

# DESENVOLVIMENTO DE UM PARÂMETRO DE SEVERIDADE GLOBAL PARA O ESTUDO DO DESGASTE DE TERMOPLÁSTICOS<sup>1</sup>

Carlos Henrique da Silva<sup>2</sup>  
Amilton Sinatora<sup>3</sup>

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito da carga normal aplicada, da velocidade de deslizamento, do acabamento superficial e do tipo de contra-corpo, no comportamento tribológico dos materiais poliméricos POM e UHMWPE. Foram realizados ensaios de desgaste em um tribômetro do tipo pino-contra-disco, com os pinos de materiais poliméricos e os discos de alumina e aço inoxidável. Nestes ensaios utilizou-se 3 valores de carga, 3 velocidades de deslizamento e 3 níveis de acabamento superficial do contra-corpo. Para cada condição foram realizados 3 ensaios. Durante os ensaios, foram monitoradas a temperatura próxima à interface dos materiais, a força de atrito e o deslocamento vertical do pino, o qual foi utilizado para a determinação da taxa de desgaste do polímero. A distância percorrida foi de 3.500 metros e os ensaios foram realizados em ambiente com umidade relativa controlada em  $50 \pm 5$  %. As análises por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de desgaste dos pinos e dos discos indicaram a ocorrência de três tipos de mecanismos de desgaste: a abrasão, a fadiga e a transferência de filme (adesão). Para analisar o comportamento ao desgaste é proposto um parâmetro de severidade global (PVR/DD). Considerou-se a relação entre um fator mecânico (condição de pressão e velocidade, PV), um fator topográfico (rugosidade do contra-corpo, R) e um fator térmico (difusividade térmica dos materiais em contato, DD). Como foi observado que o deslocamento vertical ocorre devido não somente ao desgaste, mas também à fluência do polímero, à atuação de diferentes mecanismos de desgaste e ao fenômeno da fusão, os resultados finais foram organizados na forma de mapas de desgaste em função da severidade global. O efeito dos níveis de desgaste dos materiais poliméricos são influenciados pela condição de severidade global do contato; entretanto, o efeito preponderante foi o tipo de material do contra-corpo.

**Palavras-chave:** Tribologia; Mapas de desgaste; Polímeros; Fluência.

## DEVELOPMENT OF GLOBAL SEVERITY PARAMETER FOR WEAR STUDY OF THERMOPLASTICS

### Abstract

The present work has as objective to study the effect of the applied normal load, the sliding velocity, the roughness and the type of counter-face, in the wear behavior of polymeric materials: POM and UHMWPE. Was used a pin-on-disc tribometer, with the polymeric pins and alumina and duplex stainless steel discs. In these tests were used 3 values of load, 3 sliding velocity and 3 level of surface finishing of counter-face. For each test conditions 3 assays had been carried through. During the tests, was monitored the temperature near of the contact, friction force and the vertical displacement of the pin, which was used for determines the wear rate of polymers. The covered distance was of 3.500 meters and the tests had been carried through in environment with controlled relative humidity in  $50 \pm 5$  %. To analyze the wear behavior was proposed a global severity parameter (PVR/DD). Was considered mechanical factors (PV values), a topographic factor (roughness of counter-face, R) and a thermal factor (thermal diffusivity of the materials in contact, DD). It was observed that the vertical pin displacement not occurs only due to the wear, but too the polymer creep. The wear results were organized in the form of wear maps that considered three phenomena: creep, wear and melting. Was observed that the more important parameter of the tribosystem is the capacity of heat dissipation from the contact region.

**Key words:** Tribology; Wear maps; Polymer; Creep.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Laboratório de Superfícies e Contato – LASC, Universidade Tecnológica federal do Paraná - UTFPR

<sup>3</sup> Laboratório de Fenômenos de Superfícies – LFS, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

## INTRODUÇÃO

Um das etapas de grande importância no desenvolvimento de um projeto mecânico é a seleção dos materiais. Esta tarefa se torna um pouco mais complicada, quando o componente em questão necessita ser dimensionado a luz de suas características tribológicas. É muito comum nestes casos que os dados obtidos junto à literatura sejam muitos divergentes, pois tanto o coeficiente de atrito quanto a resistência ao desgaste são propriedades do sistema.

Ashby e Jones<sup>(1)</sup> apresentam uma inovadora técnica de seleção de materiais também para situações onde o critério de falha é a taxa de desgaste. Em sua carta n° 16, busca-se ranquear materiais para aplicações tribológicas, principalmente em função das condições de carregamento e da área de contato, no entanto, para os polímeros é extremamente necessário se considerar informações como o calor gerado na região de contato, a temperatura atingida na superfície do par tribológico, a umidade relativa do ambiente, além do acabamento superficial. Ou seja, verificar a condição PV-limite não é suficiente para selecionar um polímero para uma aplicação tribológica.

A utilização de modelos matemáticos para prever o coeficiente de atrito<sup>(2-4)</sup> e a resistência ao desgaste<sup>(5-7)</sup> de materiais poliméricos pode tornar-se frustrante quando o modelo em questão não contempla informações como as mudanças dimensionais e alterações nas condições de contato.

