



## REVESTIMENTO DE TITÂNIO EM AÇO ARBL APÓS RECICLAGEM DE CAVACOS EM BANHO DE SAIS FUNDIDOS USADA PARA DEPOSIÇÃO TERMO-REATIVA

Vitor S. Rolin<sup>1\*</sup>, Carlos A. Picone<sup>2</sup> e Juno Gallego<sup>1</sup>

1 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (UNESP), Ilha Solteira, SP. Avenida Brasil, 56 - Centro - CEP 15385-007- Ilha Solteira-SP

2 - Departamento de Física e Química (DFQ), Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (UNESP), Ilha Solteira, SP. Avenida Brasil, 56 - Centro - CEP 15385-007- Ilha Solteira-SP

\*[Autor vs.rolin@unesp.br](mailto:vs.rolin@unesp.br)

### RESUMO

O titânio e suas ligas são materiais de elevado custo e apresentam ótima resistência ao desgaste e à corrosão. Porém, não há mercado para os resíduos de usinagem (cavacos), que são comumente descartados como sucata comum. Este estudo investiga a aplicação de revestimento de titânio em superfícies de aços usando deposição termo-reativa (TRD) em um banho de sais fundidos (NaCl-KCl) com diferentes concentrações de cavacos de titânio F-67 (2,5%, 5% e 10%). Peças de aço ARBL foram tratadas a 1000°C entre 1 e 5 horas. Análises mostraram a formação de camadas cuja espessura e homogeneidade variaram conforme a concentração de cavacos e tempo de tratamento. Algumas amostras apresentaram duas regiões distintas: uma camada interna (interface substrato/revestimento) homogênea, composta por carboneto de titânio e ferrita e uma camada externa, predominantemente formada por titânio. Os dados indicam a viabilidade do método TRD utilizando cavacos de titânio para aplicação de revestimentos em aços.

**Palavras-chave:** Titânio, sais fundidos, deposição termo-reativa, aço.

## INTRODUÇÃO

O titânio (Ti) e suas ligas são materiais de elevado custo e apresentam ótimas propriedades mecânicas, baixa condutividade térmica, excelente relação resistência-peso e resistência à corrosão. Sendo muito desejado em mercados de alto valor, como aeroespacial, marítimo, geração de energia e biomédicas (1). Grande parte da fabricação dos componentes de Ti, passam por processos de usinagem de matérias-primas, o que gera consideráveis perdas de material com a produção de resíduos (cavacos) (2). Esses cavacos podem possuir pureza superior a 90% em massa, porém pelo seu baixo valor comercial e alto custo de processamento, são comumente descartados como sucata comum (3).

O Titânio comercialmente puro F-67 Grau 4, possui 99% de pureza (4). Como um elemento alotrópico, pode ser encontrado em diferentes formas. Em temperatura ambiente, possui uma fase chamada  $\alpha$ , com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). Ao atingir 883°C, converte-se em uma fase chamada  $\beta$ , com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) (5). Entre as diversas aplicações do titânio, o uso em revestimentos de superfície tem sido objeto de numerosos estudos. Com diversos autores voltando suas atenções para a difusão/deposição termo reativa, conhecida como *thermo-reactive diffusion* (TRD), podendo ser empregada em uma ampla variedade de materiais, como ferros fundidos (6), aços ferramenta (7,8) e aços inoxidáveis (9,10).

O método de TRD é utilizado para aplicar revestimentos duros, especialmente carbonetos. Este método oferece várias vantagens em comparação com a deposição química de vapor (CVD) e a deposição física de vapor (PVD), incluindo menor investimento em equipamentos, forte adesão ao substrato e a capacidade de gerar revestimentos com propriedades de superfície superiores (11,12). Sendo o banho de sal fundido uma das técnicas utilizadas na aplicação da TRD. Nesse processo, os revestimentos são formados pela imersão do substrato em sal fundido, que atua como meio de dissolução do metal de difusão. Entre os sais utilizados estão o bórax, cloretos e fluoretos, aos quais podem ser adicionados agentes redutores como o  $B_4C$ . A espessura e propriedades da camada formada, são influenciados por fatores, como temperatura, tempo de tratamento, composição do substrato e do banho (11). Com o objetivo de proporcionar uma destinação mais adequada e sustentável aos cavacos, este trabalho visa investigar a aplicação de revestimento de titânio sobre superfícies de aços, utilizando o método de difusão termo-reativa em banho de sal fundido.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os substratos utilizados foram peças de aço ARBL com dimensões 20 x 10 x 3 mm, sua composição é apresentada na Tabela 1. O banho de sal foi composto por uma mistura eutética de 43,94% em peso de NaCl e 56,06% em peso de KCl. Para eliminar a umidade da mistura, ela foi pesada e colocada em uma estufa 24 horas antes do experimento. Foi empregue como metal de difusão o titânio F-67 Grau 4, proveniente da reciclagem de cavacos, cedidos pela empresa Implalife Biotecnologia. O material foi submetido a uma limpeza intensa em ciclos de banhos ultrassônicos em água e detergente, seguido de enxagues em água. O ciclo foi finalizado somente após a total remoção dos resíduos de fluido de corte.

