

## ANÁLISE DA VIABILIDADE NO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE NIÓBIO NA FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE SOLDAGEM RESISTENTES AO DESGASTE

Firmo, L. K. M.<sup>1</sup> – [leticia.firmo@unesp.br](mailto:leticia.firmo@unesp.br)  
Vieira, P. C.<sup>1</sup> – [poliane.vieira@unesp.br](mailto:poliane.vieira@unesp.br)  
Fagundes Júnior, J. G.<sup>1</sup> – [gedael.fagundes@unesp.br](mailto:gedael.fagundes@unesp.br)  
Gallego, J.<sup>1</sup> – [juno.gallego@unesp.br](mailto:juno.gallego@unesp.br)  
Arias, A. R.<sup>2</sup> – [arielra@demec.ufmg.br](mailto:arielra@demec.ufmg.br)  
Cunha, M. C.<sup>2</sup> – [mateusmec@ufmg.br](mailto:mateusmec@ufmg.br)  
Ventrella, V. A.<sup>1</sup> – [vicente.ventrella@unesp.br](mailto:vicente.ventrella@unesp.br)

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP),  
Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Brasil, 56, Ilha Solteira - SP,  
15385-007.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Programa de Pós-graduação  
em 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 um desafio comum em diversos setores industriais, resultante da deterioração contínua de máquinas e equipamentos. Uma estratégia eficaz para mitigar esse desgaste é a aplicação de revestimentos duros depositados por soldagem, os quais apresentam uma microestrutura composta por fases dúcteis e fases de alta dureza, como os carbonetos metálicos de titânio (TiC), tungstênio (WC) e nióbio (NbC). O nióbio, amplamente utilizado em aplicações metalúrgicas, favorece a formação de NbC, melhorando as propriedades dos aços. Contudo, seu alto custo limita sua aplicação em larga escala. Paralelamente, resíduos metálicos, como cavacos de nióbio gerados pela indústria siderúrgica, são frequentemente descartados. Este estudo propõe a valorização desses resíduos, convertendo-os em pós metálicos incorporados ao fluxo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Resultados preliminares mostram que a soldagem GTAW forma NbC, conferindo ao revestimento resistência ao desgaste abrasivo, destacando o potencial dos cavacos de nióbio como elemento de liga.

**Palavra-chave:** Desgaste abrasivo, revestimento, soldagem GTAW, sustentabilidade.

## INTRODUÇÃO

A usinagem de tarugos produzidos a partir de ligas de nióbio é crucial para assegurar a conformidade com os rigorosos requisitos de tolerância dimensional, geométrica e de acabamento superficial. Este processo é geralmente realizado logo após a etapa de fundição pelas empresas fornecedoras desses tarugos, que frequentemente têm o nióbio como elemento predominante na composição química das ligas. Segundo dados internos da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), uma empresa especializada no fornecimento de produtos de nióbio (1), a usinagem dos tarugos resulta na geração de grandes volumes de cavacos, o que impulsiona a busca por alternativas que possibilitem a reintegração desses resíduos na cadeia produtiva.

O nióbio é amplamente reconhecido como um elemento valioso e versátil, utilizado em diversas ligas metálicas, com aplicações em setores com as indústrias automotivas e naval (2). Um exemplo de sua aplicação é a deposição de revestimentos resistentes ao desgaste por soldagem, onde se busca a formação de fases de alta dureza na microestrutura da solda. Entre as fases desejadas, destacam-se os carbonetos metálicos, como o carboneto de cromo ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), o carboneto de titânio (TiC), o carboneto de tungstênio (WC) e o carboneto de nióbio (NbC).

Os carbonetos de nióbio constituem uma classe de compostos de grande interesse científico e tecnológico, devido às suas propriedades únicas. Esses materiais, formados pela combinação de átomos de nióbio e carbono em diferentes proporções e estruturas, exibem uma ampla gama de características, incluindo alta dureza, resistência ao desgaste, bem como excelente condutividade elétrica e térmica (3). Essa diversidade de propriedades torna os carbonetos de nióbio extremamente versáteis, com aplicações em diversos contextos industriais, desde materiais compósitos de segunda fase em metal duro, ferramentas de corte de alto desempenho até componentes eletrônicos avançados (4), (5).