Em algumas circunstâncias a solução passa pela realização de ensaios laboratoriais acelerados para compreender o comportamento dos materiais em condições de contato semelhantes às encontradas em campo. Além de reduzir custos com a construção de protótipos, consegue-se verificar o comportamento de uma família de materiais em período de tempo bastante reduzidos. No entanto, a situação mais comum é a impossibilidade de simulação em laboratório das condições de trabalho encontradas em campo.

Sendo assim, é possível perceber uma lacuna nas tradicionais técnicas de seleção de materiais poliméricos, principalmente pela desconsideração das características viscoelásticas e pela influência da temperatura atingida na região do contato, tanto no comportamento mecânico, quanto nas propriedades tribológicas destes materiais. Neste sentido, a condição PV continua sendo um parâmetro de extrema importância, principalmente pela limitação da ocorrência de desgaste severo por amolecimento e fusão.<sup>(8)</sup>

Além da influência da carga e da velocidade de deslizamento, Barret *et al.*<sup>(9)</sup> mostram que o acabamento superficial possui papel fundamental na ocorrência de diferentes mecanismos de desgaste nos polímeros, os quais estão intrinsecamente ligados com os valores de coeficiente de atrito. Bartenev e Lavrentev<sup>(10)</sup> indicam que, em ensaios contra corpos rígidos, os principais mecanismos de desgaste que atuam nos polímeros seriam a fadiga e a abrasão e além disto, quanto mais altas as asperezas do corpo rígido, maior seria a intensidade destes mecanismos. Stupack *et al.*<sup>(11)</sup> utilizam a dimensão fractal de uma superfície como uma informação mais representativa, na caracterização tribológica de uma superfície. Guimarães<sup>(12)</sup> conseguiu uma boa correlação entre a dimensão fractal de superfícies e o parâmetro de rugosidade combinado **InRz/InSm**. Este parâmetro expressa de uma forma combinada, os efeitos de amplitude (parâmetros escalares de altura – Ra, Ry, Rz, etc.) com efeitos de espaçamento de rugosidades (parâmetros de separação - Sm).

Parte da energia dissipada durante o processo de atrito entre duas superfícies é percebida pelo aumento da temperatura na região do contato. Friedrich *et al.*<sup>(13)</sup> e Samyn e De Baetz<sup>(14,15)</sup> têm conseguido relacionar propriedades térmicas de polímeros, como condutividade e difusividade térmica, com transições de regimes de desgaste de POM homopolímero deslizando contra aço carbono. Friedrich *et al.* também propõem o uso do parâmetro Número de Peclet, o qual representa a energia térmica transportada por convecção, para caracterizar termicamente um tribossistema em regimes de 'alta' ou 'baixa' velocidade de deslizamento.

Porém, principalmente durante os estágios iniciais de trabalho de um tribossistema contendo ao menos um material polimérico, mais especificamente os termoplásticos, deve-se verificar a possibilidade de falha deste sistema também do ponto de vista da integridade estrutural, ou seja, além da ocorrência de desgaste também pode ocorrer o fenômeno da fluência. Lee e Pienkowski<sup>(16)</sup> mostram que uma deformação mecânica inicial em UHMWPE, a qual reduz a intensidade da fluência durante o uso, pode contribuir para uma redução da taxa de desgaste deste material principalmente nos períodos de amaciamento (*running-in*).

A compreensão e identificação dos mecanismos de desgaste que um polímero apresenta em um dado sistema, também pode ser considerado como uma ferramenta de seleção de material e/ou identificação de parâmetros de controle de um tribossistema. Pesquisadores como Briscoe,<sup>(17)</sup> Lancaster<sup>(18)</sup> e Bahadur<sup>(19)</sup> nos mostram a importância do conhecimento dos mecanismos de desgaste atuantes e de como, a partir destes, é possível desvendar o comportamento tribológico destes materiais.

A revisão da literatura mostrada acima nos indica que para compreender o comportamento tribológico dos materiais poliméricos é necessário que uma análise global de todas as variáveis do sistema sejam consideradas, portanto, neste trabalho será apresentado um estudo da influência da carga aplicada, da velocidade de deslizamento e do acabamento superficial, na taxa de desgaste de termoplásticos, UHMWPE e POM. A partir dos resultados encontrados será proposto um parâmetro de severidade do sistema, que além das condições PV e do nível de acabamento superficial do contra-corpo, também considere a capacidade de dissipação do calor dos pares em contato. Desta forma, será possível propor uma ferramenta de análise, um "mapa de comportamento", que englobe além da resistência ao desgaste, também a sua rigidez dimensional, fluência, e a fusão.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para se determinar o comportamento tribológico dos polímeros, utilizou-se um tribômetro tipo pino-contra-disco, modelo TE-67 de fabricação PLINT & PARTNERS LTD, pertencente ao Laboratório de Fenômenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (LFS-PME-EPUSP). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do tribômetro, mostrando uma vista em corte e outra em perspectiva, com os principais componentes presentes no cabeçote do equipamento.