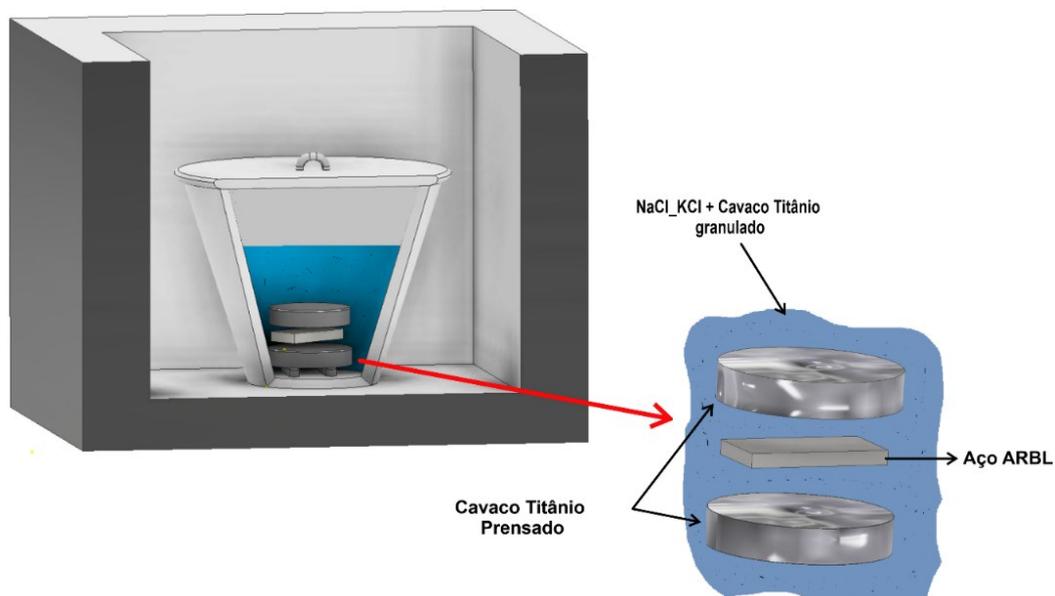
Tabela 1- Composição química em % de massa do aço ARBL

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	V
0,14	1,35	0,25	0,018	0,005	0,071	0,041	0,044	0,031

Fonte: USIMINAS - Cubatão - SP

O tratamento de deposição termo-reativa consistiu em adicionar a um cadinho de porcelana a mistura de NaCl-KCl, titânio F-67 Grau 4 (granulado e prensado na forma de discos) e as amostras de aço ARBL, em seguida, o conjunto foi colocado em um forno de resistência e aquecido a 1000 °C. A disposição dos materiais no cadinho está ilustrada na Figura 1.

Figura 1- Representação esquemática do tratamento



Para avaliar a influência do tempo de tratamento e da concentração de Ti, foram conduzidos experimentos com durações de 1h, 3h, 4h e 5h e adições de 2,5g (2,5%), 5g (5%) e 10g (10%). A Tabela 2 exibe as condições testadas e as nomenclaturas atribuídas.

Tabela 2- Condições dos tratamentos do aço ARBL.

<b>Amostra</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Ti (g)</b>	<b>NaCl_KCl (g)</b>
10_1h	1	10	90
10_3h	3	10	90
10_4h	4	10	90
10_5h	5	10	90
5_4h	4	5	95
2,5_4h	4	2,5	97,5

Após o experimento, as amostras foram resfriadas ao ar. Em seguida, o excesso de sal foi removido em água aquecida, seguido por um banho ultrassônico em álcool. Por fim, os corpos de prova foram secos e armazenados em um dessecador até serem analisados.

