

Atrito de Si₃N₄ contra Al₂O₃ em Água. Análise da Rugosidade e Concentração de Si no Tribofilme

Andrade, P. J. S.¹; Strey, N. F.¹; Balarini Jr., R.¹; Scandian, C.¹

¹ Engenharia Mecânica, UFES, Vitória, ES, Brasil

Resumo

O atrito do par cerâmico Si₃N₄-Al₂O₃ lubrificado com água foi investigado visando atingir o regime de ultra baixo coeficiente de atrito (UBCA), $\mu < 0,01$. Ensaios tribológicos foram realizados na configuração esfera de Si₃N₄ contra disco de Al₂O₃, sob carga de 25,6 N, velocidade 1 m/s, raio da circunferência da pista de desgaste de 17 mm e lubrificado com água deionizada. O valor de μ em estado estacionário atingiu 0,004. Análises de topografia superficial, imagens via MEV e análise química via EDS das superfícies desgastadas foram realizadas a fim de explicar os mecanismos que levam a um atrito tão baixo. Superfícies de desgaste extremamente lisas foram obtidas como resultado de um polimento triboquímico e um tribofilme rico em silício foi formado na superfície de desgaste dos discos de Al₂O₃. Acredita-se que ambos os fenômenos são condicionantes para o estabelecimento do regime de UBCA no deslizamento do par cerâmico Si₃N₄-Al₂O₃ lubrificado com água.

Keywords (Palavras chaves): Al₂O₃, Si₃N₄, lubrificação com água, ultra baixo coeficiente de atrito.

1. Introdução

Desde que foram relatados coeficientes de atrito (μ) de 0,002 em ensaios de deslizamento do par Si₃N₄-Si₃N₄ lubrificadas com água [1], o comportamento tribológico desses materiais tem sido estudado. O UBCA tem sido observado entre cerâmicos à base de silício [1,2] e mais recentemente entre o par Si₃N₄-Al₂O₃ [3], quando deslizando em água. Explicações a respeito do modo de lubrificação e mecanismos de desgaste envolvidos no fenômeno ainda não são evidentes.

O trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento do atrito do par Si₃N₄-Al₂O₃ lubrificado com água e sua relação com a rugosidade e concentração em peso de Si (%p.Si) no tribofilme formado.

2. Materiais e Métodos

Ensaios tribológicos foram realizados na configuração esfera sobre disco (Fig. 1) em um tribômetro PLINT TE67. A esfera de Si₃N₄ com diâmetro (d) de 11,11 mm e o disco de Al₂O₃ com diâmetro (D) de 54,0 mm. Demais propriedades dos materiais são mostradas na Tabela 1. As amostras foram limpas em banho ultrassônico de acetona e álcool etílico durante 10 minutos antes dos ensaios. Durante os ensaios, água

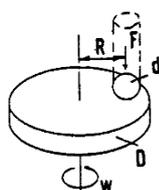


Figura 1. Princípio do ensaio esfera sobre disco segundo ASTM G99-05 [4].

deionizada foi utilizada como lubrificante.

Tabela 1. Propriedades dos Materiais

Propriedades	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
HV ₁ (GPa)	13,9	15,2
K _{IC} (MPa.m ^{1/2})	7,3	4,3
Densidade (g/cm ³)	3,2	3,9

Dois ensaios foram realizados à temperatura de 24 °C, velocidade de deslizamento de 1 m/s, esfera posicionada a uma distância (R) de 17 mm e carga (F) de 25,6 N. A força de atrito foi monitorada e μ foi calculado como a razão entre a força de atrito e a carga. Após os ensaios, imagens de MEV, análise química via EDS e caracterização topográfica 3D das superfícies de desgaste foram realizadas.

3. Resultados e Discussão

A Fig. 2 mostra o gráfico, característico dos ensaios realizados, de μ em função do tempo. Após 3100 s de um período oscilatório (*running-in*), observa-se uma queda

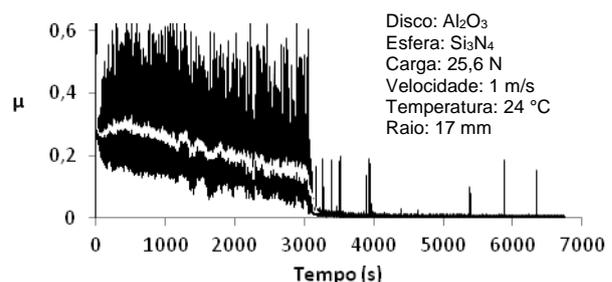


Figura 2. Gráfico de μ em função do tempo para o par tribológico Si₃N₄-Al₂O₃ lubrificado com água. A linha de tendência (em branco) foi construída com a média móvel de 60 pontos (10 s).

brusca até valores de μ de 0,004, o que comprova a obtenção de UBCA, que pode ser atribuído ao contato conforme e superfícies extremamente lisas, resultando em um regime de lubrificação ideal.