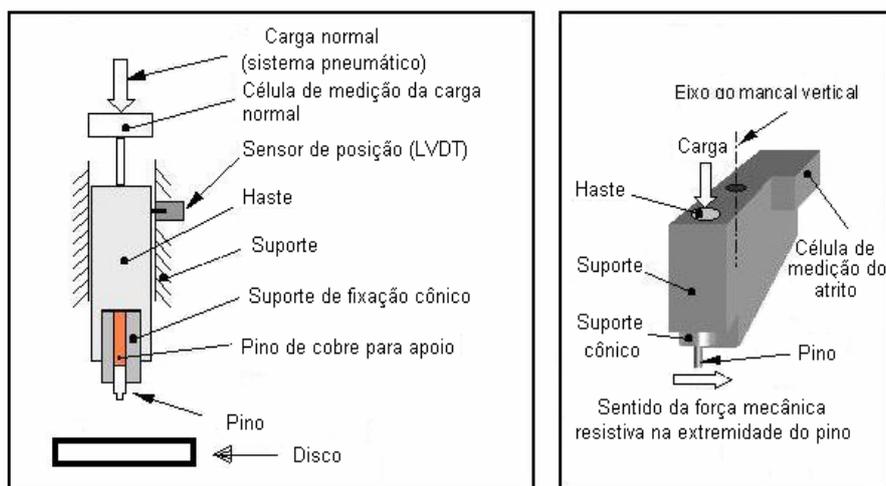


Figura 1. Vista lateral do tribômetro e desenho esquemático do cabeçote.<sup>(20)</sup>

Nos ensaios para a determinação da taxa de desgaste, segundo as recomendações da Norma ASTM G-99,<sup>(21)</sup> foram utilizados pinos de UHMWPE (UTEC 6540 – Braskem) e de POM copolímero (Hostaform® - Ticona) e discos de aço inoxidável duplex (ferrítico-austenítico) e de alumina pura ( $Al_2O_3$ ). As dimensões dos pinos foram: 20 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro e as dos discos foram: 5 mm de espessura e 65 mm de diâmetro. Os discos de aço inoxidável foram fornecidos pela Divisão de Metalurgia do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e pelo Departamento de Metalurgia e Materiais (PMT-EPUSP) e são compostos de uma matriz de austenita (58%) e grãos de ferrita (42%). Os discos de material cerâmico foram obtidos pela sinterização de pó de alumina pura A-1000 ALCOA. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades relevantes dos materiais dos discos e dos pinos.

Tabela 1. Propriedades dos materiais dos pinos e dos discos.<sup>(20)</sup>

PROPRIEDADES	Unidade	UHMWPE	POM
T <sub>m</sub> = Temperatura de fusão	[°C]	143	166
T <sub>g</sub> = Temperatura de transição vítrea	[°C]	-95	-65
D = difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]	2,57 x 10 <sup>-7</sup>	1,42 x 10 <sup>-7</sup>
Hv = Dureza (Vickers)	[MPa]	68,7	166,8
τ <sub>e</sub> = tensão de escoamento por tração	[MPa]	25	66
E = módulo de elasticidade	[MPa]	832	2300
φ = Alongamento até a ruptura	[%]	467,4	64,2
τ <sub>r</sub> = tensão de ruptura ao cisalhamento	[MPa]	30,4	63,0
τ <sub>r</sub> . φ = resistência a abrasão	[MPa]	142,1	40,5
Peso molecular viscosimétrico - MM	[g/mol]	6 x 10 <sup>6</sup>	7 x 10 <sup>4</sup>
Grau de cristalinidade	[%]	59,9	69,2
		<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>AÇO INOXIDÁVEL</b>
Condutividade Térmica	[W/mK]	17	30
Difusividade Térmica	[m <sup>2</sup> /s]	7,84 x 10 <sup>-6</sup>	2,21 x 10 <sup>-5</sup>
Módulo de Elasticidade	[GPa]	370	170

A preparação das superfícies dos discos foi realizada mediante o processo de lixamento manual unidirecional com lixas de papel abrasivo (alumina) de diversas granulometrias. A Tabela 2 mostra as condições de acabamento (Ra e lnRz/lnSm), a

granulometria dos papeis abrasivos, além de um código de identificação de cada faixa de acabamento.

**Tabela 2.** Características topográficas dos discos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e aço inoxidável duplex.

Discos	Granulometria das lixas	Faixa de acabamento	Parâmetro In Rz / In Sm	Código
$\text{Al}_2\text{O}_3$	60	$1,5 < \text{Ra} < 2,0 \mu\text{m}$	0,573	R4
	320	$0,3 < \text{Ra} < 0,6 \mu\text{m}$	0,297	R3
Aço Inoxidável	180	$0,3 < \text{Ra} < 0,6 \mu\text{m}$	0,336	R3
	320	$0,05 < \text{Ra} < 0,2 \mu\text{m}$	0,019	R2

Para caracterizar o acabamento superficial dos discos, foram realizadas cinco medições de rugosidade, utilizando rugosímetro com apalpador de  $2 \mu\text{m}$  de diâmetro de ponta, em três direções espaçadas a cada  $120^\circ$ , totalizando 15 medidas em cada disco.

