

# Atrito de $\text{Si}_3\text{N}_4$ contra $\text{Al}_2\text{O}_3$ em Água. Análise da Rugosidade e Concentração de Si no Tribofilme

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

<sup>1</sup> Engenharia Mecânica, UFES, Vitória, ES, Brasil

## Resumo

O atrito do par cerâmico  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  contra disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 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  $\mu$  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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Acredita-se que ambos os fenômenos são condicionantes para o estabelecimento do regime de UBCA no deslizamento do par cerâmico  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  lubrificado com água.

Keywords (Palavras chaves):  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , lubrificação com água, ultra baixo coeficiente de atrito.

## 1. Introdução

Desde que foram relatados coeficientes de atrito ( $\mu$ ) de 0,002 em ensaios de deslizamento do par  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}_3\text{N}_4$  lubrificados 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  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  [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  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com diâmetro ( $d$ ) de 11,11 mm e o disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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

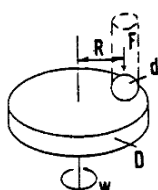


Figura 1. Princípio do ensaio esfera sobre disco segundo ASTM G99-05 [4].

deionizada foi utilizada como lubrificante.

Tabela 1. Propriedades dos Materiais

Propriedades	$\text{Si}_3\text{N}_4$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
$\text{HV}_1$ (GPa)	13,9	15,2
$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	7,3	4,3
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	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  $\mu$  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  $\mu$  em função do tempo. Após 3100 s de um período oscilatório (*running-in*), observa-se uma queda

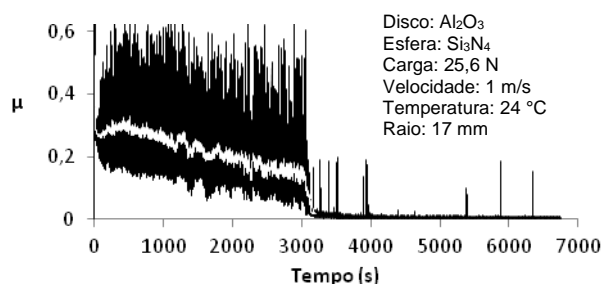


Figura 2. Gráfico de  $\mu$  em função do tempo para o par tribológico  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  lubrificado com água. A linha de tendência (em branco) foi construída com a média móvel de 60 pontos (10 s).

brusca até valores de  $\mu$  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,  $\mu$  de 0,02. Neste trabalho, apenas utilizando uma carga menor, de 25,6 N,  $\mu$  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).

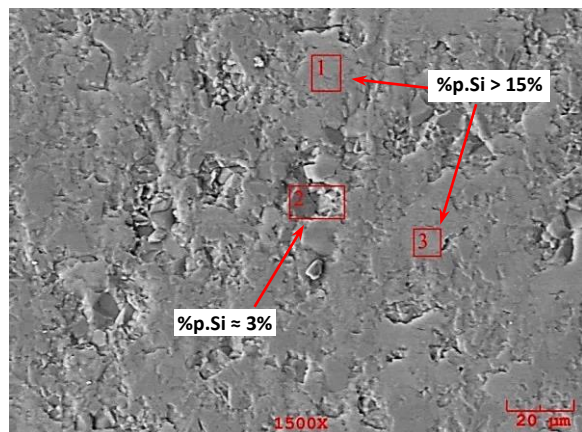


Figura 3. Imagem de MEV da superfície desgastada do disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com tribofilme apresentando regiões com diferentes concentrações de Si.

A Fig. 4a mostra um perfil de rugosidade do disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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.

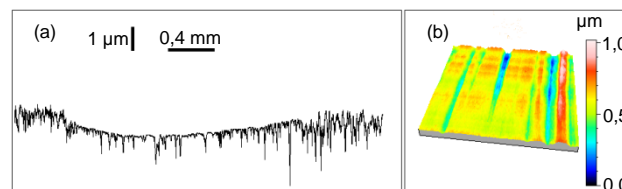


Figura 4. (a) Perfil de rugosidade do disco de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (b) Topografia 3D de uma área de  $1 \text{ mm}^2$  da calota de desgaste formada na esfera de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

## 4. Conclusão

O regime de UBCA,  $\mu \approx 0,004$ , foi observado no deslizamento entre  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  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  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4$  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.