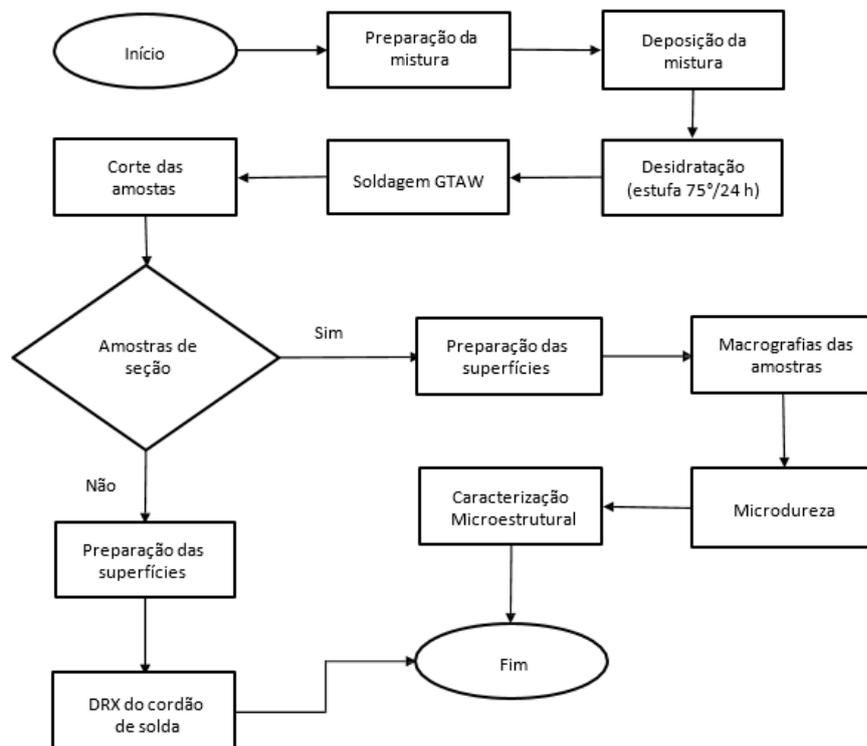
Tradicionalmente, os consumíveis de soldagem para a aplicação de revestimentos duros são formulados a partir de ferro ligas comerciais, que podem ter alto valor de mercado (6). Em razão disso, há um crescente interesse em consumíveis à base de cromo, que tendem a apresentar um custo inferior em comparação com outras opções. Nesse contexto, a reutilização dos cavacos de nióbio como matéria prima para a formulação de consumíveis de soldagem pode representar uma alternativa economicamente viável e tecnicamente promissora, especialmente em comparação com as ligas à base de cromo.

Diante dessas considerações, o presente estudo tem como objetivo principal viabilizar a utilização de cavacos de nióbio como componentes nos fluxos de soldagem para a formação de revestimentos resistentes ao desgaste, oferecendo uma solução sustentável e de baixo custo para a indústria.

## METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 1 representa a metodologia adotada no presente estudo.

Figura 1 - Fluxograma dos materiais e métodos.

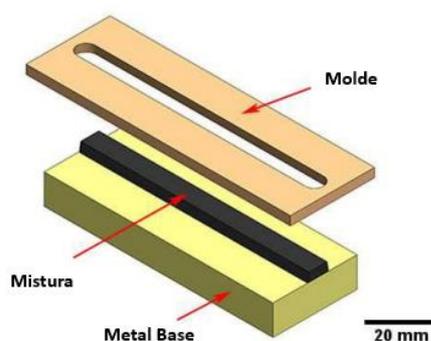


No presente estudo, foram utilizados pós metálicos obtidos a partir da moagem dos cavacos gerados durante a usinagem de ligas de nióbio fornecidos pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Inicialmente, os cavacos foram submetidos a um processo de limpeza por banhos ultrassônicos, seguido de moagem em moinhos de bolas até que atingissem uma granulometria de 40 Mesh (0,42 mm). O carbono utilizado na forma de grafite foi fornecido pela empresa CADIMINAS Comércio e Representações, especializada na comercialização de produtos para fundição e siderurgia.