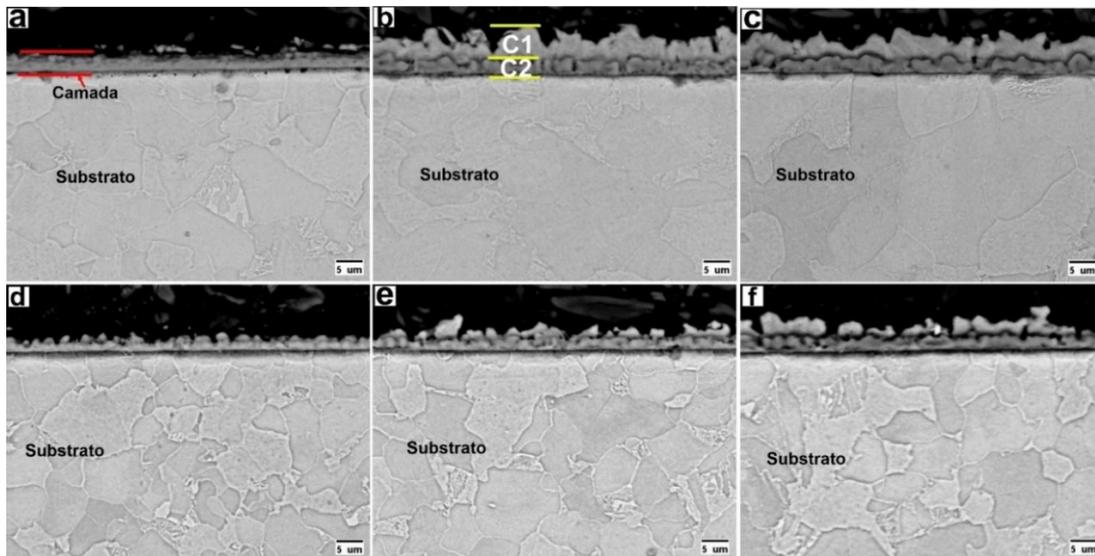
Antes dos ensaios, as amostras passaram por uma preparação metalográfica padrão. Para caracterizar o revestimento, foram usadas técnicas de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva de Elétrons (EDS) e difração de raios-X (DRX). A resistência a corrosão foi determinada por ensaios de polarização potenciodinâmica, utilizando uma célula eletroquímica de três eletrodos e eletrólito de NaCl 3.5%.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As Figuras 2a, 2b e 2c exibem as amostras tratadas durante 4 horas em banho de sal fundido em 1000 °C com adições de Ti de 2,5g, 5g e 10g. É observado a formação de revestimentos com espessuras e morfologias distintas, comprovando o efeito do tempo de tratamento e da porcentagem de Ti na formação da camada (11). Nota-se que a adição de 2,5g de Ti foi suficiente para promover a difusão do Ti no substrato. As amostras 5\_4h e 10\_4h apresentaram espessuras de camada significativamente superior à anterior. O revestimento é formado por mais de uma região: uma camada interna (interface substrato/revestimento) com boa homogeneidade, denominada de camada 2 (C2), e outra externa pouco homogênea

e chamada de camada 1 (C1), essa morfologia dos revestimentos de Ti já foram relatados em outros estudos (10,13).

Figura 2 – MEV das amostras tratadas em 1000°C em diferentes condições, (a) 2,5\_4h (b) 5\_4h, (c) 10\_4h, (d)10\_1h, (e) 10\_3h, (f) 10\_5h.

