

COMPORTAMENTO DO PAR TRIBOLÓGICO GRAFITE-AÇO ANALISADO A PARTIR DA INFLUÊNCIA DO PLANO BASAL.

C. Oliveira^{1,2}, M.A.M. Souza², L.C. Pardini²

1 - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos – “Prof. Jessen Vidal”
Avenida Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 – CEP: 12247-014 – São José dos Campos - SP – Brasil. Telefone: (12) 3905-2423

2 - Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA)
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12228-901 - São José dos Campos – SP – Brasil. Telefone: (12) 3947-3000 – Email: mariamams@iae.cta.br

RESUMO: O presente trabalho avalia o comportamento de pares tribológicos formados por grafites extrudados policristalinos e aço 4340. Os ensaios foram efetuados com o intuito de correlacionar a distribuição dos planos basais do grafite, identificada por meio de análises de microscopia óptica com luz polarizada, em relação ao coeficiente de fricção resultante, por meio de um tribômetro de pino sobre disco. Os materiais estudados mostraram aumento nos valores de coeficiente de fricção com o aumento do domínio do plano basal perpendicular à superfície de contato do par tribológico.

PALAVRAS-CHAVE: coeficiente de fricção, plano basal, grafite, tribologia

ABSTRACT: The present study evaluates the tribological behavior of a pair formed by polycrystalline extruded graphite and 4340 steel. The testing were done aiming the correlation of the distribution of basal graphite planes, identified by optical microscopy with polarized light analysis, in relation to the resulting coefficient of friction, by means of a pin on disc tribometer. The materials studied showed an increase in the friction coefficient values with increasing area of the basal plane perpendicular to the pair tribological contact surface.

KEYWORDS: coefficient of friction, basal plane, graphite, tribology

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

A tribologia une os campos de mecânica, física, química e materiais aos conhecimentos de lubrificação, atrito e desgaste para prever o comportamento de sistemas físicos. Os principais temas do estudo da tribologia são o desgaste e o coeficiente de fricção [1]. Esses fenômenos são influenciados por uma variedade de fatores, sendo que os principais são a temperatura, as condições ambientais, os gases ou líquidos presentes e a formação de filmes superficiais durante o processo de desgaste. Os processos de desgaste podem ser lubrificados ou secos, podem ser de dois ou três corpos, conforme mostrado na Figura 1. Diferentemente do processo de interação de

dois corpos, no processo de três corpos, partículas presentes no sistema tribológico, ficam aprisionadas entre duas superfícies, gerando um sistema tribológico de três corpos. Inclusive, essas partículas podem ser oriundas da interação em um sistema de dois corpos, [2].

Materiais carbonosos, tais como o grafite, são de grande interesse em engenharia devido as suas propriedades térmicas, elétricas e lubrificantes, o que os torna materiais versáteis para aplicações nas áreas metalúrgicas, de materiais sensíveis, de transporte, entre outras.

Sob condições ambientais normais de umidade, o coeficiente de fricção (COF) do grafite é baixo ($\sim 0,20$), porque os planos basais predominam com orientações

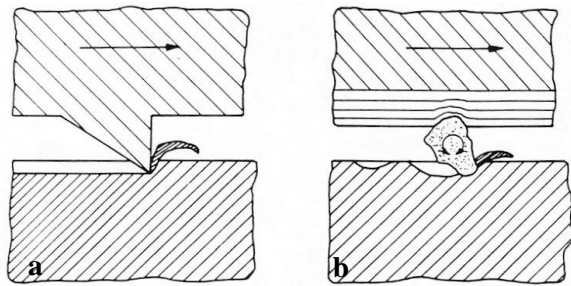


Figura 1 - Esquema de desgaste: a) a dois corpos, b) a três corpos [1].

praticamente paralelas à superfície. Esses planos possuem baixa energia superficial quando expostas umas as outras. Contudo, se for provocado um dano ao plano basal, regiões de alta energia são expostas, com maior capacidade de adesão, havendo um aumento expressivo no COF, podendo chegar a valores entre 0,4 e 0,6 [3, 4]. A Figura 2 mostra a célula da unidade básica estrutural do cristal de grafite,

