

ESTUDO DO COEFICIENTE DE ATRITO E DO DESGASTE DE TITÂNIO E DE FILME DE DLC

Polyana Alves Radi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/CTA.
Pça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias. HTO – Ap. 401.
CEP 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil.
polyana@ita.br

Lúcia Vieira Santos

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
Laboratório Associado de Sensores – LAS.
Av dos Astronautas, 1.758 – Jardim Granja.
CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil.
santoslv@las.inpe.br

Luiz Francisco Bonetti

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
Laboratório Associado de Sensores – LAS.
Av dos Astronautas, 1.758 – Jardim Granja.
CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil.
dik@las.inpe.br

Gil Capote Rodrigues

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
Laboratório Associado de Sensores – LAS.
Av dos Astronautas, 1.758 – Jardim Granja.
CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil.
capote@las.inpe.br

Vladimir J. Trava-Airoidi

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
Laboratório Associado de Sensores – LAS.
Av dos Astronautas, 1.758 – Jardim Granja.
CEP: 12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil.
vladimir@las.inpe.br

Resumo: Neste trabalho são apresentados estudos iniciais de medidas do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste, em disco de liga titânio (Ti6Al4V) e em filmes de DLC hidrogenado, usando tribômetro pino sobre disco. As medidas foram realizadas em cinco velocidades e em atmosfera ambiente.

Palavras chave: DLC – Diamond-Like Carbon, liga de titânio, coeficiente de atrito e taxa de desgaste.

1. Introdução

Com os lançamentos de satélites cada vez mais sofisticados, cuja vida útil no espaço desejava-se ser a mais longa possível, a demanda por melhores materiais lubrificantes, que garantissem durabilidade e confiabilidade de movimentos entre juntas mecânicas em ambientes de alto vácuo, levou a uma corrida pela busca de novos materiais com características de baixos coeficientes de atrito. Assim esta área de pesquisa se tornou multidisciplinar a partir de meados da década de 1960 (Cunningham, 1994; Roberts, 1987). A ciência que se dedica ao estudo do desgaste e do atrito por meio dos movimentos inter-atômicos, inter-moleculares e também por meio da interação de superfícies é chamada de tribologia (Briscoe, 1990). As ligas de titânio possuem alto coeficiente de atrito e baixa resistência à abrasão. Ligas com maior resistência podem ser obtidas por um processo de anodização ou deposição de um filme como lubrificante sólido (Budinski, 1991). Os filmes de DLC (Diamond-Like Carbon) apresentam excelentes propriedades tribológicas, tais como alta resistência ao desgaste, alta dureza, baixo coeficiente de atrito, alta aderência e alta resistência à corrosão.

Atualmente, a lubrificação sólida tem encontrado aplicações no setor industrial, como por exemplo, nas indústrias têxteis e alimentícias, onde a contaminação de produtos em esteiras é fator indesejável (Grill, 1993). Dentre os materiais mais estudados, o MoS₂ tem sido bastante utilizado, pois apresentou boas propriedades de lubrificação e vem sendo utilizado há muito tempo em aplicações espaciais com bons resultados. A oxidação do filme de MoS₂ é um fator prejudicial à lubrificação sólida em atmosfera ambiente, pelo fato do filme se transformar em óxidos e sulfatos de

molibdênio. Com a oxidação, o MoS_2 muda de estrutura perdendo o efeito de lamelaridade característica deste tipo de filme (Santos, 2001; Miyoshi K, 1999).

Com a evolução da técnica CVD, por meio de descargas assistidas por rádio frequência e também por fontes geradoras de íons, como por exemplo, o “Ion Bean Assisted Deposition” – IBAD, se tornou possível produzir filmes finos de DLC com boa aderência em substratos metálicos para diversas aplicações (Aisenber, 1971). Atualmente, os temas em destaque na literatura visam à manutenção da dureza de filmes hidrogenados (Lemoine, 2004), na dopagem com flúor e outros elementos para diminuir a hidrofobicidade da superfície (Schulz, 2005) e ainda permanece a busca por valores ultra baixos de coeficiente de atrito em alto vácuo e diminuição do desgaste (Fontaine, 2004).