A composição química da mistura foi determinada por cálculos estequiométricos, resultando em uma proporção de 10 gramas de cavacos de nióbio para 1,5 gramas de grafite. Adicionalmente, foi incorporado silicato de sódio na proporção de 0,3 gramas como agente vitrificante, com o objetivo de melhorar a aderência da mistura à superfície do metal base (7). A água destilada foi adicionada à mistura por meio de um conta gotas.

Como metal base, foram utilizadas chapas de aço ASTM A-36 com dimensões de 6 mm x 25 mm x 65 mm. As superfícies dos corpos de prova foram preparadas por esmerilhamento e, em seguida, limpas com álcool etílico para garantir a remoção de contaminantes. A aplicação da mistura sobre o metal base foi realizada utilizando-se uma chapa como molde, conforme ilustrado na Figura 2. Após a remoção do molde, os corpos de prova foram submetidos a uma estufa a 75°C por 24 horas, antes de serem processados pela soldagem.

Figura 2 - Esquema de deposição da mistura no metal de base.



A soldagem foi realizada utilizando o processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (*Gas tungsten Arc Welding, GTAW*). O equipamento empregado foi o modelo INVERTEC V300-I, fabricado

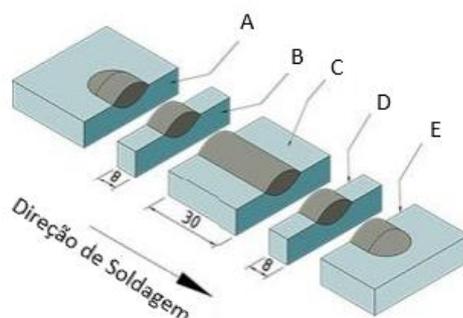
pela LINCOLN ELECTRIC, o qual estava acoplado a um trator automático portátil para facilitar o deslocamento da amostra durante o processo. Os parâmetros de soldagem adotados estão descritos detalhadamente na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem.

Fluxo	Corrente (A)	Vel. Sold. (cm/min)	Arc Gap (mm)	Vazão do gás Ar (l/min)
A	180	125	3	12 a 14

As amostras foram cortadas com o auxílio de uma policorte, conforme ilustrado na Figura 3. As amostras das seções B e D foram destinadas aos ensaios de macrografia, microdureza e caracterização microestrutural. Após o embutimento em baquelite, as amostras foram preparadas utilizando técnicas metalográficas convencionais, que incluíram lixamento, polimento e ataque químico com solução de Nital 2%. A amostra da seção C foi submetida ao ensaio de difração de raio-X (DRX). As amostras A e E foram excluídas das análises.

Figura 3 - Representação do método de corte.



Inicialmente, as amostras seccionadas foram submetidas a uma análise macrográfica utilizando o estereomicroscópio modelo DISCOVERY V.8, fabricado pela ZEISS. Esse procedimento permitiu a captura da imagem completa do cordão de solda, além de possibilitar o cálculo da taxa de diluição ( $\delta$ ), a qual quantifica a incorporação de metal de base ao metal de adição (8), conforme definido por (A):

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

onde A representa a área do reforço e B a área de penetração.

Subsequentemente, foi realizado o ensaio de microdureza utilizando o microdurômetro SHIMADZU, modelo HMV, aplicado uma carga de 0,3 HV. As medições foram conduzidas desde o topo da solda até o metal base. A caracterização microestrutural foi então efetuada com o microscópio KONTROL, modelo IM100, onde foram registradas imagens de diferentes regiões da amostra, como exemplificado na Figura 4. A amostra da seção C foi retificada e submetida ao ensaio de difração de raio-X (DRX) utilizando o difratômetro modelo PW1710, fabricado pela PHILIPS-PANANALYTICAL.