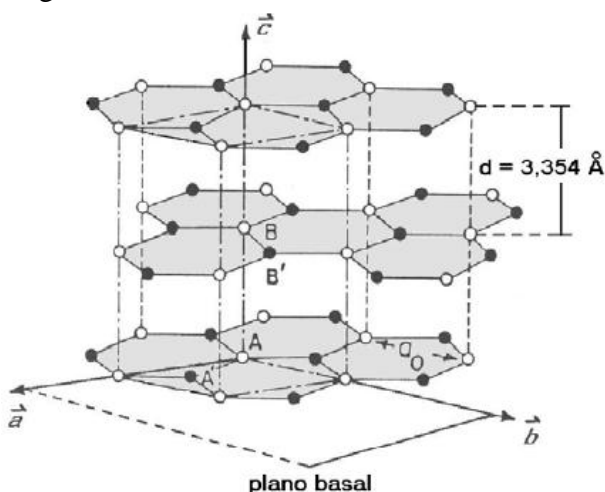


Figura 2. A estrutura hexagonal de um monocrystal de grafite [5].

A fricção e o desgaste são reduzidos se estas regiões forem neutralizadas pela ação de gases ativos, como por exemplo, o vapor de água. Esta ação lubrificante da água pode ser explicada como resultado da interação dos debris, partículas residuais de atrito, que podem atuar como um terceiro corpo na interação do par tribológico. A interação dos debris com o vapor de água forma, assim, um filme lubrificante por meio de adsorção física.

Este efeito diminui a interação entre as faces de contato, por meio da formação de um filme lubrificante, reduzindo a adesão entre elas, por neutralização das ligações químicas rompidas durante o processo de atrito, provocando, conseqüentemente, um decréscimo no coeficiente de fricção [6]. A formação do filme também está ligada diretamente à plasticidade dos debris formados, que indiretamente pode ser indicado pelo módulo elástico do material, uma vez que o coeficiente de atrito está associado a resistência ao cisalhamento interfacial e a dureza da superfície [7].

Em trabalho recente, Souza e Pardini [8] demonstraram uma relação direta entre o domínio óptico dos planos basais de grafites policristalinos industriais extrudados, calculado via técnicas de microscopia óptica (MO) [9] e o comportamento do COF, trabalhando com pares tribológicos semelhantes (contato entre pares do mesmo material). No estudo foi observado um aumento gradual do COF acompanhando o aumento da área do domínio do plano basal paralelo a superfície de contato. O presente trabalho avalia o comportamento tribológico dos mesmos grafites estudados por Souza e Pardini [8], formando pares tribológicos com aço 4340, em ambiente controlado a 20 °C e 50 % UR. Foi correlacionada a predominância do plano basal, identificada por meio de análises de microscopia óptica com luz polarizada (MOLP), ao comportamento tribológico, mensurado por ensaios em tribômetro de pino sobre disco, pela determinação do coeficiente de fricção.

1.2. Domínio óptico dos grafites

A unidade básica estrutural de um material gráfitico é sua célula unitária, conforme mostrado na Figura 2. Os materiais de carbono são geralmente observados por meio de reflexão com um microscópio óptico, devido a seus altos coeficientes de absorção em comprimentos de onda visíveis [10]. Os materiais de carbono, tais como o grafite, oticamente ativos apresentam superfícies visualizadas em tons de cores variando entre

azul, amarelo e rosa, quando observados em luz polarizada [10].

No caso do grafite este comportamento permite a verificação do arranjo dos planos, por meio de análise que consiste em isolamento das áreas de interesse e cálculo percentual relativo sobre a área total da amostra. Assim, as cores azul e amarela estão associadas à orientação das arestas do plano basal orientadas a $\pm 45^\circ$ em relação à superfície polida da amostra. A coloração rosa está associada à orientação perpendicular ao plano basal à luz incidente do microscópio, ou seja, o plano basal encontra-se paralelo à superfície polida, conforme mostrado na Figura 3 [9].