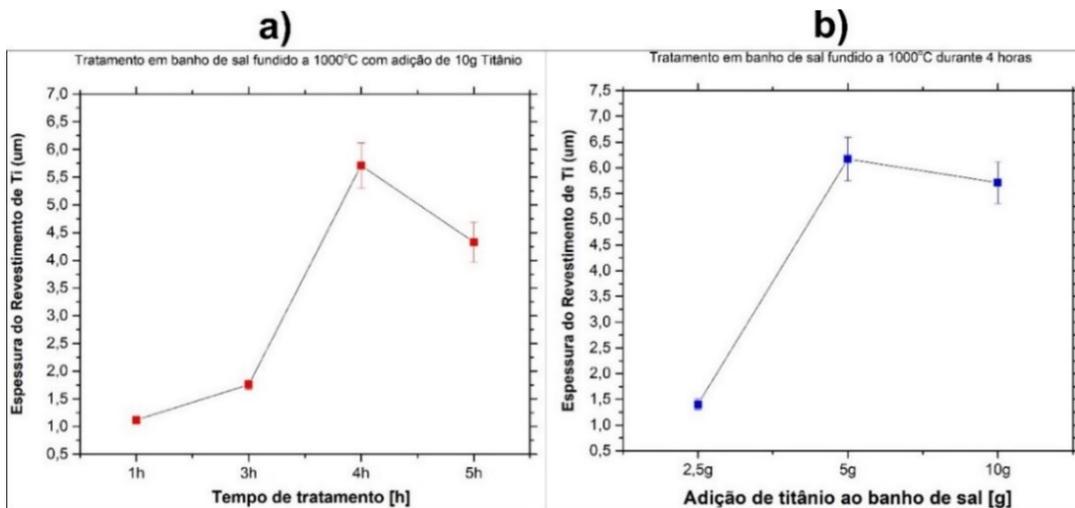


As espessuras das amostras tratadas com adição de 10g de Ti em banho de 1000 °C e durações de 1h, 3h, 4h e 5h são vistas nas Figuras 2d, 2e, 2c e 2f. Observa-se que, até 4h, o aumento da duração do tratamento resultou em um acréscimo na espessura do revestimento, seguindo a ordem: 10\_4h > 10\_3h > 10\_1h. No entanto, 5 horas de tratamento resultou em uma C2 com muitas discontinuidades e espessura inferior a amostra 10\_4h.

O gráfico com a influência do tempo de tratamento na espessura do revestimento é visto na Figura 3a. A amostra 10\_1h apresenta uma espessura de  $1,1 \pm 0,1 \mu\text{m}$ , aumentando para  $1,7 \pm 0,1 \mu\text{m}$  na amostra 10\_3h e  $5,7 \pm 0,4 \mu\text{m}$  na amostra 10\_4h. Resultando em uma elevação de até 3,4 vezes na espessura quando o tempo de tratamento é aumentado de 1 para 4 horas. A amostra 10\_5h possui uma camada de  $4,3 \pm 0,4 \mu\text{m}$  de espessura, mostrando uma limitação no tempo de tratamento.

A Figura 3b ilustra o impacto da concentração de Ti na espessura da camada. A adição de 2,5% resultou em uma camada de  $1,4 \pm 0,1 \mu\text{m}$  de espessura, expressivamente menor que as amostras 5\_4h e 10\_4h, que exibem revestimentos de  $6,1 \pm 0,1 \mu\text{m}$  e  $5,7 \pm 0,4 \mu\text{m}$ . O acréscimo na adição de Ti de 2,5g para 5g, causou um aumento de 4,3x na espessura da camada. A análise estatística indica não haver diferença significativa entre as adições de 5g e 10g de Ti.

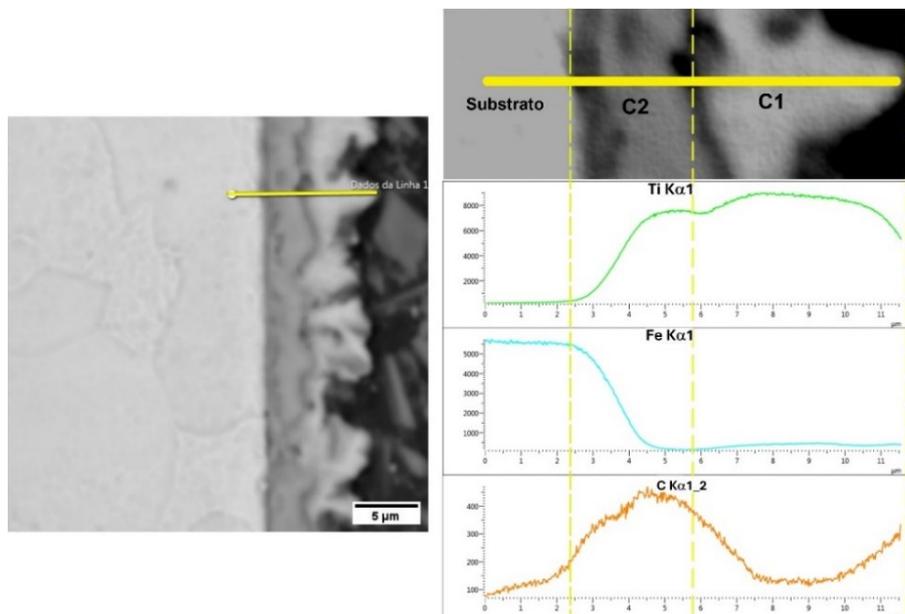
Figura 3- Variações da espessura da camada nas amostras tratadas a 1000°C em diferentes condições, a) função do tempo, b) função da concentração de Ti