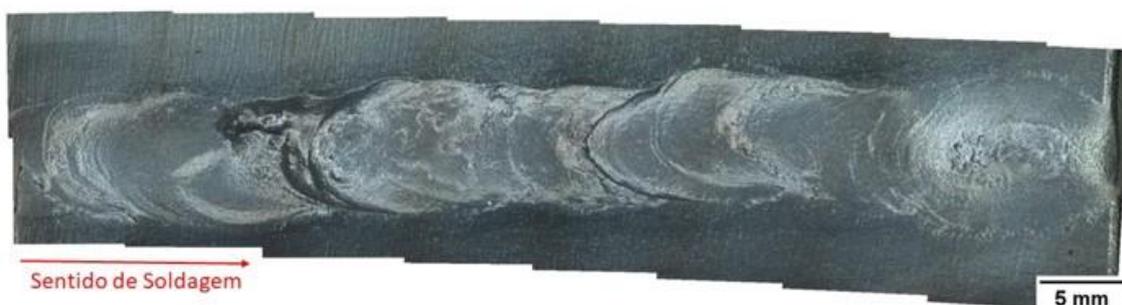
Figura 4 - Regiões analisadas no cordão de solda.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a topografia do cordão de solda formado pelo processo GTAW, na qual é possível visualizar condições de acabamento irregular em regiões intermediárias.

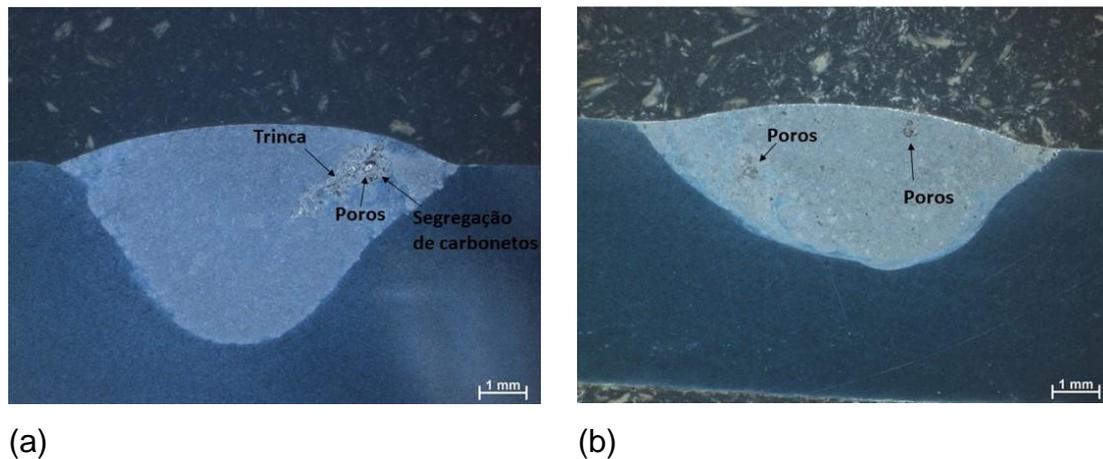
Figura 5 - Topografia do cordão de solda - mosaico de imagens



A Figura 6 mostra imagens macrográficas das seções B e D, submetidas ao ataque com Nital 2%, revelando poros e trincas. Os poros podem ter resultado do aprisionamento de gases durante a solidificação da poça de fusão, enquanto

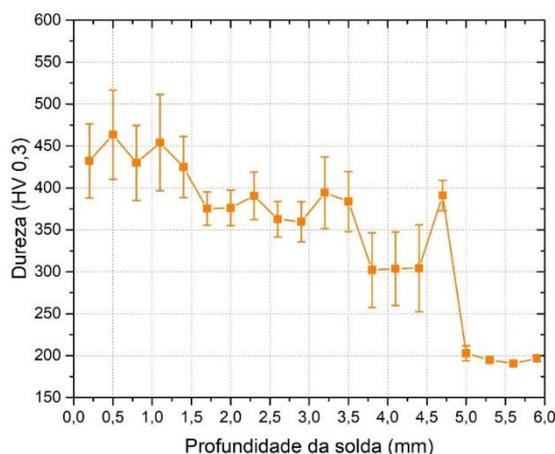
as trincas são atribuídas à alta corrente ou ao resfriamento. A taxa de diluição obtida, entre 78,77% e 82,46%, superou a faixa recomendada de 10% a 25% para revestimentos duros (9), possivelmente devido ao elevado aporte térmico e à utilização de um único passe. Recomenda-se o uso de menor aporte térmico e soldas de múltiplos (passes sobrepostos) para mitigar esses efeitos, embora o foco deste estudo tenha sido a viabilidade dos cavacos de Nb na formação de carbonetos.