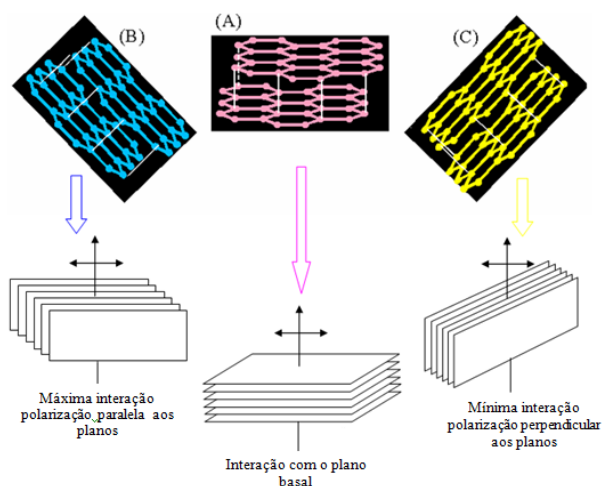


Figura 3. Representação esquemática das diferentes cores observadas em grafites por MOLP, (A) planos basais perpendiculares à luz incidente (B) e (C) planos basais posicionados a $\pm 45^\circ$ em relação à luz incidente [9].

A Figura 4 ilustra a visualização dos planos de um grafite antes e após a separação, realizada por tratamento computadorizado da imagem, no trabalho realizado por Souza e Pardini [8].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste trabalho foi utilizada uma amostra de aço 4340 e três amostras de grafites

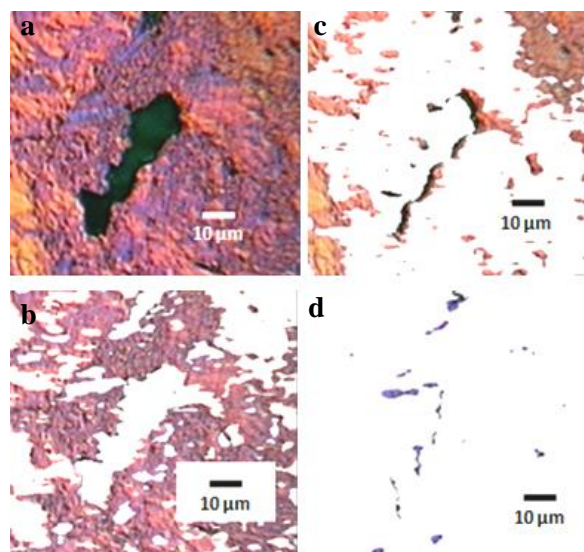


Figura 4. Domínio óptico de um grafite: a) superfície sem separação de planos, b) plano basal paralelo à superfície da amostra (rosa), c) e d) plano basal com incidência de luz a $\pm 45^\circ$ vértices (amarelo e azul).

comerciais policristalinos. Na Tabela 01 é apresentada a caracterização do aço 4340.

Tabela 1. Especificação técnica do aço 4340.

Propriedade	
Resistência a tração (MPa)	930 – 1100
Limite de elasticidade (MPa)	800 - 950
Dureza (HB)	280 - 340
Alongamento (%)	10 - 18

Foram utilizadas duas amostras de grafite oriundas da SGL Carbon Group (HLM-85 e HLS). Uma outra amostra de grafite foi manufaturado pela TOKAY Carbon, FE250. Estes materiais passam a ser identificados, respectivamente, como HLM, HLS e FE. Suas propriedades, fornecidas pelos fabricantes e baseadas no trabalho de Souza e Pardini [8] são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Especificação técnica dos grafites.

