

## **SUPERLUBRICIDADE EM ÁGUA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS À BASE DE SILÍCIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA**

FRANCIELE DIAS DE CASTRO<sup>1</sup>; HENARA LILLIAN COSTA <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [fran.dias\\_castro@hotmail.com](mailto:fran.dias_castro@hotmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Rio Grande – [henaracosta@furg.br](mailto:henaracosta@furg.br)

### **1. INTRODUÇÃO**

A tribologia estuda a interação entre duas superfícies em movimento relativo. Este campo de estudo é multidisciplinar e abrange três áreas principais: atrito, desgaste e lubrificação. A tribologia é de suma importância global, pois tem como objetivo otimizar o uso de energia e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A tribologia verde desenvolve soluções técnicas que levam em conta o equilíbrio ecológico e os impactos ambientais (HOLMBERG; ERDEMIR, 2017; JOST, 1990).

Na tribologia, há estudos em que o coeficiente de atrito do deslizamento entre duas superfícies é de cerca de  $10^{-3}$ , que é denominado superlubricidade. Diversos estudos experimentais foram conduzidos a respeito da superlubricidade ao longo das décadas (LI; LUO, 2013). Esses estudos foram conduzidos sobre materiais e lubrificantes que favorecem a superlubricidade realizados por alguns pesquisadores, como CHEN; KATO; ADACHI, (2001), WANG; KATO; ADACHI, (2004), XU KOJI KATO; HIRAYAMA, (1997), STREY, (2019). Os pesquisadores demonstram que, ao lubrificar materiais pares cerâmicos com água, obtém-se um baixo coeficiente de atrito, chegando-se à superlubricidade.

A pesquisa de STREY, (2019) mostrou que os pares cerâmicos de  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZTA}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZrO}_2\text{-ZTA}$  alcançam a superlubricidade devido à formação de filmes de baixo atrito quando lubrificados com água. A formação de filmes de baixo atrito em lubrificação com água pode ser interessante devido às reações triboquímicas que criam camadas superficiais de baixo atrito. Além disso, essas reações podem ser estimuladas pela presença de texturas superficiais (WANG; KATO; ADACHI, 2004). Existem diversas técnicas de texturização superficial (COSTA; HUTCHINGS, 2015), dentre elas a texturização eletroquímica sem mascaramento (RODRIGUES; COSTA; DA SILVA, 2021). Dessa forma, geralmente, esse processo tem um efeito combinado de diversos fatores, como a adsorção de água, a topografia das superfícies, reações químicas e tensões de contato (LUO; ZHOU, 2020).

Além de cerâmicos volumétricos à base de silício, pode-se também aventar a possibilidade de utilizar tais materiais na forma de revestimentos. Essa alternativa, além de reduzir custos, permite combinar propriedades mecânicas de um substrato metálico, como por exemplo maior tenacidade a fratura, com o desempenho tribológico do revestimento, uma vez que os fenômenos tribológicos são fundamentalmente superficiais (DE MELLO; COSTA, 2023).

Dentre as diversas formas possíveis para a deposição de revestimentos cerâmicos, destacam-se as técnicas de aspersão térmica. Os processos de aspersão podem ser divididos em dois grupos definidos pela fonte de energia utilizada: i. combustão e ii. fonte elétrica. O processo envolvendo combustão mais utilizado é denominado HVOF (High Velocity Oxy-fuel Flame), enquanto o processo com fonte de energia elétrica mais utilizado é o plasma spray.

Uma das principais fontes de sílica é a areia por possuir alta porcentagem de  $\text{SiO}_2$  (CARTER; NORTON, 2013). No entanto, a sílica pode ser encontrada em outras fontes. A cinza da casca de arroz (CCA), por conter em torno de 60% de sílica em sua composição, pode ser uma excelente fonte (ALMEIDA et al., 2019). A casca de arroz é o resíduo gerado da queima em fornalhas para a secagem e parabolização do arroz (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001). Apesar de apresentar problemas relacionados ao seu descarte, a CCA apresenta elevada concentração de sílica, o que a torna interessante e economicamente viável como matéria prima para aplicações na construção civil, como adsorvente de corantes orgânicos e para a produção de silicatos (ALMEIDA et al., 2019). Devido à concentração de sílica composta no CCA ela torna – se interessante para ser usada na produção de revestimentos de baixo atrito e elevada resistência ao desgaste pela técnica de aspersão térmica.