Balarini [3] em dois ensaios nas mesmas condições do presente trabalho, exceto pela carga, que era de 34,4 N, observou, após o *running-in* de duração de 2750 s, μ de 0,02. Neste trabalho, apenas utilizando uma carga menor, de 25,6 N, μ atingiu 0,004, embora a duração do *running-in* tenha aumentado, conclusão similar a que chegaram Jahanmir, Ozmen e Ives [2].

O UBCA neste par cerâmico está muito provavelmente associado à formação de um tribofilme rico em Si na superfície desgastada do disco. Acredita-se que o tribofilme seja constituído de sílica amorfa hidratada, proveniente de reações triboquímicas [5] e supõe-se que uma %p.Si mínima seja necessária. Em análises de EDS, Balarini [3] encontrou %p.Si de 5% em ensaios com $\mu > 0,01$ e superior a 10% em ensaios com $\mu < 0,01$. Neste trabalho, %p.Si acima de 15% foram observadas por análise de EDS na superfície desgastada do disco em regiões consideradas altamente polidas (Fig. 3, regiões 1 e 3), enquanto que em regiões consideradas rugosas %p.Si foi menor (em torno de 3%, região 2 da Fig. 3).

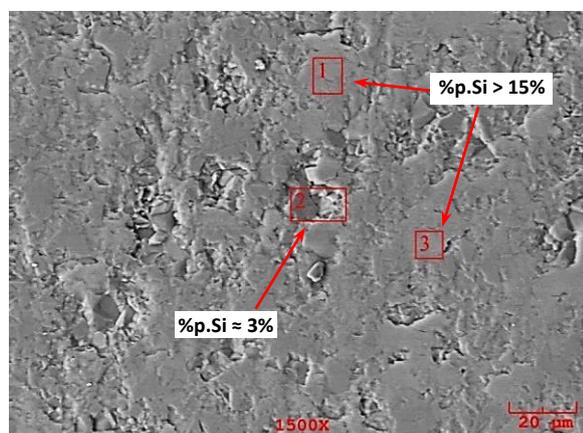


Figura 3. Imagem de MEV da superfície desgastada do disco de Al_2O_3 com tribofilme apresentando regiões com diferentes concentrações de Si.

A Fig. 4a mostra um perfil de rugosidade do disco de Al_2O_3 após o ensaio. É notável que na região desgastada (parte central do perfil de rugosidade, Fig. 4a) houve acentuada redução da amplitude e frequência dos picos e vales em relação à superfície original, ou seja, o desgaste promoveu um polimento. O parâmetro de rugosidade R_q , passou de 265 nm para 166 nm. É consenso na literatura que o UBCA depende da formação de superfícies com R_q de poucos nm. No entanto, os valores encontrados

indicam que o UBCA pode acontecer com R_q maior e sugere que este pode não ser um parâmetro suficiente para garantir lubrificação ideal. Para a esfera, o decréscimo de R_q foi insignificante, de 25 nm para 23 nm. Entretanto, sulcos de desgaste no sentido do deslizamento são formados, como mostra a Fig. 4b. Trabalhos futuros focarão no estudo do efeito desses sulcos na formação e estabilização do filme lubrificante.

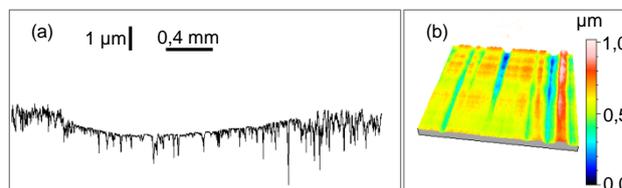


Figura 4. (a) Perfil de rugosidade do disco de Al_2O_3 ; (b) Topografia 3D de uma área de 1 mm^2 da calota de desgaste formada na esfera de Si_3N_4 .

4. Conclusão

O regime de UBCA, $\mu \approx 0,004$, foi observado no deslizamento entre Si_3N_4 - Al_2O_3 lubrificado com água. Nos tribofilmes dos discos, %p.Si $> 15\%$ em regiões polidas, enquanto que em regiões rugosas %p.Si $\approx 3\%$. O polimento triboquímico das superfícies, resultando em $R_q \approx 166 \text{ nm}$, proporcionou a obtenção de UBCA.

5. Agradecimentos

A ANP, PRH-29, LFC/USP e NEMOG.

6. Referências

- [1] TOMIZAWA, H.; FISCHER, T.E. Friction and wear of silicon nitride and silicon carbide in water: hydrodynamic lubrication at low sliding velocity obtained by tribochemical wear. *STLE Trans.*, v. 30, 1987, p. 41–46.
- [2] JAHANMIR, S.; OZMEN, Y.; IVES, L. K. Water lubrication of silicon nitride in sliding. *Tribology Letters*, v. 17, 2004, p. 409.
- [3] BALARINI JR, R. Ultra Baixo Coeficiente de Atrito No Deslizamento de Al_2O_3 - Si_3N_4 em Água: Estudo *AB INITIO* do *Running-in*. Dissertação de Mestrado, UFES, 2013.
- [4] ASTM G99-05 (2010). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/G0099-05R10.
- [5] XU, J.; KATO, K. Formation of tribochemical layer of ceramics sliding in water and its role for low friction. *Wear*, v. 245, 2000, p. 61–75.