Propriedade	HLM	HLS	FE
Massa Específica (g.cm ⁻³)	1,75	1,81	1,75
Dureza Rockwell "R"	86	105*	82*
Tamanho do Grão (mm)	≤ 0,8	≤ 0,4	≤ 0,8
Módulo Elástico, (GPa)	11,0	15,9	(-)
Plano basal perpendicular a superfície (rosa)*	64,5*	80,9*	55,1*
Plano basal ± 45 ° (amarelo + azul)*	35,5*	19,1*	44,1*

(-) não reportado em especificação *[8]

2.2 Metodologia

O ensaio de pino sobre disco foi desenvolvido de acordo com a norma ASTM G 99 – 05 (*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*) [11], que entre outros meios possibilita a avaliação do comportamento tribológico pela avaliação do COF. O tribômetro utilizado é do tipo pino sobre disco, representado na Figura 5.

O braço suporte é acoplado a uma célula de carga que por meio de um controlador digital capta os dados da força normal aplicada e da força de atrito gerada entre o par na área de contato. Desta forma é possível calcular o COF pela Equação 1.

$$COF = \frac{Fat}{Fn} \quad (1)$$

Onde Fat = força de atrito e F_n = Força normal.

As condições complementares aplicadas ao ensaio foram: velocidade tangencial aplicada ao berço rotativo, 0,34 m.s⁻¹, a carga 38,8 N e a distância em que o par é mantido

em contato durante a rodagem, 200 m. As condições de ensaio foram selecionadas respeitando as limitações operacionais impostas pelo tribômetro, pois a norma não impõe condições específicas ao ensaio. Na Figura 6 são mostrados os dimensionais aplicados ao pino e ao disco.

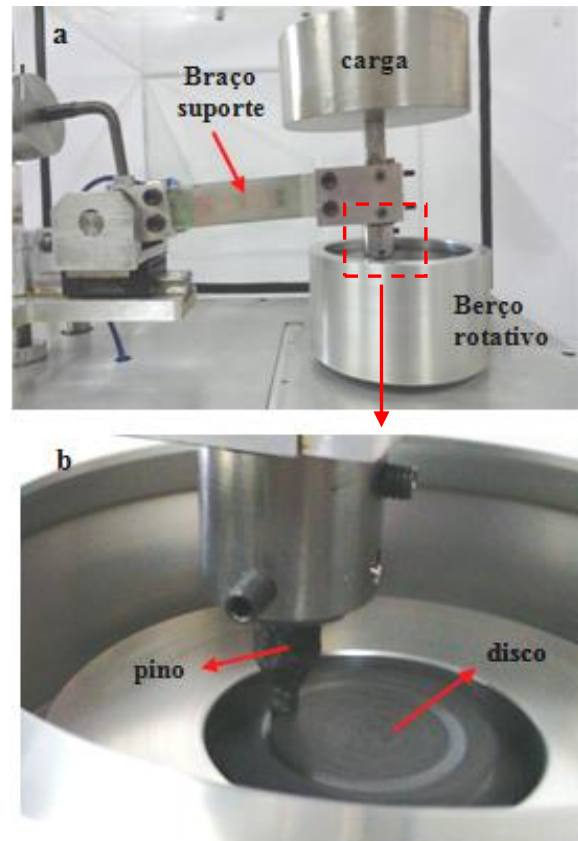


Figura 5. a) visão geral do tribômetro de pino sobre disco, b) detalhe da área de contato entre pino e disco.

As amostras de grafite e do aço foram usinados a partir de tarugos de 50 mm de diâmetro. Tanto o pino quanto o disco foram usinados de tal forma que as superfícies das faces de contato estivessem sempre no sentido do eixo de fabricação dos mesmos, conforme ilustrado na Figura 6.

Para a montagem dos pares foi convencionado a confecção da pista em aço e os pinos em grafite, originando 03 pares montados de acordo com o exposto na tabela Tabela 3.