A composição do banho pode ser a causa do revestimento irregular da amostra 10\_5h. Quando o titânio reage no banho de sal fundido, podem ser formados compostos como  $TiCl_2$ ,  $TiCl_3$  e  $TiCl_4$ . Essas reações são favorecidas pela presença de um excesso de titânio e ocorrem mais intensamente em áreas maiores (14,15). Portanto, é possível que a morfologia e a espessura da camada da amostra 10\_5h estejam relacionadas à redissolução do titânio que já estava depositado.

A Figura 4 apresenta a microanálise da composição elementar de linha por EDS na amostra 10\_4h.

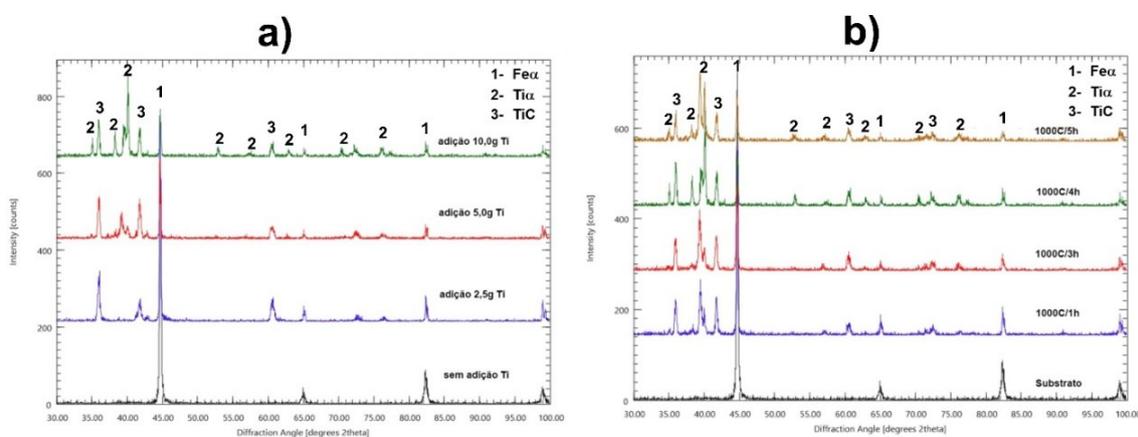
Figura 4- EDS de linha da seção transversal da amostra 10\_4h, indicando o local da varredura em linha.



Observa-se que a concentração de Fe diminui na interface substrato/C2, atingindo valores próximos a zero na região C1/C2. O Ti exibe alta concentração na C2, começando a declinar na região C1/C2 até quase zero no substrato. O C, por sua vez, inicia o aumento da concentração no substrato, com um crescimento acentuado na região C1, seguido por uma diminuição até a região C2. Esses dados confirmam que a região C1 é predominantemente composta por titânio, enquanto a região C2 é uma combinação de Fe, Ti e C.

A Figura 5a ilustra a proporção de fases encontrada no substrato e na série de tratamentos em banho de sais fundidos a 1000°C durante 4h, com adições de titânio de 2,5%, 5% e 10%. Observa-se que a quantidade de ferrita diminuiu sistematicamente com o aumento da quantidade de titânio adicionado. Esse comportamento se deve não apenas ao óbvio aumento da concentração de Ti, mas também à diferença de espessura entre as camadas. A difração de raios X identifica as fases existentes em um volume da amostra, cuja profundidade é micrométrica, pois os fótons de raios X possuem uma penetração superior a espessura da camada de Ti depositado, obtendo assim, dados tanto do substrato quanto do revestimento. Dessa forma, sugere-se que parte da ferrita encontrada nos ensaios possa ser proveniente do substrato, esse efeito é evidenciado em camadas mais finas e já foi relatado em estudo anterior (8).