Neste trabalho foram feitas medidas, do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste, utilizando-se um pino de liga de titânio (Ti6Al4V) contra um disco de liga de titânio (par Ti/Ti) e contra um disco de liga titânio coberto por um filme de DLC (par Ti/DLC) em atmosfera ambiente com umidade próxima de 40%. As medidas foram realizadas em cinco diferentes velocidades de rotação do disco. O objetivo é avaliar o filme de DLC como lubrificante sólido assim com a influência da velocidade no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste.

2. Procedimento experimental

2.1. Preparação do Disco e Deposição do Filme

O disco foi lixado, utilizando-se diversas lixas d’água com granulação decrescente, e polido com solução de alumina contendo hidróxido de potássio (KOH) e ácido oxálico. A limpeza da superfície do substrato e a remoção da camada de óxido foram realizadas em um ultra-som com banho de acetona P.A. durante 10 minutos. Os discos de Ti6Al4V foram tratados até este ponto.

Para os discos cobertos com o filme de DLC houve também uma limpeza, imediatamente antes da deposição do filme, utilizando-se uma descarga DC-pulsada em atmosfera de argônio durante 5 minutos. A câmara de deposição e sua parte interna podem ser vistas na Fig. 1. O filme de DLC foi depositado utilizando-se uma descarga DC-pulsada e gás metano como atmosfera precursora. Para se obter alta aderência uma interface de silício foi depositada tendo-se o gás silano como atmosfera precursora. A pressão total dos gases durante toda a deposição foi de 8×10^{-2} Torr. A taxa de crescimento foi próxima de $2,5 \mu\text{m/h}$ e assim, obteve-se um filme com baixo estresse. A utilização de um catodo refrigerado permitiu que a deposição se desse a uma temperatura próxima à ambiente.

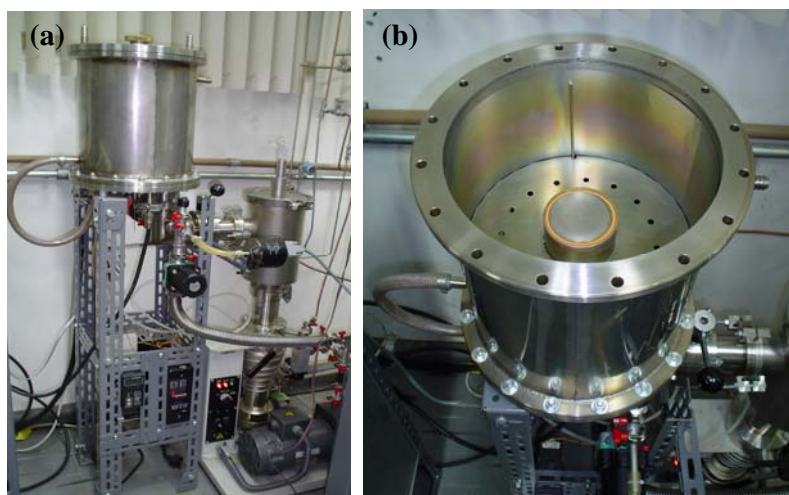


Figura 1. (a) câmara de deposição dos filmes de DLC e (b) vista superior de sua parte interna.

2.2. Caracterização Tribológica

O coeficiente de atrito foi avaliado utilizando-se tribômetro UMT pino sobre disco que é demonstrado na Fig. 2. O tribômetro possui um pino fixo e um disco giratório onde se pode controlar a carga aplicada pelo pino e a velocidade de rotação do disco. Os pares analisados foram: pino de Ti6Al4V contra disco de Ti6Al4V (par Ti/Ti) e pino de Ti6Al4V contra disco de Ti6Al4V coberto com filme de DLC (par Ti/DLC). Após 1.000 revoluções cada trilha formada no disco e a área desgastada no pino foram analisadas. Os ensaios foram realizados em cinco diferentes velocidades de rotação do disco sendo elas: 0,01; 0,05; 0,10; 0,50 e 1,00 m/s, e com uma força normal de 1N. Todas as medidas foram realizadas em atmosfera ambiente.