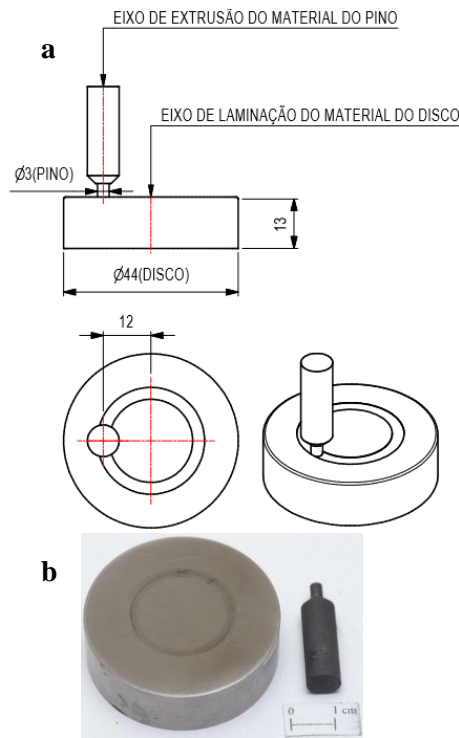


Figura 6. a) Dimensional (mm) dos pares, pino e disco, utilizados no ensaio, b) imagem de um disco e um pino pós usinagem.

Tabela 3. Pares tribológicos utilizados no ensaio

Par	Pino	Disco
1	HLM	
2	HLS	Aço 4340
3	FE	

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 7 ilustra o comportamento do COF em função da distância de contato percorrida pelos pares tribológicos identificados na Tabela 3, considerando os primeiros dois metros de deslizamento.

A linha pontilhada no gráfico da Figura 7 limita dois estágios no comportamento dos pares tribológicos no decorrer do ensaio. No primeiro estágio, no início do movimento, ocorre o rompimento da força estática e são formados os primeiros debris. Neste estágio o par tribológico, com o pino FE possui

comportamento destacado dos demais pares, devido à formação imediata do filme lubrificante, notada pela rápida estabilização da curva do coeficiente de atrito.

No segundo estágio ocorre a estabilização do COF dinâmico, representado pelas curvas que tomam forma linear, com pequenos picos de oscilação, caracterizando a formação dos filmes de lubrificação sobre a pista de aço.

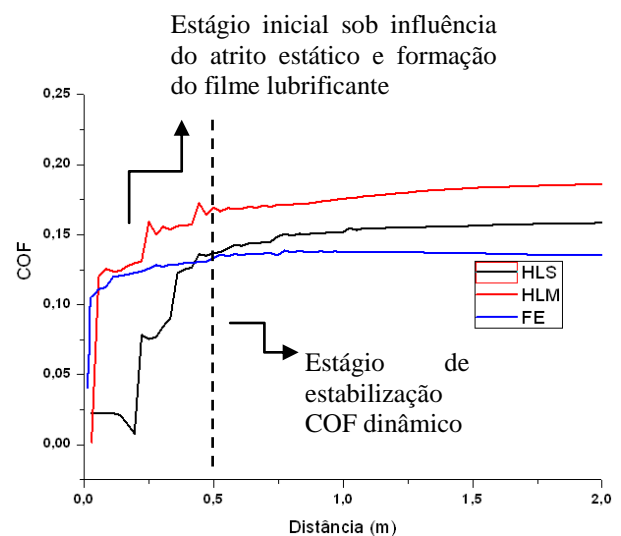


Figura 7. Comportamento do COF em função da distância de deslizamento nos 2 metros iniciais do ensaio tribométrico.

A Figura 08 ilustra o comportamento completo do COF dos pares ensaiados e a Tabela 4, apresenta os resultados de COF calculados no estágio de estabilização.

O par contendo o pino HLS apresentou o maior valor médio de COF, assim como o maior desvio. O HLS é o grafite que apresentou maior domínio do plano basal perpendicular a face de contato dos componentes do par, 80,9% contra 64,5% e 55,1% para o grafite HLM e FE respectivamente [8]. O grafite FE apresentou menores valores médios e mínimos de COF, associado ao menor valor de domínio do plano basal perpendicular ao movimento. Os valores mais elevados de COF para o grafite HLS (módulo 15,9 GPa) podem ser também aliados

a baixa plasticidade de seus debris, frente ao HLM (módulo 11,0 GPa).