A taxa de desgaste [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ], foi determinada pela medição da variação da altura dos pinos (deslocamento  $\Delta h$ ) durante os ensaios, com a utilização de um sensor linear de posição (LVDT) e pela distância percorrida pelo pino sobre o disco (3.500 metros). Os ensaios de desgaste foram realizados com cargas de 50, 100 e 200 N e velocidades de deslizamento de 0,1; 0,5 e 1,0 m/s. Os ensaios foram realizados em ambiente com umidade relativa controlada em  $50 \pm 5 \%$ .

Sendo os materiais termoplásticos muito susceptíveis aos efeitos da fluência, a simples determinação da variação de altura dos pinos durante os ensaios de desgaste, não seria informação suficiente para se determinar a taxa de desgaste destes materiais, pois os valores de variação da altura dos pinos possui, além da parcela de perda de massa (desgaste -  $\Delta w$ ), também uma parcela devido a deformação por efeito da fluência. Para se obter o comportamento quanto à fluência dos materiais poliméricos, utilizou-se o próprio tribômetro como equipamento capaz de aplicar uma força constante (50, 100 e 200 N) por até 12 horas e de medir as deformações longitudinais ( $\Delta \epsilon$ ) devido a esforços de compressão à temperatura ambiente.

A partir dos resultados dos ensaios de fluência dos polímeros em função do tempo para os três níveis de carga, obtêm-se curvas de ajuste que caracterizam o comportamento do material. Derivando estas curvas de ajuste em função do tempo, obtêm-se a taxa de deformação longitudinal, em  $\mu\text{m}/\text{h}$ . Com base nas velocidades de deslizamento utilizadas nos ensaios de desgaste, obtêm-se os valores de variação de altura do pino polimérico em  $\mu\text{m}/\text{m}$ , a mesma unidade da taxa de desgaste.

Para a determinação do trabalho de adesão ( $W_{ab}$ ) dos pares tribológicos, utilizou-se o método de Folkes *apud* Wu,<sup>(22)</sup> o qual admite que a energia de superfície ( $\gamma$ ) dos materiais é composta pela somatória de duas componentes distintas: uma componente polar e outra de dispersão (não-polar). Para a determinação dos valores de energia de superfície foi utilizado o método da gota séssil, com o qual medem-se os ângulos de contato de um líquido em relação a uma superfície de um sólido. O líquido polar utilizado foi água destilada e o de dispersão o diiodometano.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados de temperatura na superfície dos pinos, dos resultados de fluência à temperatura ambiente e do comportamento sob fluência à temperaturas foi

possível fazer as correções dos dados de taxa de desgaste obtidos nos ensaios de desgaste.<sup>(23)</sup> As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados corrigidos de taxa de desgaste dos polímeros nos tribossistemas estudados. Os valores apresentados em vermelho enfatizam os resultados onde a fluência foi considerada relevante. As condições de ensaio onde aconteceu a fusão cristalina do polímero estão apresentadas em magenta.

**Tabela 3.** Taxa de desgaste [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] dos ensaios POM.

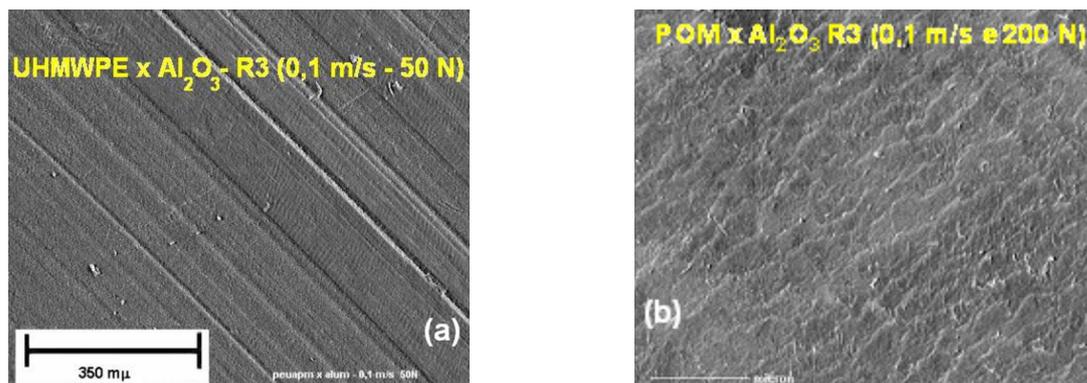
Carga [N]	Vel. [m/s]	Alumina		Aço Inoxidável	
		1,5 < Ra < 2,0 $\mu\text{m}$	0,3 < Ra < 0,6 $\mu\text{m}$	0,3 < Ra < 0,6 $\mu\text{m}$	0,05 < Ra < 0,2 $\mu\text{m}$
50	0,1	0,065 ± 0,003	0,013 ± 0,006	0,016 ± 0,003	0,008 ± 0,003
50	0,5	0,50 ± 0,18	0,26 ± 0,19	0,051 ± 0,010	0,014 ± 0,005
50	1,0	1,0 ± 0,4	0,57 ± 0,07	0,04 ± 0,02	0,014 ± 0,009
100	0,1	0,44 ± 0,07	0,54 ± 0,14	0,014 ± 0,005	0,010 ± 0,006
100	0,5	2,16 ± 0,11	1,2 ± 0,7	0,048 ± 0,011	0,024 ± 0,015
100	1,0	3,2 ± 0,8	1,9 ± 0,3	0,040 ± 0,012	0,007 ± 0,000
200	0,1	0,67 ± 0,14	1,20 ± 0,09	0,09 ± 0,04	0,016 ± 0,007
200	0,5	Fusão	2,7 ± 0,7	0,07 ± 0,04	0,084 ± 0,013
200	1,0	Fusão	Fusão	Fusão	Fusão