Figura 6 - Macrografias dos cordões de solda.



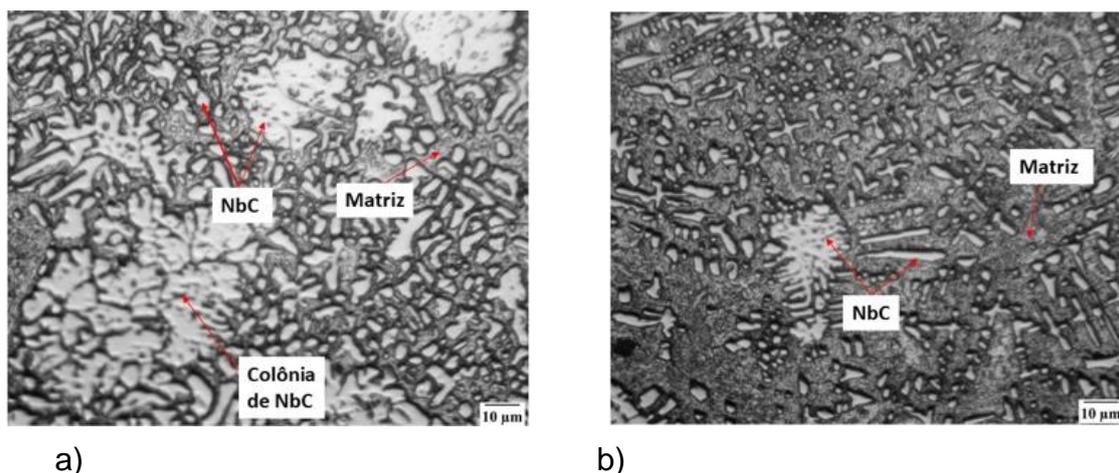
Os resultados do ensaio de microdureza permitiram a elaboração de um gráfico que relaciona a dureza à profundidade da solda, conforme apresentado na Figura 7. Observa-se um aumento nos valores de dureza no metal de solda, o que pode ser atribuído à presença de carbonetos de nióbio. À medida que a indentação se aproxima do metal base, verifica-se uma redução na dureza do material, provavelmente devido à ausência desses carbonetos. Esses achados sugerem que os carbonetos de nióbio desempenham um papel significativo no aumento da dureza do revestimento.

Figura 7 - Dureza (HV0,3) em função da profundidade da solda.



As micrografias revelaram a formação de uma microestrutura ferrítica contendo carbonetos de nióbio, caracterizada por uma morfologia com ramificações dendríticas e algumas partículas globulares, conforme ilustrado na Figura 8. Em determinadas regiões, os carbonetos formaram colônias massivas, com partículas grosseiras, enquanto em outras áreas observou-se uma distribuição uniforme de partículas menores.

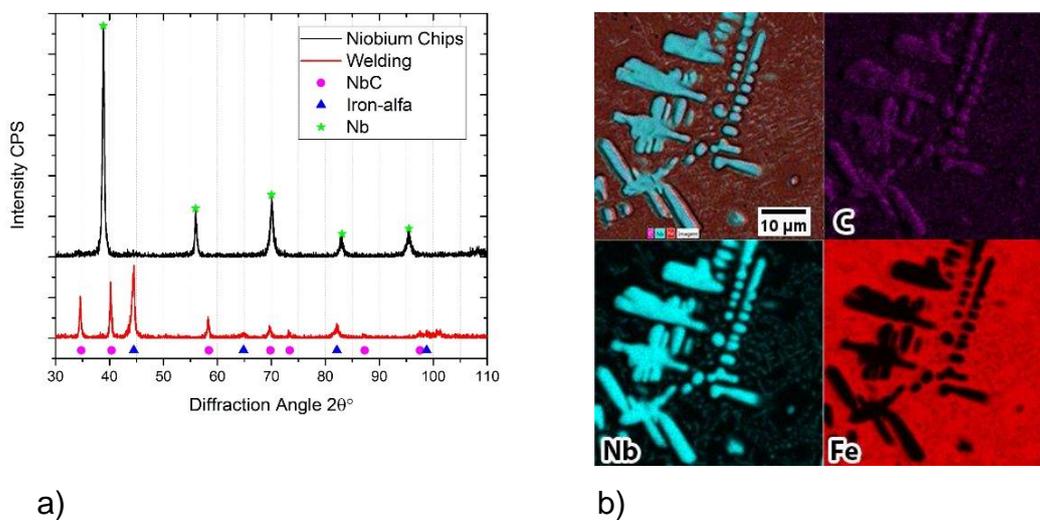
Figura 8 - Aspecto microestrutural do metal de solda pela fusão da mistura com cavacos de nióbio – ataque em Nital 2%. (a) Colônias de carbonetos na forma mais globular (b) Carbonetos distribuídos mais homogêaneamente com o formato dendrítico.