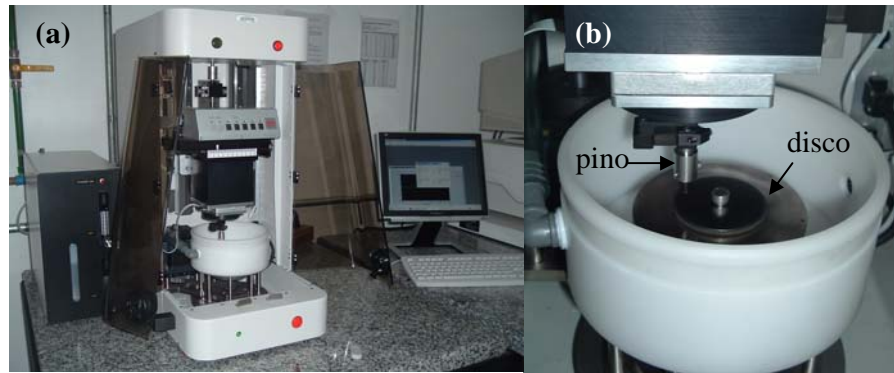


Figura 2. (a) tribômetro UMT que está localizado no laboratório associado de materiais e sensores dentro do centro de tecnologia especial que se encontra no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de São José dos Campos (LAS/CTE/INPE), (b) cuba do tribômetro com o disco e o pino em seu interior.

O volume perdido do pino foi calculado, utilizando-se a Eq. 1, a partir do diâmetro da área desgastada, mostrada na Fig.3 (b) e do raio pino. O volume perdido do disco foi calculado através da Eq.2 a partir do raio e da largura da trilha formada no disco. A taxa de desgaste do pino foi calculada conforme mostra a Eq. 3 e a taxa de desgaste do disco calculada segundo a Eq. 4 em função do volume perdido, da carga aplicada e da distancia percorrida. Todos esses cálculos foram feitos utilizando-se a norma STM G99.

$$VP_p = \frac{\pi DA_p^4}{64 r_p} \quad (1)$$

$$VP_d = \frac{\pi R_d L_d^3}{6 r_p} \quad (2)$$

$$TD_p = \frac{VP_p}{C.D} \quad (3)$$

$$TD_d = \frac{VP_d}{C.D} \quad (4)$$

Onde:

VP_p = Volume perdido do pino que é dado em mm^3 ;

DA_p = Diâmetro da área desgastada no pino, dada em $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;

r_p = Raio do pino;

VP_d = Volume perdido do disco que é dado em mm^3 ;

R_d = Raio da pista no disco;

L_d = Largura da pista no disco;

TD_p = Taxa de desgaste do pino;

TD_d = Taxa de desgaste do disco, dada em $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;

C = Carga aplicada em N;

D = Distância percorrida em metros;

O diâmetro da área desgastada no pino e a largura das trilhas no disco foram medidos utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3. Resultados e Discussão

A Figura 3(a) mostra uma fotografia do pino utilizado nos ensaios e a Fig. 3(b) mostra uma imagem obtida via MEV com ênfase no estado típico de sua ponta desgastada.

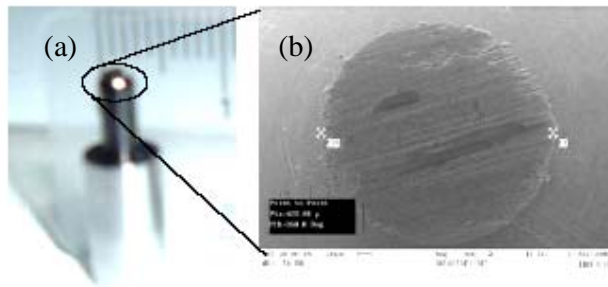


Figura 3. (a) pino de titânio utilizado no experimento; (b) imagem MEV da ponta desgastada.