**Tabela 4.** Taxa de desgaste [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] dos ensaios UHMWPE.

Carga [N]	Vel. [m/s]	Alumina		Aço Inoxidável	
		1,5 < Ra < 2,0 $\mu\text{m}$	0,3 < Ra < 0,6 $\mu\text{m}$	0,3 < Ra < 0,6 $\mu\text{m}$	0,05 < Ra < 0,2 $\mu\text{m}$
50	0,1	0,29 ± 0,19	<b>0,011 ± 0,002</b>	0,016 ± 0,008	0,009 ± 0,003
50	0,5	0,6 ± 0,3	0,022 ± 0,007	0,008 ± 0,003	0,008 ± 0,003
50	1,0	0,6 ± 0,3	0,22 ± 0,16	0,013 ± 0,005	<b>0,003 ± 0,002</b>
100	0,1	0,5 ± 0,4	0,029 ± 0,019	<b>0,009 ± 0,002</b>	<b>0,003 ± 0,001</b>
100	0,5	0,32 ± 0,15	0,06 ± 0,02	0,029 ± 0,016	<b>0,002 ± 0,002</b>
100	1,0	0,6 ± 0,2	0,36 ± 0,17	<b>0,015 ± 0,010</b>	<b>0,015 ± 0,007</b>
200	0,1	0,7 ± 0,4	0,15 ± 0,03	-	-
200	0,5	Fusão	0,35 ± 0,16	0,4 ± 0,2	0,3 ± 0,2
200	1,0	Fusão	Fusão	Fusão	Fusão

Das Tabelas 3 e 4 observa-se que para nenhuma condição de ensaio, o fenômeno da fluência foi significativo para o POM, tal fato está de acordo com sua característica de grande estabilidade dimensional<sup>(24)</sup> e maior cristalinidade em comparação ao UHMWPE. Pode-se afirmar também que para os dois polímeros estudados, a ocorrência da fusão cristalina depende tanto da condição PV e do nível de acabamento superficial, quanto do tipo de contra-corpo.

A observação microscópica da superfície dos pinos mostrou que as morfologias de desgaste mais atuantes foram o riscamento (mecanismo de abrasão) e a formação de ondas (mecanismo de fadiga). Nas condições PV menos severas, observou-se somente a presença de riscos provocados pelas asperezas do contra-corpo (Figura 2-a). No entanto, com o aumento da condição PV, além dos riscos, também houve a formação de ondas (Figura 2-b). Estas morfologias de desgaste estiveram presentes da mesma forma em todos os pares de materiais estudados. Sendo a abrasão um mecanismo de desgaste importante nos sistemas estudados, pode-se dizer que a menor resistência ao desgaste do POM em relação ao UHMWPE, como observado nas tabela x e z, está relacionada com a sua menor tenacidade, menor resistência à abrasão [ $\tau_r \cdot \phi$ ], como explica Lancaster (x).

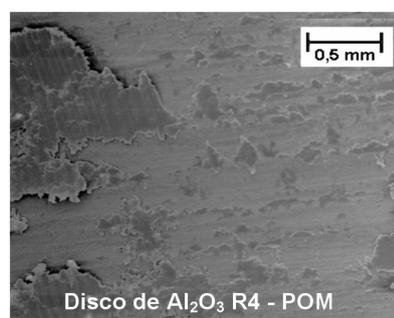


**Figura 2.** MEV da superfície dos pinos após ensaios mostrando as morfologias de desgaste tipo (a) riscos de abrasão e (b) ondas (mecanismo de fadiga).

Os resultados da determinação dos valores de trabalho de adesão ( $W_{ab}$ ) dos pares de materiais, calculados a partir dos ângulos de contato medidos e da Equação Média Harmônica proposta por Wu,<sup>(22)</sup> estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Trabalho de adesão médio ( $W_{ab}$ ) dos pares de materiais estudados.

corpo	contra-corpo	$W_{ab}$ [x 10 <sup>-4</sup> J/m <sup>2</sup> ]
POM	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101 ± 2
	Aço Inoxidável	96,1 ± 0,9
	POM	95 ± 3
UHMWPE	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85 ± 4
	Aço Inoxidável	85 ± 2
	UHMWPE	78 ± 3



**Figura 3.** Superfície de disco mostrando polímero aderido.

Na Tabela 5 observa-se que o trabalho de adesão é maior para o par *POM-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* do que para o par *POM-Aço Inoxidável*, sendo este valor estatisticamente igual a um par *POM-POM* (a Figura 3 – mostra que em algumas regiões dos discos havia polímero depositado na pista, configurando um par polimérico). Esses dados indicam uma maior tendência à deposição (mecanismo de transferência de filme) de material do pino de POM sobre a alumina em relação ao aço inoxidável. Na mesma Tabela, observa-se que os pares *UHMWPE-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* e *UHMWPE-Aço inoxidável* apresentam o mesmo valor de trabalho de adesão, ou seja, a tendência à ocorrência de mecanismos adesivos, como a transferência de filme, do UHMWPE é semelhante para os dois contra-corpos.