Foi realizada uma análise por difração de raios-X (DRX), conforme apresentado na Figura 9(a), a qual demonstrou que todo o nióbio presente na solda se transformou em carbonetos de NbC (10). É relevante destacar que nenhum pico correspondente ao nióbio metálico foi identificado no padrão de

difração de raios-X da solda, confirmando sua completa transformação em carbonetos. Adicionalmente, o mapeamento químico por EDS, apresentado na Figura 9(b), corroborou a formação dos carbonetos de nióbio. Pois há uma distribuição coesa do nióbio (Nb) e do carbono (C) nas mesmas regiões da formação do NbC, garantindo a eficácia do processo de soldagem. Enquanto nas demais regiões da matriz há a predominância do elemento ferro (Fe) o que indica uma microestrutura desejável para essa aplicação.

Figura 9. (a) Difractograma das amostras (b) Mapeamento químico



## CONCLUSÃO

Após a realização do estudo foi possível concluir que:

- Os resultados indicam que cavacos de nióbio têm elevado potencial para a produção de revestimentos com propriedades mecânicas e tribológicas superiores, favorecendo a redução de desperdício de materiais e custos associados.
- O mapeamento EDS confirma a presença e a boa distribuição de NbC no revestimento, evidenciando que o processo de soldagem foi eficaz na formação dos carbonetos de nióbio.
- Para confirmar o pleno potencial de aplicação dos revestimentos, são necessários ensaios adicionais, especialmente testes de desgaste, com a expectativa de aumento da resistência ao desgaste.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Agradecemos também as empresas parceiras Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) e CadiMinas Comércio e Representações LTDA pelo fornecimento dos insumos. Aos Departamentos de Engenharia de Minas (DEMIN/UFMG), pela disponibilização dos equipamentos de moagem. Ao Departamento de Físico-Química (DFQ/UNESP), Professor Eudes Borges de Araújo, pelo uso das técnicas de difração de raios-X (DRX), ao Professor Dr. João Carlos S. Moraes (DFQ/UNESP) pelos ensaios de dureza. E ao Professor Dr. Allan R. T. Machado (UEMG/João Monlevade) pela utilização do MEV nas análises de EDS/MEV.

## REFERÊNCIAS

1 BRUZIQUESI, CARLOS G. O.; BALENA, JOSE GABRIEL; PEREIRA, MÁRCIO CÉSAR; SILVA, ADILSON C.; OLIVEIRA, LUIZ C. A. Nióbio: um elemento químico estratégico para o brasil. **Química Nova**, 42, 2019. 1184-1188.

2 FARAH, ALESSANDRO FRAGA; GONÇALVES, ANDREI HENRIQUE; FARAH, SOLANGE PEREIRA DOS SANTOS; GOMES, MÁRCIA APARECIDA; BOLDRIN, EDSON LUIS. Estudo da propriedades de revestimentos duros produzidos com adição de pó de nióbio ao fluxo neutro no processo de soldagem a arco submerso. **Simpósio de Tecnologia (Sitefa) – Fatec Sertãozinho**, São Paulo, v. 6, n. 6118, p. 1-12, 2023.

