insertos de metal duro. Os carbonetos W-Ti-C apresentam uma morfologia predominantemente dendrítica, com grãos que se alongam progressivamente em direção ao centro do revestimento (Figura 2.b, d, f; Figura 3.b). Esse comportamento é atribuído ao processo de solidificação durante a formação do depósito. Durante o resfriamento e solidificação do metal fundido, ocorre a nucleação e o crescimento dos grãos do material, que tendem a crescer na direção do centro, devido ao fluxo térmico. As observações indicam uma distribuição homogênea dos carbonetos ao longo do cordão de solda.

Figura 5. Mapeamento químico da microestrutura da solda com fluxo de MD-Ti-C (EDS/MEV).

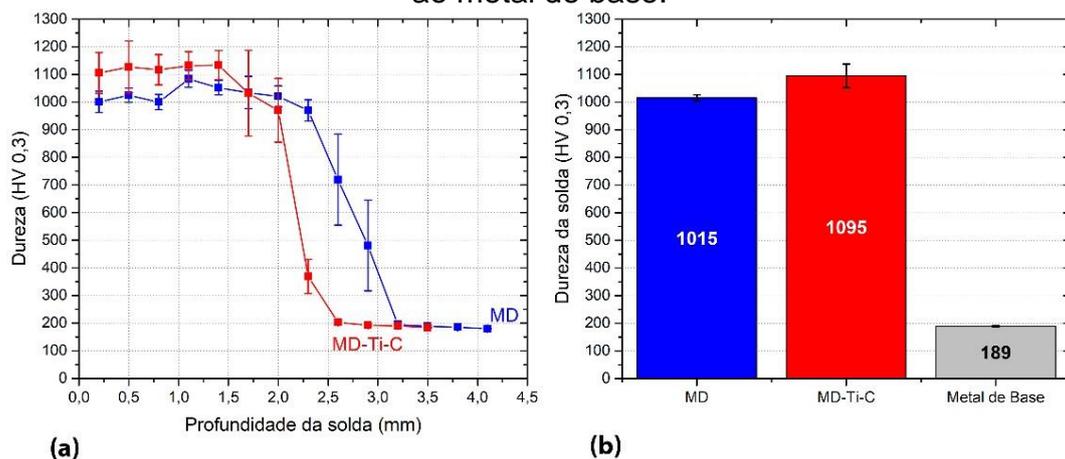


Em relação à fração volumétrica de carbonetos presentes nas soldas (Figura 3.c), verificou-se uma maior concentração de carbonetos na condição MD, correspondente a $40,4\% \pm 2,3\%$, dos quais $3,59\% \pm 0,53\%$ são atribuídos ao TiC. O depósito obtido a partir de MD-Ti-C apresentou uma fração volumétrica de $23,21\% \pm 2,37\%$ de carbonetos W-Ti-C.

Observa-se que as soldas produzidas em ambas as condições de soldagem apresentaram valores de dureza significativamente superiores aos do metal de base (Figura 6). Isso sugere que a solda gerada a partir do fluxo contendo insertos de metal duro, assim como a combinação de MD-Ti-C, alcançou uma dureza média cinco vezes maior em comparação ao metal de base. A aplicação de testes ANOVA aos valores de dureza obtidos no metal de solda não revelou diferenças significativas entre as duas condições analisadas. É relevante mencionar, ainda, que a análise da

distribuição dos carbonetos e do tipo de matriz formada nos bolsões interdendríticos é crucial para compreender os valores de dureza observados. A presença ou ausência de carbonetos em certas regiões da solda exerce um impacto considerável na resistência ao desgaste e na durabilidade do material. Em áreas onde há escassez de carbonetos e a matriz é predominantemente ferrítica, observa-se uma redução nos valores de dureza, indicando menor resistência à abrasão. Em contrapartida, regiões com alta concentração de carbonetos combinados tendem a apresentar valores de dureza elevados, o que aumenta a capacidade do material de resistir ao desgaste. A uniformidade na distribuição dos carbonetos desempenha um papel fundamental na redução da variação dos resultados de dureza, pois o valor obtido é influenciado pela região em que o indentador atua durante os testes de microdureza (14).

Figura 6. (a) Medições de dureza ao longo da solda, iniciando do topo em direção ao metal de base. (b) Valores médios de dureza das diferentes soldas em comparação ao metal de base.



Ao analisar os valores de dureza e a taxa de diluição nas duas condições investigadas, em conjunto com as análises macrográficas, micrográficas, e de composição química, constata-se que o fluxo composto por MD-Ti-C apresentou resultados mais vantajosos. Isso se deve à presença de poros e discontinuidades nos cordões de solda produzidos pela deposição de MD, enquanto a combinação de MD-Ti-C resultou em uma solda com aspecto mais homogêneo e uniforme. Além disso, a condição MD-Ti-C exibiu uma microestrutura dendrítica de W-Ti-C pronunciada e grosseira, uma característica que tende a aumentar a resistência ao desgaste (2). Esse contexto sugere que a interação entre esses materiais pode atuar de maneira sinérgica, promovendo a formação de carbonetos na junta soldada e resultando em maior resistência ao desgaste.