A Figura 4(a) mostra uma imagem MEV das trilhas formadas no disco durante o atrito do par Ti/Ti com velocidade de 0,01m/s e a Fig. 4(b) com velocidade de 0.05 m/s de ensaio. Observa-se nesta figura que houve maior desgaste no disco que foi submetido a uma maior velocidade.

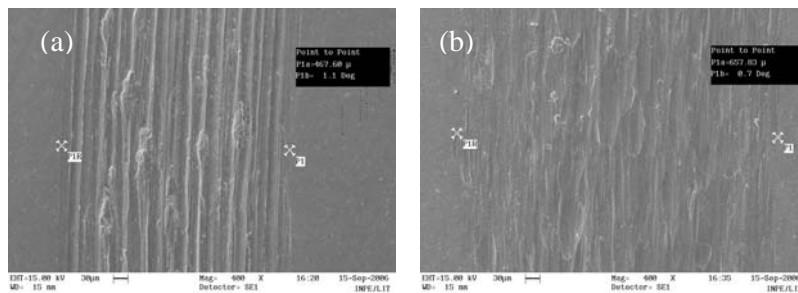


Figura 4. Imagem MEV das trilhas de desgaste no disco de Ti6Al4V em à: (a) 0,01m/s e (b) 0,5m/s, ambos com um aumento de 400x.

A figura 5 mostra uma imagem MEV com ênfase no desgaste do disco de Ti6Al4V na trilha formada durante o atrito com velocidade de 0,01m/s e com um aumento de 3.000 vezes. Pode ser observada a formação de escombros proveniente de um desgaste abrasivo.

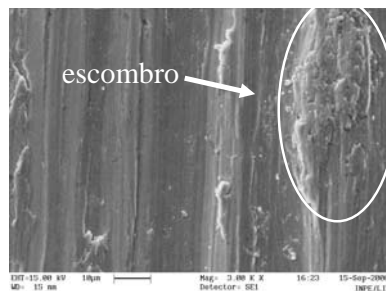


Figura 5. Imagem MEV da trilha de desgaste no disco de Ti6Al4V formada a uma velocidade 0,01m/s mostrando o escombros formado.

Na Figura 6 tem-se uma imagem MEV do disco de DLC. Não foi possível medir a taxa de desgaste dos discos com filme de DLC, pois não é possível determinar com a largura da trilha com precisão.

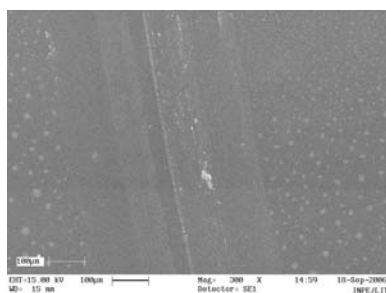


Figura 6. Imagem MEV da trilha típica de desgaste no disco de Ti6Al4V coberto com filme de DLC.

A Tabela 1 mostra os valores do coeficiente de atrito para o par Ti/Ti. Também são mostrados os valores do volume perdido e da taxa de desgaste tanto no pino quanto no disco. Pode-se observar que o volume perdido no disco é bem maior que no pino. Assim a taxa de desgaste do disco também é maior que a do pino. É possível verificar também que o volume perdido, do pino e do disco, aumenta com a velocidade.

Tabela 1 - Coeficiente de atrito do par Ti/Ti, volume perdido e taxa de desgaste do pino e do disco.

Velocidade (m/s)	Coeficiente Atrito Médio (μm)	Volume Perdido Pino (mm^3)	Volume Perdido Disco (mm^3)	Taxa Desgaste Pino (mm^3/Nm)	Taxa Desgaste Disco (mm^3/Nm)
0,01	0,154	0,00179	0,175	$3,28 \times 10^{-9}$	$3,20 \times 10^{-7}$
0,05	0,147	0,00153	0,387	$2,10 \times 10^{-9}$	$5,33 \times 10^{-7}$
0,10	0,155	0,00278	0,597	$2,98 \times 10^{-9}$	$6,42 \times 10^{-7}$
0,50	0,204	0,00466	1,44	$4,02 \times 10^{-9}$	$1,24 \times 10^{-6}$
1,00	0,670	0,0100	2,84	$7,11 \times 10^{-9}$	$2,01 \times 10^{-6}$