Por fim, verifica-se que o valor de  $W_{ab}$  do POM em relação aos dois substratos é maior do que o UHMWPE em relação aos mesmos. Tal fato ocorre devido à cadeia polimérica do POM (-CH<sub>2</sub>-O-) ser mais polar e não tão linear quanto ao UHMWPE (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-). Isto indica uma maior tendência à deposição do POM em relação ao UHMWPE, para cada um dos contra-corpos estudados. Em decorrência disto, se espera que a componente de adesão, integrante do processo de desgaste, seja maior para o POM do que para o UHMWPE.

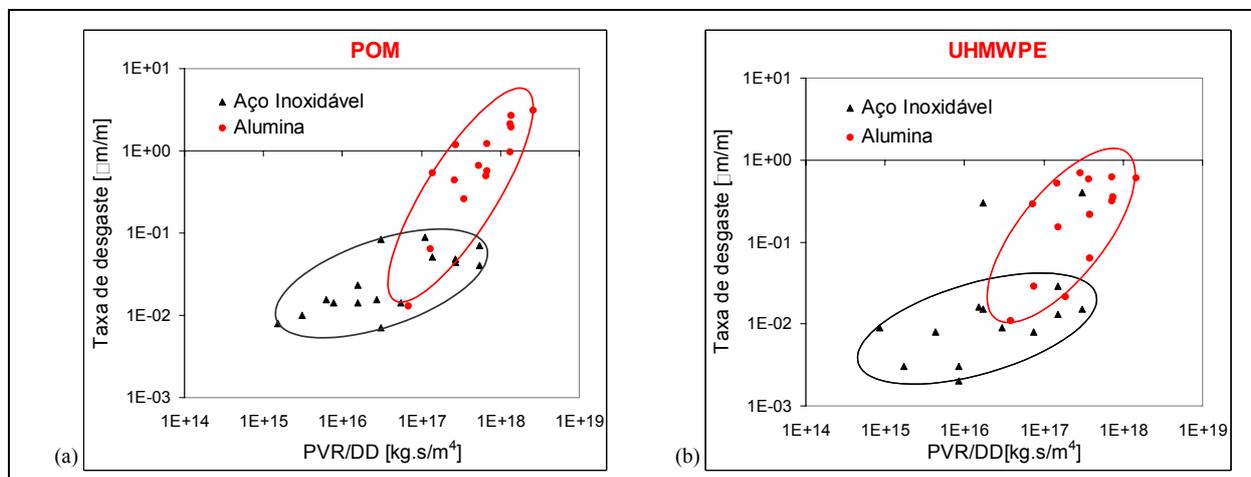
Mesmo com explicações para a resistência ao desgaste dos polímeros em algumas situações, uma análise completa do comportamento mostra-se como uma tarefa extremamente difícil. Desta forma, para análises do desgaste em termos globais, propõe-se um parâmetro relacionado à severidade das condições de contato, no qual três parcelas são consideradas. A primeira parcela é referente às condições de

carregamento de cada ensaio, representada pela condição PV; a segunda é representada pela agressividade do acabamento superficial do contra-corpo (LnRz/LnSm) e a terceira parcela é referente à capacidade de dissipação de calor da região de contato, representada pela difusividade térmica dos materiais em contato. Este parâmetro é chamado de severidade global

$$\text{severidade global} = \frac{PVR}{D_p D_d} [\text{kg.s/m}^4]$$

onde: P = pressão de contato [Pa]  
V = velocidade [m/s]  
R = LnRz/LnSm [-]  
D<sub>p</sub> = difusividade térmica do pino [m<sup>2</sup>/s]  
D<sub>d</sub> = difusividade térmica do disco [m<sup>2</sup>/s]

A Figura 4 apresenta os resultados da taxa de desgaste em função da severidade global (**PVR/DD**) nos ensaios com POM e com UHMWPE.



**Figura 4 - Taxa de desgaste em função da severidade global, (a) POM , (b) UHMWPE.**

Da Figura 4 observa-se que a mudança de contra-corpo, de aço inoxidável para alumina, conduz a um aumento na taxa de desgaste para ambos os polímeros. Por outro lado, é possível observar que, em termos do polímero, de maneira geral, o UHMWPE mostrou-se um material mais resistente ao desgaste, tanto contra o aço inoxidável quanto contra a alumina. Novamente pode-se dizer que, mais do que as condições que induzem a severidade no contato (condição PV, temperatura e nível de acabamento superficial), os tipos de materiais envolvidos, tanto do polímero, mas principalmente do contra-corpo (disco), é que determinam o nível de desgaste o tribossistema irá apresentar.