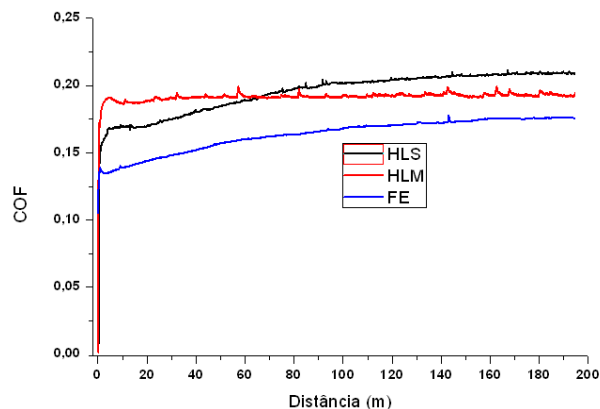


Figura 8. Comportamento do COF em função da distância de deslizamento ao longo dos 200 m de deslizamento.

Tabela 4. Resultados de COF para os pares ensaios no tribômetro de pino sobre disco, identificados pelo pino em uso.

Pino	COF
HLM	0,192 ± 0,002
HLS	0,196 ± 0,015
FE	0,163 ± 0,011

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram diferenças entre os pares friccionais o que pode ser explicado considerando a evolução do desgaste sobre o plano basal paralelo à superfície de atrito e perpendicular ao movimento de atrito, que é predominante na amostra HLS. Esse fato contribui para um maior poder de adesão, entre pino e disco, a partir da evolução dos danos gerados às ligações destes planos com conseqüente aumento de 20% no coeficiente de fricção (de 0,163 para 0,196).

A plasticidade dos resíduos formados durante o desgaste dos pares tribológicos influenciam diretamente no comportamento do filme lubrificante, o que pode ser analisado

por meio da dureza ou o módulo elástico do material.

5. REFERÊNCIAS

- [1] ZUM-GAHR, K-H. (Ed). Classification of wear processes. In: _____ **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987. (Tribology Series, 10). p.80-131
- [2] ORTHWEIN, W. C. **Clutches and brakes desing and selection**. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 2004. Mechanical engineering, v. 168.
- [3] FOUQUET, S. et al. Tribological behavior of composites made carbon fibres and ceramic matrix in the Si-C system. **Wear**, v. 264, n. 9-10, p. 850-856, Apr. 2008.
- [4] BERMAN, D. et al. Graphene: a new emerging lubricant. **Materials Today**, v. 17, n. 1, p. 31-42, Jan./Feb. 2014.
- [5] DRESSELHAUS, M. S.; DRESSELHAUS, G.; EKLUND, P. C. Carbon materials. In: _____. **Science of fullerenes and carbon nanotubes**, San Diego: Academic Press, 1996. cap. 2, p.15-30.
- [6] LANCASTER, J. K. A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear. **Tribology International**, v. 23, n. 6, p.371-389, Dez.1990.
- [7] YU, S., et al., "Tribological properties of carbon/carbon composites with various pyrolytic carbon microstructures", **Wear**, v. 304, n. 1-2, pp. 103-108, July 2013.
- [8] Souza, M.A.M and Pardini, L. C. Influence of basal plane domains in the tribological behavior of graphites. **Matéria (Rio J.)**, Sept 2016, vol.21, no.3, p.706-713.
- [9] VON DOLLINGER, C. F. A.; PARDINI, L. C. Optical characterization of polycrystalline graphites by image analisys. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARBONO, 5., 2011, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABCarb, 2011. v. 1. p. 322-326.
- [10] SAVAGE, G., *Carbon-carbon composites*, London, Chapman & Hall, 1993.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G99-05**: standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM, 2010.