*Figura 5- Difração de raios-X das amostras tratadas em 1000 °C, a) substrato e concentração de Ti b) substrato e duração do tratamento.*



Ao adicionar 2,5g de titânio ao banho, ocorreu uma formação considerável de carbonetos de titânio, com apenas uma pequena quantidade de titânio livre, provavelmente devido à baixa concentração de titânio no banho. No entanto, ao adicionar 5g e 10g adicionais de Ti, a quantidade de titânio livre aumentou, resultando

em uma diminuição na formação de carbonetos de titânio. Os difratogramas do substrato e das amostras preparadas no banho de sal fundido a 1000°C com adição de 10g de titânio em diferentes períodos de tratamento são mostrados na Figura 5b. Nota-se a formação de novas fases sobre a ferrita em todas as condições, com a quantidade de ferrita diminuindo com o aumento do tempo de tratamento, enquanto as quantidades de titânio livre e carbonetos de titânio aumentaram.

A espessura da camada depositada depende do tempo de tratamento e da difusividade dos átomos envolvidos no processo, sendo a difusividade altamente influenciada pela temperatura (12,17). Considerando o processo termodinâmico, a formação de TiC ocorre primeiro, o que pode inibir a difusão de Fe para Ti (16). A difusividade do  $\gamma$ -Fe em  $\beta$ -Ti (fases encontradas a 1000 °C) é significativamente maior do que a do  $\beta$ -Ti em  $\gamma$ -Fe. No entanto, quando a concentração de Fe no  $\beta$ -Ti atinge 15%, essa difusividade cai até quatro ordens de grandeza, tornando-se inferior à do  $\beta$ -Ti em  $\gamma$ -Fe e à do Ti em  $\beta$ -Ti (16,17).

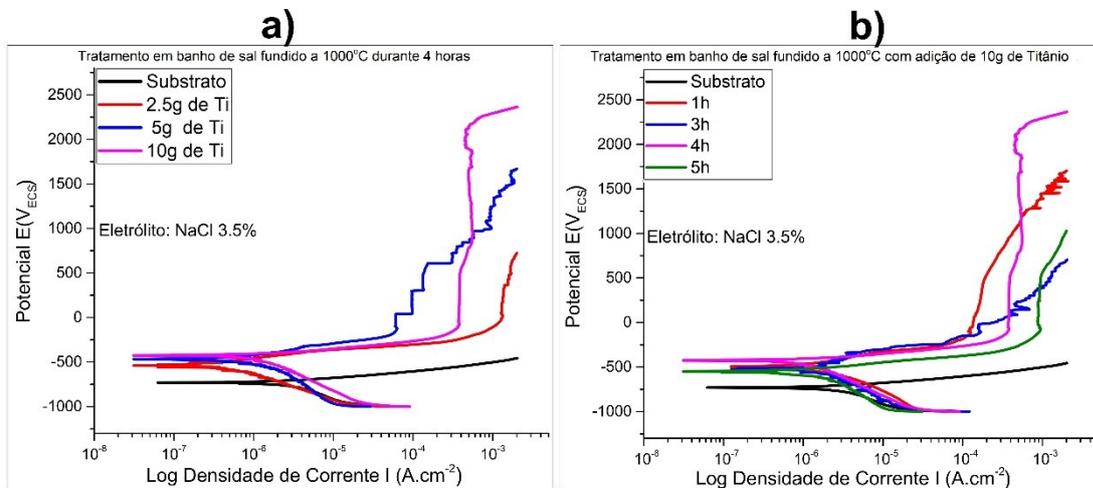
Com os dados apresentados, é possível supor o mecanismo de formação do revestimento: inicialmente, formou-se o TiC, mas devido à limitada concentração de C no substrato, não houve inibição da difusão de Fe no Ti. Isso resultou no crescimento da C2, composta por TiC e uma fração de Fe-Ti. Ao atingir 15% de Fe no  $\beta$ -Ti, a difusão do Fe reduziu drasticamente. Com a crescente concentração de Ti na camada e a maior velocidade de difusão do Ti no  $\beta$ -Ti, a camada C1 começa a crescer rapidamente, sendo composta basicamente por Ti livre. A falta de homogeneidade dessa camada possivelmente é causada pelo rápido crescimento e/ou pela redissolução do Ti para o banho.

A análise da Figura 6a revela que a adição de Ti ao banho resultou em camadas que apresentam uma resistência à corrosão muito superior à do substrato. Os potenciais de corrosão ( $E_{corr}$ ) deslocaram-se para valores positivos em até 300 mV, sinalizando uma melhoria considerável na tendência do material a corroer. Além disso, a densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) apresentou uma diminuição de até três vezes.