Da análise dos resultados, nota-se que a variação de altura do pino ( $\Delta h$ ), ocorre não somente devido à atuação de mecanismos de desgaste mas também devido à fluência do polímero e ao fenômeno da fusão. Sendo assim, é possível organizar os resultados dos ensaios de desgaste, em um único mapa de comportamento, o qual salienta as regiões onde estes fenômenos atuaram, em função da severidade global, apresentando assim a plenitude das interações entre corpo e contra-corpo.

A Figura 5 mostra as regiões onde os fenômenos de desgaste, fluência e fusão atuaram em relação aos níveis de desgaste dos polímeros. Analisando os mapas de comportamento do POM e do UHMWPE, tem-se que:

- A linha vertical vermelha onde ocorreu somente o fenômeno da fluência está relacionada à severidade tribológica zero, pois esta condição se dá com velocidade nula;
- Como a fluência é diretamente proporcional à carga, temos que a sua região de atuação diminui com a redução da severidade. No entanto, sua importância também diminuiu a partir de um certo nível de severidade com o aumento desta, pois nesse caso, as taxas de desgaste tornam-se tão altas, de modo que aquelas regiões do material afetadas pela fluência são removidas pela ação dos mecanismos de desgaste;

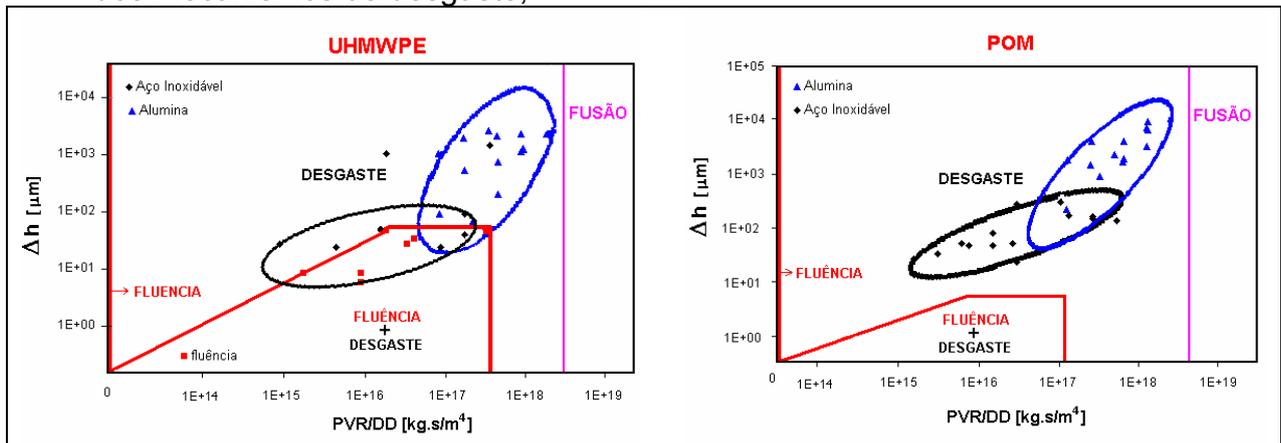


Figura 5. Mapas de desgaste em função da severidade global.

- Na região onde ocorreram ambos os fenômenos de desgaste e fluência foi necessário realizar a correção do desgaste quanto à fluência, visto que a variação de altura do pino deu-se pela ação simultânea destes dois fenômenos;
- A maior estabilidade dimensional do POM faz com que a região onde atuam tanto a fluência como o desgaste seja bem menor do que a região observada com o UHMWPE e não superpõe com a nuvem de resultados de desgaste, desta forma pode-se dizer que o fenômeno da fluência deve ser sempre considerado quando um dos elementos do par tribológico for o UHMWPE.
- Os mapas da Figura 5 mostram que, mais do que o tipo de polímero ou as condições de ensaio empregadas, a natureza do contra-corpo possui papel fundamental quanto à resistência ao desgaste do material polimérico.

## CONCLUSÃO

As análises das superfícies de desgaste dos pinos e dos discos mostraram basicamente que os 3 mecanismos de desgaste que atuaram durante a realização dos ensaios de deslizamento foram: a abrasão (riscamento), a fadiga (formação de ondas) e a adesão (transferência de filme).

Análises pontuais, como o efeito da carga ou o efeito da velocidade ou o efeito do acabamento superficial no comportamento ao desgaste de materiais poliméricos, mostram-se ineficientes perante a complexidade das características tribológicas destes materiais.

A variação da pressão de contato, na faixa de 2,5 a 10,2 [MPa], da velocidade de deslizamento de 0,1 a 1,0 [m/s] e do parâmetro de rugosidade Ra de 0,05 a 1,5 mm, afetaram menos o desgaste dos polímeros estudados do que a mudança do contra-corpo de alumina para aço inoxidável. Ou seja, a capacidade de dissipação do calor

gerado na interface do par tribológico mostrou ser o fator mais relevante para a resistência ao desgaste.