Na Tabela 2 encontram-se os valores do coeficiente de atrito para o par Ti/DLC. O volume perdido e da taxa de desgaste, tanto no pino quanto no disco também são encontrados. Pode-se observar que o volume perdido do pino foi constante com a velocidade e que a taxa de desgaste diminuiu visto que com uma velocidade maior a distância percorrida é maior. Como não foi possível visualizar a trilha de desgaste no filme de DLC, considerou-se que não houve desgaste significativo do disco.

Tabela 2 - Coeficiente de atrito do par Ti6Al4V/DLC, volume perdido e taxa de desgaste do pino de Ti6Al4V e do disco de Ti6Al4V coberto com DLC.

Velocidade (m/s)	Coeficiente Atrito Médio (μm)	Volume Perdido Pino (mm^3)	Volume Perdido Disco (mm^3)	Taxa Desgaste Pino (mm^3/Nm)	Taxa Desgaste Disco (mm^3/Nm)
0,01	0,0929	$8,142 \times 10^{-5}$	Não houve	$1,49 \times 10^{-10}$	Não houve
0,05	0,119	$8,142 \times 10^{-5}$	Não houve	$1,10 \times 10^{-10}$	Não houve
0,10	0,0765	$8,142 \times 10^{-5}$	Não houve	$8,76 \times 10^{-11}$	Não houve
0,50	0,101	$8,142 \times 10^{-5}$	Não houve	$7,03 \times 10^{-11}$	Não houve
1,00	0,14	$8,142 \times 10^{-5}$	Não houve	$5,77 \times 10^{-11}$	Não houve

A figura 7 mostra a variação do coeficiente de atrito com a velocidade para os pares Ti/Ti e Ti/DLC. Pode-se observar que o coeficiente de atrito para o par Ti/Ti aumenta bruscamente a partir de 0.05m/s e isso explica por que o desgaste também aumenta com a velocidade. A variação do coeficiente de atrito no filme de DLC, com a velocidade, é muito pequena justificando, assim, o fato de o volume perdido no pino ser constante.

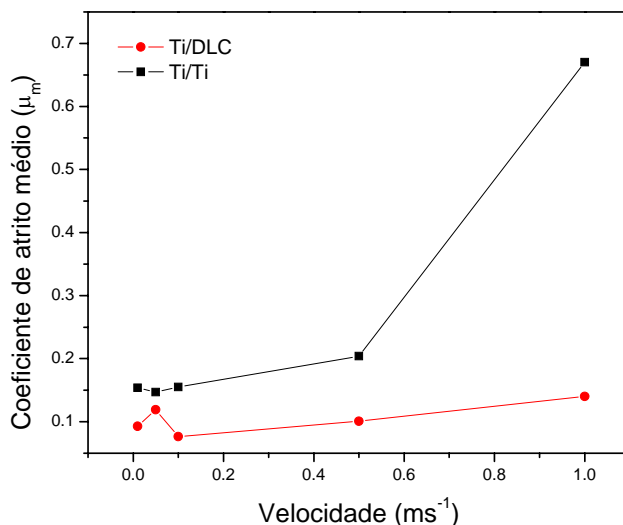


Figura 7. Variação do coeficiente de atrito com a velocidade para os pares Ti/DLC e Ti/Ti.

A relação entre a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito no par Ti/Ti pode ser vista na Fig. 8. Pode-se observar que o desgaste do pino, em relação ao disco, é praticamente constante. Já o desgaste do disco aumenta significativamente com a velocidade.