Dessa forma, o objetivo principal desse trabalho é verificar a hipótese de obter o fenômeno de superlubricidade em revestimentos por aspersão térmica à base de SiC, particularmente quando misturados à sílica proveniente de cinzas de casca de arroz, além de investigar a sinergia destes revestimentos com a texturização superficial.

## 2. METODOLOGIA

Os revestimentos serão feitos com pó de carbeto de silício (SiC) com CCA proveniente da pirólise para formar um revestimento compósito. A CCA será produzida no laboratório de Crescimento de Cristais Avançados e Fotônica da Universidade Federal de Pelotas. O substrato será aço inoxidável martensítico 440, escolhido por sua resistência à corrosão em água e suporte mecânico. Para garantir a fluidez do pó no plasma, as partículas devem ter mais de 60  $\mu\text{m}$  (MALIK et al., 2024).

Os substratos que serão texturizados antes de serem revestidos serão previamente preparados, começando com lixamento manual úmido para remover defeitos. Após a limpeza com álcool e secagem com ar quente, uma camada fina de resina é aplicada e fixada por *spin coating*. O substrato é pré-cozido a 90°C, seguido pela aplicação de uma máscara de textura e exposição à luz UV por 5 minutos. Depois, o substrato é mergulhado em ácido para remover a máscara, lavado com água corrente e cozido a 160°C. A texturização final é feita por eletroquímica.

Os revestimentos serão aplicados usando uma tocha de plasma de arco não transferido do Laboratório de Engenharia de Superfícies da Universidade Federal de Rio Grande (FURG), fabricada por FONSECA, (2024). O sistema de plasma spray é composto por tocha, sistema de refrigeração, cilindro de gás, fonte de energia e alimentador de pó (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014).

A primeira etapa experimental envolve calibrar o alimentador de pó, definindo a velocidade de rotação do disco no painel de controle para dosar a quantidade necessária. As partículas do compósito são transportadas pelo gás de trabalho para o injetor externo. A cada rotação, o pó foi ejetado por um minuto e, em seguida, pesado em uma balança analítica.

A produção dos revestimentos será complementada por uma colaboração com o Professor Doutor Pantcho Stoyanov da Universidade de Concordia, em Montreal, Canadá. A técnica usada para a produção de revestimentos por Pantcho e colaboradores (ROY et al., 2023) é a pulverização por plasma em suspensão (SPS). A SPS tem como objetivo assegurar que as partículas consigam superar a densidade do plasma e, dessa forma, penetrar no plasma de forma efetiva. No

sistema de plasma spray da Furg, não há equipamentos adequados para a injeção de uma suspensão no jato de plasma.

Os revestimentos de SiC + CCA serão polidos no Laboratório TRIBORRMAT da UFES, em parceria com o Prof. Dr. Nathan Strey, antes dos ensaios tribológicos. O polimento seguirá os parâmetros de STREY, (2019), utilizando uma politriz em duas etapas com cargas de 40, 50 e 60 N. Cada etapa usará diferentes fluidos abrasivos e panos de polimento, durando 20 minutos e uma distância deslizada do centro de cada amostra de 2301 m. As velocidades de rotação do disco e do suporte serão de 200 rpm e 50 rpm, respectivamente.

Antes dos ensaios de desgaste, a microdureza do revestimento será medida com penetrador Vickers. Este método, que utiliza uma pirâmide de base quadrada com ângulo de 136° entre as faces opostas e feita de diamante, é adequado para pequenas regiões selecionadas no corpo de prova. A carga aplicada será de 19,614 N por 50 segundos. Já a dureza será determinada seguindo a norma ASTM C1327(2008).