CONCLUSÃO

Com base no estudo conduzido neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os cordões de solda apresentaram boa aparência, com destaque para a condição MD-Ti-C, que mostrou um perfil mais uniforme e menos poroso, possivelmente devido à presença de TiC.
- A condição MD apresentou uma menor taxa de diluição em comparação à MD-Ti-C, mas os valores de diluição em ambas as condições foram superiores aos recomendados para revestimentos duros.
- A distribuição de carbonetos nas soldas foi uniforme, com microestruturas distintas nas condições MD-Ti-C e MD, apresentando formação de W-Ti-C, e WC e TiC, respectivamente.
- Ambas as condições de soldagem resultaram em dureza significativamente superior ao metal de base (5 vezes maior), sem diferenças estatisticamente significativas entre si, conforme indicado pelos testes ANOVA.
- A reciclagem de cavacos de titânio e pastilhas de metal duro contribuiu para a formação de carbonetos na microestrutura da solda, indicando a viabilidade de reutilizar esses resíduos na aplicação de revestimentos duros.

REFERÊNCIAS

- 1 MELLOR, B. G. **Surface Coatings for Protection Against Wear**. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- 2 GAHR, K.-H. Z. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology series. Amsterdam: Elsevier, v. 10, 1987.
- 3 TYLCZAK, J. H.; OREGON, A. Friction, Lubrication, and Wear Technology. In: AMERICAN STANDART METALS. **ASM Handbook**. New York: ASM, v. 18, 1992. p. 337-351.
- 4 SURAJ, R. Hardfacing and its effect on wear and corrossion performance of various. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, Part 2, p. 842 - 850, 2021.
- 5 RANJAN, R.; KUMAR DAS, A. Protection from corrosion and wear by different weld cladding techniques: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, Part 4, p. 1687 - 1693, 2022.

- 6 WANG, X. H. et al. In situ production of Fe-TiC surface composite coatings by tungsten-inert gas heat source. **Surface & Coatings Technology**, v. 200, p. 6117 - 6122, 2006.
- 7 KUMAR, A.; BATRA, N. K.; PRAKASH, G. Gas tungsten arc welding alloying of AISI 409 M steel with WC-10Co-4Cr powder to enhance the 3-body wear resistance. **Materials Today: Proceedings**, v. 41, Part 4, p. 935 - 941, 2021.
- 8 PARAYE, N. K. et al. Surface modification of AISI 8620 steel by in-situ grown TiC particle using TIG arcing. **Surface and Coatings Technology**, v. 405, 2021.
- 9 LOZYNSKYI, V. et al. Effect of Exothermic Additions in Core Filler on Arc Stability and Microstructure during Self-Shielded, Flux-Cored Arc Welding. **Crystals**, p. 1-32, 2024.
- 10 PIERSON, H. O. **Handbook of refractory carbides and nitrides: properties, characteristics, processing, and applications**. New Jersey: Noyes Publications, 1996.
- 11 ASTM INTERNATIONAL. **F136 - 13 - Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401)**. ASTM. West Conshohocken, p. 1 - 5. 2013.
- 12 FAGUNDES JÚNIOR, J. G.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGO, J. Reciclagem de Cavacos de Titânio para a Deposição de Revestimentos Duros por Soldagem. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 20, p. 117 - 127, 2015.
- 13 TANDON, D. et al. A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works. **Metals**, v. 13, n. 9, p. 1-37, 2023.
- 14 FAGUNDES JÚNIOR, J. G.; BRACARENSE, A. Q. Efeitos da espessura da fita metálica no metal de solda utilizando cavacos de titânio como. **Soldagem & Inspeção**, 2019.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem às empresas Cadiminas (Belo Horizonte), Durum do Brasil e Neodent pelos materiais disponibilizados. Agradecimentos são estendidos ao Professor Dr. João Carlos S. Moraes (DFQ/FEIS) pelos ensaios de dureza e ao Professor Dr. Allan R. T. Machado (UEMG/João Monlevade) pelo uso do MEV nas análises de EDS/MEV.

PRODUCTION OF WEAR-RESISTANT WELDING CONSUMABLES USING FLUX DERIVED FROM THE RECYCLING OF TITANIUM CHIPS AND WC-BASED HARD METAL INSERTS

Vieira, P.C.¹ – poliane.vieira@unesp.br
Fagundes Júnior, J. G.¹ – gedael.fagundes@unesp.br
Firmo, L. K. M.¹ – leticia.firmo@unesp.br
Ventrella, V. A.¹ – vicente.ventrella@unesp.br
Arias, A. R.² – arielra@demec.ufmg.br
Gallego, J.¹ – juno.gallego@unesp.br

¹São Paulo State University (UNESP), School of Engineering, Graduate Program in Mechanical Engineering, Characterization and Development of Materials and Technological Processes Group (MaProTec). Av. Brasil, 56, Ilha Solteira - SP, 15385-007.

²Federal University of Minas Gerais (UFMG), Department of Mechanical Engineering, Robotics, Welding, and Simulation Laboratory (LRSS). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901.

ABSTRACT

Abrasive wear is the most common and aggressive type of wear in tribological systems, leading to significant damage and failure in industrial components, which results in high maintenance and replacement costs. The hardfacing technique, involving the deposition of hard coatings through welding, is effective in mitigating this issue, thereby reducing costs and maintenance time. Among the carbides used in hard coatings, tungsten carbide (WC) and titanium carbide (TiC) stand out for their high wear resistance. This research investigated the use of recycled hard metal inserts and titanium chips as sources of carbides in welding. The results indicated that GTAW welding led to the formation of TiC and WC in a ferritic matrix, with an increase in hardness in the welded area. The recycling of these materials proved to be a sustainable and effective alternative for producing hard coatings.

Keywords: *abrasive wear, GTAW, hardfacing, sustainability.*