A análise da Figura 6b confirma o aumento significativo na resistência à corrosão em todos os tempos de tratamento testados, seguindo um comportamento semelhante ao das amostras anteriores. Novamente, observa-se o deslocamento dos potenciais de corrosão ( $E_{corr}$ ) para valores positivos, indicando uma maior resistência

à corrosão. Ao mesmo tempo, a corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) diminui, refletindo uma taxa de corrosão reduzida.

Figura 6- Curvas de polarização potenciodinâmica das amostras tratadas em 1000 °C, a) substrato e concentração de Ti b) substrato e duração do tratamento.



Todas as amostras tratadas exibem um aumento significativo da densidade de corrente ( $i$ ) em potenciais ( $E$ ) próximos a -300 mV, seguido de uma estabilização ou desaceleração da  $i$ , sugerindo uma tentativa de repassivação. No entanto, as amostras 2,5\_4h, 10\_3h e 10\_5h não conseguem atingir a repassivação, experimentando um rápido aumento da  $i$ . Por outro lado, as curvas das amostras 10\_1h e 5\_4h demonstram sucessivas repassivações, com a  $i$  aumentando gradualmente até  $E$  próximos a 2000 mV.

A amostra 10\_4h mostra uma repassivação eficiente, com a densidade de corrente estabilizando-se e mantendo-se até 2000 mV. No entanto, a partir desse ponto, a  $i$  começa a crescer novamente até atingir 2 mA em um  $E$  de 2500 mV. De acordo com estudos anteriores (6,10), o aumento da resistência à corrosão dos revestimentos de Ti e TiC deve-se à formação de filmes de  $TiO_2$ , que protegem o substrato dos íons de Cl, evitando sua dissolução anódica.

Além disso, a resistência à corrosão do revestimento não depende apenas de sua espessura, mas também da homogeneidade da camada (6). Ao observar as micrografias, fica evidente que os revestimentos com maior eficiência de passivação apresentam uma camada mais homogênea.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o método de deposição termo-reativa utilizando cavacos de titânio reciclados é viável para aplicar revestimentos em aços.

A concentração de Ti adicionada ao banho influencia a espessura e a morfologia do revestimento. As adições de 5g e 10g resultaram em camadas com natureza duplex (região interna rica em TiC e externa rica em Ti livre), sendo até 4,3 vezes mais espessas que a amostra com 2,5g de Ti adicionado.

O revestimento também foi influenciado pelo tempo de tratamento. Verificou-se que, nos testes com duração de 4 horas e com adições de Ti superiores a 5%, foram formadas camadas de natureza duplex que eram até 3,4 vezes mais espessas e possuíam concentrações de Ti até 25% mais elevadas em comparação aos tratamentos de 1 e 3 horas. Entretanto, foi observado que o tratamento com duração de 5 horas apresentou sinais de dissolução da camada, indicando que períodos superiores a 4 horas não são eficazes para o método utilizado.

Os resultados obtidos evidenciaram a capacidade dos revestimentos na proteção do substrato, conferindo maior resistência à corrosão ao aço ARBL. Isso comprova a aplicabilidade do método de deposição termo-reativa utilizando cavacos de titânio reciclados na obtenção de revestimentos protetores em aços.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A empresa Implalife Indústria Produtos Médico Odontológicos pelo fornecimento dos materiais.

## REFERÊNCIAS

- (1) M. Najafizadeh *et al.*, "Classification and applications of titanium and its alloys: a review," **Journal of Alloys and Compounds Communications**, p. 100019, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.JACOMC.2024.100019.
- (2) G. Li, S. Chandra, R. A. Rahman Rashid, S. Palanisamy, and S. Ding, "Machinability of additively manufactured titanium alloys: A comprehensive review," **J Manuf Process**, vol. 75, pp. 72–99, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2022.01.007.
- (3) A. M. Moreno-Uribe, J. Gedael Fagundes Jr, I. L. Criscuolo, T. Hassel, and A. Q. Bracarense, "Flux Filling Rate Effect on Weld Bead Deposition of Recycled Titanium Chip Tubular Wire," **International Journal of Precision Engineering and**

**Manufacturing-Green Technology**, pp. 19–27, Aug. 2024, doi: 10.1007/s40684-024-00658-0.

(4) “Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700) 1”, doi: 10.1520/F0067-13R17.