3 PIERSON, H. O. **Handbook of Refractory Carbides and Nitrides: Properties, Characteristics, Processing and Applications**. Westwood: Noyes Publications, 1996.

4 MONTENEGRO, PAULA; GOMES, JEFFERSON; REGO, RONNIE; BORILLE, ANDERSON. Potential of niobium carbide application as the hard phase in cutting tool substrate. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, 70, 2018. 116-123.

5 I.F.MACHADO; BOIDI, G.; FUKUMASU, N.K.; TERTULIANO, A.J.O.; SERIACOPI, V.; SOUZA, R.M. Effect of sintering densification on micro-scale mechanical and tribological behaviour of niobium carbide. **Wear**, 482-483, 2021.

6 HOLLECK, H. **Material selection for hard coatings**. Institut für Material und Festkörperforschung. Federal Republic of Germany. 1986.

7 PARAYE, NILESH KUMAR; NEOG, SURUJ PROTIM; GHOSH, PRAKRITI KUMAR; DAS, SOURAV. Surface modification of AISI 8620 steel by in-situ grown TiC particle using TIG arcing. **Surface and Coatings Technology**, 405, 2021.

8 SINGLA; KUMAR, YOGESH; MAUGHAN, MICHAEL R.; ARORA, NAVNEET; DWIVEDI, D.K. Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. **Journal of Manufacturing Processes**, 120, 2024. 135-160.

9 TANDON, DURGA; LI, HUIJUN; PAN, ZENGXI; YU, DAKE; PANG, WILLY. A Review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works. **Metals**, p. 1-37, 2023.

10 CHAIDEMENOPOULOS, N G; PSYLLAKI, P P; PAVLIDOU, E; VOURLIAS, G. Aspects on carbides transformations of Fe-based hardfacing deposits. **Surface & Coatings Technology**, v. 357, p. 651-661, 2019.

# ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF REUSING NIOBIUM CHIPS IN THE PRODUCTION OF WEAR-RESISTANT WELDING COATINGS

Firmo, L. K. M. <sup>1</sup> – [leticia.firmo@unesp.br](mailto:leticia.firmo@unesp.br)  
Vieira, P. C. <sup>1</sup> – [poliane.vieira@unesp.br](mailto:poliane.vieira@unesp.br)  
Fagundes Júnior, J. G. <sup>1</sup> – [gedael.fagundes@unesp.br](mailto:gedael.fagundes@unesp.br)  
Gallego, J. <sup>1</sup> – [juno.gallego@unesp.br](mailto:juno.gallego@unesp.br)  
Arias, A. R. <sup>2</sup> – [arielra@demec.ufmg.br](mailto:arielra@demec.ufmg.br)  
Cunha, M. C. <sup>2</sup> – [mateusmec@ufmg.br](mailto:mateusmec@ufmg.br)  
Ventrella, V. A. <sup>1</sup> – [vicente.ventrella@unesp.br](mailto:vicente.ventrella@unesp.br)

<sup>1</sup> São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Department of Mechanical Engineering. Av. Brasil, 56, Ilha Solteira - SP, 15385-007.

<sup>2</sup> Federal University of Minas Gerais (UFMG). Graduate Program in Mechanical Engineering. Laboratory of Robotics, Welding, and Simulation (LRSS). Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901.

## ABSTRACT

*Abrasive wear is a common challenge in various industrial sectors, leading to the continuous deterioration of machinery and equipment. An effective strategy to mitigate this wear is the application of hard coatings deposited by welding, which exhibit a microstructure composed of ductile phases and high-hardness phases, such as titanium (TiC), tungsten (WC), and niobium (NbC) metal carbides. Niobium, widely used in metallurgical applications, promotes the formation of NbC, enhancing the properties of steels. However, its high cost limits large-scale application. Meanwhile, metallic waste, such as niobium chips generated by the steel industry, is often discarded. This study proposes the valorization of these residues by converting them into metallic powders incorporated into the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. Preliminary results indicate that GTAW welding forms NbC, imparting wear resistance to the coating, highlighting the potential of niobium chips as an alloying element.*

**Keywords:** Abrasive wear, coating, GTAW welding, sustainability.