O mapa de comportamento que engloba: fluência, desgaste e fusão; mostrou ser uma ferramenta de análise dos fenômenos decorrentes da liberação de energia na interface corpo x contra-corpo.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro por meio do projeto 97/12620-9, a Divisão de Metalurgia do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), ao Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), ao Laboratório de Cerâmica do Centro de Caracterização Tecnológica de Materiais do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), ao Departamento de Física e Química da UNESP (Campus de Guaratinguetá) e às empresas BRASKEM, TICONA, CORMATEC Indústria e Comércio de Plásticos Ltda, MGS Indústria e Comércio de Plásticos Ltda, PLASTECNO Representações e Comércio Ltda, PIRELLI PNEUS S.A., IOCHPE-MAXION Fundação e Equipamentos Ferroviários, a Fundação CAMACAN e a Jaguaré Protótipos.

## REFERÊNCIAS

- 1 SHBY, M.; JONES, D.R.H. Engineering Materials: An Introduction to Microstructure, Processing and Design. Vol. 2, Pergamon Press, p.201-239, 1995
- 2 SPURR, R. T. The friction of the polymers. **Wear**, 79 (1982), p. 301-310
- 3 BAHADUR, S.; LUDEMA, K. C. The viscoelastic nature of the sliding friction of polyethylene, polypropylene and copolymers. **Wear**, 18 (1971), p. 109-128
- 4 BASSINI, R., DI PASQUALE, E. ; VITALI, C. Probabilistic model for metal-polymer friction. **Wear**, 95 (1984), p. 177-191
- 5 RHEE, S. K. Wear equation for polymers sliding against metals surfaces. **Wear**, 16 (1970) p. 431-445
- 6 JAIN, V. K.; BAHADUR, S. Development of wear equation for polymer-metal sliding in terms of the fatigue and topography sliding surfaces. **Wear**, 9 (1966) p. 329-348
- 7 VISWANATH, N.; BELLOW, D. G. Development of an equation for the wear of polymers. **Wear**, 181-183 (1995) 42-49
- 8 STACHOWIAK, G. W ; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, 2ª Edição, Butterworth-Heinemann, p. 619-668, 2001
- 9 BARRET, T.S.; STACHOWIAK, G. W & BATCHELOR, A. W. Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra-high molecular weight polyethylene. **Wear**, Vol. 153, p. 331-350, 1992
- 10 BARTENEVEV, G. M. & LAVRENTEV, V. V. **Friction and Wear of polymers**, Tribology Series, nº6. Elsevier Scientific Publishing Company, p. 10-260, 1981
- 11 STUPAK, P. R. , KANG, J. H. e DONOVAN, J. A., "Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity", **Wear**, Vol. 141, p. 73-84, 1990
- 12 GUIMARAES, M. S. **Geometria fractal aplicada à caracterização de rugosidade de superfícies lixadas ou submetidas a tração e corrosão**. Anais do 2º *Workshop* "Qualificação de chapas para a indústria automobilística" EPUSP, S.P., p.155-167, 1999

- 13 K. Friedrich, J. Flöck, K. Varadi, Z. Neder, Numerical and finite element contact and thermal analysis of real composite–steel surfaces in sliding contact, **Wear** 225–229 (1999) 368–379.
- 14 Samyn P, De Baets P, Friction and Wear of acetal: a matter of scale. **Wear**, 259, p. 697-702, 2005
- 15 Samyn P, De Baets P, Friction of polyoxymethylene homopolymer in highly loaded applications extrapolated from small-scale testing, *Tribology Letters*, Vol. 19, n3, p. 177-189, 2005
- 16 Lee, K-Y; Pienkowski D. Reduction in the initial wear of ultrahigh molecular weight polyethylene after compressive creep deformation, *Wear*, 203-204, p.375-379. 1997
- 17 BRISCOE, B.J. Material aspects of polymer wear. **Scripta Metallurgica et Materialia**. Vol. 24, p. 839-844, 1990
- 18 LANCASTER, J. K. Abrasive wear of polymers. **Wear**, Vol. 14, p. 223-239, 1969
- 19 KAR, M. K. & BAHADUR, S. Micromechanism of wear at polymer-metal sliding. **Wear**, 46 (1978) p. 189-202
- 20 SILVA, C.H. Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina. Tese de Doutorado. EPUSP, p. 262, 2003
- 21 ASTM G 99-90 Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus Metals test methods and analytical procedure. Vol. 03.02 – Section 3, p. 387-391, 1992
- 22 WU, S. Calculation of interfacial tension in polymer systems. **Journal of Polymer Science**, Vol. 34, p. 19-30, 1971
- 23 SILVA, C. H.; GIRALDO, D. H. ; SOUZA, R. M.; SINATORA, A. Comparação entre métodos de determinação da taxa de desgaste considerando o efeito da fluência de materiais termoplásticos. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto Alegre / RS. 1-17, 2004
- 24 HOESCHT, **Kunststoffe Hoescht**, Hostaform®, p. 10 – 38