(5) M. Hourmand, A. A. D. Sarhan, · Mohd Sayuti, and · Mohd Hamdi, “A Comprehensive Review on Machining of Titanium Alloys,” **Arab J Sci Eng**, vol. 46, no. 3, pp. 7087–7123, 2021, doi: 10.1007/s13369-021-05420-1.

(6) A. Günen, B. Soylu, and Ö. Karakaş, “Titanium carbide coating to improve surface characteristic, wear and corrosion resistance of spheroidal graphite cast irons,” **Surf Coat Technol**, vol. 437, May 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128280.

(7) M. S. Karakaş, “Tribocorrosion behavior of surface-modified AISI D2 steel,” **Surf Coat Technol**, vol. 394, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125884.

(8) B. Kurt, L. Özdoğan, B. Güney, Ö. S. Bölükbaşı, and A. Günen, “Characterization and wear behavior of TiBC coatings formed by thermo-reactive diffusion technique on AISI D6 steel,” **Surf Coat Technol**, vol. 385, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125332.

(9) N. Lin *et al.*, “Preparation of titanizing coating on AISI 316 stainless steel by pack cementation to mitigate surface damage: Estimations of corrosion resistance and tribological behavior,” **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, vol. 129, pp. 387–400, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jpics.2019.01.029.

(10) J. López-Cuevas, J. L. Camacho-Martínez, J. C. Rendón-Angeles, M. I. Pech-Canul, and J. Méndez-Nonell, “Thermochemical method for coating AISI 316L stainless steel with Ti,” **Materials Research Society Symposium Proceedings**, 2010, pp. 55–60. doi: 10.1557/proc-1243-7.

(11) A. Ghadi, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, and R. Gholizadeh, “A comprehensive review on the carbide-base coatings produced by thermo-reactive diffusion: microstructure and properties viewpoints,” **J Alloys Compd**, vol. 967, p. 171839, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2023.171839.

(12) T. Arai, “The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance,” in *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance*, Elsevier Inc., 2015, pp. 703–735. doi: 10.1533/9780857096524.5.703.

(13) J. Zhang *et al.*, “Anti-wear titanium carbide coating on low-carbon steel by thermo-reactive diffusion,” **Surf Coat Technol**, vol. 364, pp. 265–272, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.085.

(14) E. Chassaing, F. Basile, and G. Lorthioir, “Study of Ti (III) solutions in various molten alkali chlorides. I. Chemical and electrochemical investigation,” **J Appl Electrochem**, vol. 11, pp. 187–191, May 1981.

- (15) C. E. Baumgartner, "Controlled Potential Coulometric Method to Determine the Average Titanium Oxidation State of Titanium Chlorides in NaCl," *Anal. Chem.*, vol. 64, pp. 2001–2002, 1992.
- (16) M. Wang, Z. Luo, J. Yang, G. Xie, and Z. Liu, "Diffusion behavior and formation mechanism of compounds in titanium-steel bonding process at high temperature," *Mater Lett*, vol. 330, p. 133309, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATLET.2022.133309.
- (17) J. M. Auger *et al.*, "Comparison of thermal diffusion and interfacial reactions for bulk and sputtered titanium on 316L stainless steel," *Mater Chem Phys*, vol. 306, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128013.

## **TITANIUM COATING ON ARBL STEEL AFTER RECYCLING CHIPS IN MOLTEN SALT BATH USED FOR THERMO-REACTIVE DEPOSITION**

### **ABSTRACT**

Titanium and its alloys are expensive materials with excellent resistance to wear and corrosion. However, there is no market for machining residues (chips), which are commonly discarded as common scrap. This study investigates the application of titanium coating on steel surfaces using thermo-reactive deposition in a bath of molten salts (NaCl-KCl) with different concentrations of titanium chips (2.5%, 5%, and 10%). ARBL steel parts were treated at 1000°C for 1 to 5 hours. Analysis showed the formation of coating layers whose thickness and homogeneity varied according to the chip concentration and immersion time. The coatings were composed of an internal layer (substrate/coating interface) with good homogeneity, consisting of TiC and Fe-Ti intermetallic phases, and an external layer mainly composed of titanium. The results indicate that recycling titanium chips is viable for steel coatings.

**Keywords:** Titanium, molten salts, thermo-reactive deposition, steel.