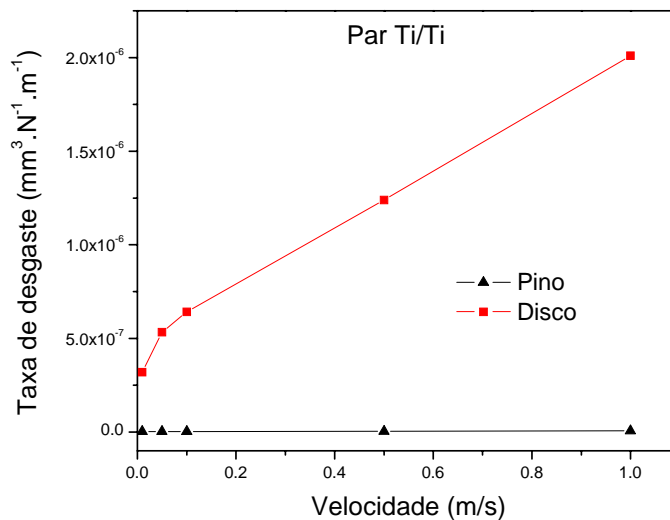


Figura 8. Relação entre a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito para o par Ti/Ti.

4. Conclusão

Os resultados demonstram que a aplicação do filme de DLC sobre a liga de titânio diminuiu bastante o desgaste tanto do pino quanto do disco. O coeficiente de atrito no filme de DLC também foi menor em relação ao disco de titânio em todas as velocidades. Para o par Ti/Ti pôde-se observar que quanto maior a velocidade maior o coeficiente de atrito, já no filme de DLC a variação do coeficiente de atrito com a velocidade é muito pequena.

Como o pino está sempre em contato com o disco e no disco a área de contato é constantemente renovada, esperava-se que o desgaste do pino fosse maior que o desgaste do disco. Como isso não ocorreu, fez-se uma análise da composição da esfera e descobriu-se que há uma pequena contaminação de silício que pode estar endurecendo a liga de titânio fazendo com que a esfera seja mais resistente ao desgaste. Mais estudos são necessários para determinar a origem do desgaste maior do disco assim como o desgaste menor do pino.

5. Agradecimentos

Agradecimentos à FAPESP e à CNPQ pelo apoio financeiro.

6. Referências

- Aisenber S., Chabot R. Ion-Beam Deposition of Thin Films of Diamond Like Carbon. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 42 (7): 2953-& 1971.
- Briscoe, H.M. "Why Space Tribology?". Tribology International, vol. 23(2), 69 (1990).
- Budinski, K.G. tribological properties of titanium alloys. Wear, vol. 151(2): 203-217 DEC (1991).
- Cunningham, J.M. "Tribometer Users Guide-Lines for Space Applications". ESTL/TM/139, (1994).
- Fontaine J., Loubet J. L., Le Mogne T, Et Al. Superlow friction of diamond-like carbon films: a relation to viscoplastic properties. TRIBOLOGY LETTERS 17 (4): 709-714 NOV 2004.
- Grill, A., Patel, V. "Tribological Properties of Diamond-like Carbon and Related Materials". Diamond and Related Materials, Vol. 2 597 (1993).
- Lemoine P., Quinn J. P., Maguire P., et al. Comparing hardness and wear data for tetrahedral amorphous carbon and hydrogenated amorphous carbon thin films. WEAR 257 (5-6): 509-522 SEP 2004.
- Miyoshi K., Aerospace mechanisms and tribology technology - Case study. TRIBOLOGY INTERNATIONAL 32 (11): 673-685 NOV 1999.
- Roberts, E.W. ET AL. A test facility for the in-vacuo assessment of dry lubricants and small mechanisms at cryogenic temperatures. Procc. of the 3rd European Space Mechanism & Tribology Symposium, Madrid, Spain. ESA. (1987).
- Santos L.V., Trava-Airoldi V, Iha K, et al. Diamond-like-carbon and molybdenum disulfide nanotribology studies using atomic force measurements. DIAMOND AND RELATED MATERIALS 10 (3-7): 1049-1052 Sp. Iss. SI MAR-JUL 2001.
- Schulz H., Leonhardt M., Scheibe H. J., et al. Ultra hydrophobic wetting behaviour of amorphous carbon films. SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 200 (1-4): 1123-1126 OCT 1 2005.