Nos primeiros ensaios tribológicos, a carga normal, velocidade e distância de deslizamento terão como base o ensino tribológico de STREY, (2015) com esfera de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> com diâmetro de 3,2 mm. Em sua pesquisa, STREY, (2015) obteve coeficiente de ultra baixo ( $\mu < 0,01$ ) para o par Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC com carga normal de 24,6 N, velocidade de deslizamento de 1m/s e distância de deslizamento de 3500m.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até o presente momento, apenas uma pesquisa bibliográfica foi realizada. A superlubricidade é um tema que requer muitos fatores. Uma revisão mais aprofundada ajuda a determinar o rumo da pesquisa. Os resultados esperados são que os revestimentos compostos por SiC e CCA apresentem baixo atrito, chegando à superlubricidade. Outro ponto a ser considerado é que a texturização melhore o desempenho do revestimento ao deslizar, o que, conseqüentemente, pode contribuir para superlubricidade.

### 4. CONCLUSÕES

Dessa forma, conclui-se que a superlubricidade é uma área que pode contribuir significativamente para a redução de CO<sub>2</sub> devido ao atrito ultra baixo, o que significa uma diminuição das perdas de energia por atrito e do desgaste que ocorre na superfície. Além disso, a redução do atrito contribui para uma redução nos custos de reparos ou reposição de peças, o que é extremamente benéfico para a indústria. Finalmente, a lubrificação a água é bem menos prejudicial ao meio ambiente que o uso de lubrificantes à base de hidrocarbonetos.

### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. R. et al. Black SiO<sub>2</sub> nanoparticles obtained by pyrolysis of rice husk. **Dyes and Pigments**, v. 164, p. 272–278, 2019.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials**. New York: Springer, 2013. 1v.

CHEN, M.; KATO, K.; ADACHI, K. Friction and wear of self-mated SiC and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sliding in water. **Wear**, v. 250, n. 1–12, p. 246–255, 2001.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429–448, 2015.

DE MELLO, J. D. B.; COSTA, H. L. Brazilian Tribology: origin, status quo and future perspectives. **IOP Publishing**, v. 11, p. 1–29, 2023.

FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. V. R.; BOULOS, M. I. **Thermal spray fundamentals: From powder to part**. New York: Springer, 2014. 1v.

FONSECA, M. G. **Produção e caracterização tribológica de revestimento composto de bronze e cinzas da casca de arroz depositado por aspersão térmica a plasma**. 11 abr. 2024. 113f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pelotas.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263–284, 2017.

JOST, H. P. TRIBOLOGY-ORIGIN AND FUTURE\*. **Wear**, v. 136, p. 1–17, 1990.

LI, J.; LUO, J. Advancements in superlubricity. **Science China Technological Sciences**, v. 56, n. 12, p. 2877–2887, 2013.

LUO, J.; ZHOU, X. Superlubricative engineering—Future industry nearly getting rid of wear and frictional energy consumption. **Friction**, v. 8, n. 4, p. 643–665, 2020.

MALIK, S. et al. Focused review on factors affecting martensitic stainless steels and super martensitic stainless steel passive film in the oil and gas field. **Journal of Solid State Electrochemistry**, p. 1–25, 2024.

RODRIGUES, T. A.; COSTA, H. L.; DA SILVA, W. M. Sliding wear behavior of electrochemically textured surfaces under different lubrication regimes: Effects of curvature radius. **Wear**, v. 477, p. 1–10, 2021.

ROY, A. et al. Friction and wear behavior of suspension plasma sprayed tantalum oxide coatings at elevated temperatures. **Surface and Coatings Technology**, v. 452, p. 1–12, 2023.

STREY, N. F. **Tribologia de cerâmicos dissimilares no deslizamento em água**. 9 set. 2015. 202f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.

STREY, N. F. **Superlubricidade no deslizamento de cerâmicos lubrificados com água**. 22 nov. 2019. 210f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.

WANG, X.; KATO, K.; ADACHI, K. The critical condition for the transition from HL to ML in water-lubricated SiC. **Tribology Letters**, v. 16, n. 4, p. 253–257, 2004.

XU KOJI KATO, J.; HIRAYAMA, T. The transition of wear mode during the running-in process of silicon nitride sliding in water. **Wear**. v. 205 p. 55–63, 1997.