ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO CONTRA-CORPO NA TAXA DE DESGASTE DO POLIOXIMETILENO EM ENSAIO PINO-CONTRA-DISCO

CARLOS H. SILVA (1) , DIEGO H. GIRALDO (2) , ROBERTO .M. SOUZA (3) , AMILTON SINATORA (3)

(1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Departamento Acadêmico de Mecânica, Laboratório de Superfícies e Contacto – LASC, Av. 7 de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba, Brasil.
carloshs@cefetpr.br
(2) Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, Facultad de Ingeniería, Calle 67 , 53 108, Medellín, Colombia
diegoh@udea.edu.co,
(3) Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Fenómenos de Superfície - LFS; Av. Prof. Mello Moraes 2235, São Paulo, Brasil
roberto.souza@poli.usp.br / sinatora@usp.br

ABSTRACT: The aim of this work is to study the effect of the roughness and the type of counter-face in the wear rate of the polyoximethylene copolymer (POM), resultant of the sliding contact against rigid bodies. For this, was realized wear tests in a pin-on-disk tribometer, with polymeric pins and disks confectioned in alumina (Al_2O_3) and duplex stainless steel (austenitic-ferritic). In the wear tests, were used 3 values of applied load, 3 sliding velocities and 2 levels of surface finishing of the counter-face. For each test condition, 3 experiments were realized. During the tests, the temperature near to the contact of the materials, the friction force and the height of the pin had been monitored. The variation of the pin height, measured with a linear sensor of position (LVDT) was used for the determination of the wear rate of polymer. The tests had been carried through in environment with controlled relative humidity in 50 ± 5 % and the sliding distance were of 3.500 meters During the tribologic tests, the POM pin, a thermoplastic material, were submitted shears and, mainly, compressive efforts for periods of 1 at 10 hours. However, it was verified that the compressive efforts had not been enough to modify the height of the pin for fluency. The results of wear rate had shown that the capacity to dissipate the heat generated during the tests is one of the characteristics most important of the counter-face, or either, the wear of the POM sliding against alumina was, for the two levels of roughness, more raised than in the tests against stainless steel.

Keywords: LVDT; Polyoximethylene; Wear; Alumina; Duplex Stainless Steel.

RESUMO: O presente trabalho tem como objectivo estudar o efeito do acabamento superficial e do tipo de contra-corpo na taxa de desgaste do polioximetileno copolímero (POM), resultante do contacto deslizante contra corpos rígidos. Para tanto, foram realizados ensaios de desgaste em um tribômetro do tipo pino-contra-disco, com pinos de material polimérico e discos confeccionados em alumina (Al_2O_3) e em aço inoxidável duplex (austenítico-ferrítico). Nos ensaios de desgaste, utilizou-se 3 valores de carga, 3 velocidades de deslizamento e 2 níveis de acabamento superficial do contra-corpo. Para cada condição de ensaio, foram realizados 3 experimentos. Durante os ensaios, foram monitoradas a temperatura próxima à interface de contacto dos materiais, a força de atrito e a altura do pino. A variação da altura do pino, medida com um sensor linear de posição (LVDT) foi utilizada para a determinação da taxa de desgaste do polímero. A distância percorrida pelos pinos sobre o disco foi de 3.500 metros. Os ensaios foram realizados em ambiente com humidade relativa controlada em 50 ± 5 %. Durante a realização dos ensaios tribológicos, o pino de POM, um termoplástico, esteve submetido a esforços cisalhantes e, principalmente, compressivos por períodos de 1 a 10 horas. No entanto, verificou-se que os esforços compressivos não foram suficientes para alterar a altura do pino por fluência. Os resultados de taxa de desgaste mostraram que a capacidade de dissipar o calor gerado durante o movimento relativo dos pares ensaiados é uma das características mais importantes do contra-corpo, ou seja, o desgaste do POM deslizando contra alumina foi, para os dois níveis de acabamento superficial, mais elevado que nos ensaios contra aço inoxidável.

Palavras chave: LVDT; Polioximetileno; Desgaste; Alumina; Aço Inoxidável Duplex.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente aplicação de polímeros nos mais diversos campos da engenharia, o estudo de suas propriedades tribológicas tem merecido grande atenção nos últimos anos. Temperatura, pressão, velocidade, material do contra-corpo, taxa de deformação e todas as condições ambientais produzem uma diferença no comportamento tribológico dos polímeros [1]. No entanto, podemos fazer um exercício de busca de uma maior compreensão do sistema tribológico, observando com mais cuidado as características físicas, químicas e topográficas do contra-corpo.

O acabamento superficial do contra-corpo, por exemplo, além de influenciar o tamanho e a quantidade dos debris a serem gerados e a formação de um filme uniforme durante o processo de deslizamento [2, 3, 4 e 5]. Actualmente alguns pesquisadores [6] estão utilizando a dimensão fractal de uma superfície como uma informação mais representativa do que os parâmetros de rugosidade tradicionais na caracterização tribológica de uma superfície. Guimarães [7] conseguiu uma boa correlação entre a dimensão fractal de superfícies e o parâmetro combinado ln(Rz)/ln(Sm). Este parâmetro expressa de uma forma combinada, os efeitos de amplitude da rugosidade (parâmetros escalares de altura – Ra, Ry, Rz, etc.) com efeitos de comprimento (parâmetros de separação - Sm) e tem-se mostrado adequado para caracterizar o acabamento de uma superfície do ponto de vista tribológico.

A literatura [8] tem mostrado que durante o movimento relativo de duas superfícies em contacto, parte da energia dissipada pelos fenómenos de atrito se transforma em calor. Em muitos componentes mecânicos, a preocupação com a retirada do calor gerado durante o deslizamento, para longe da região de contacto, conduz ao desenvolvimento de sistema de exaustão, ventilação e refrigeração. Esta preocupação se torna importante ao analisarmos que a elevação da temperatura dos corpos envolvidos, além de alterar suas propriedades mecânicas e físico-químicas, poderá ser determinante na resposta tribológica deste sistema, seja por uma maior eficiência dos mecanismos de desgaste, seja por uma maior propensão a ocorrência de fenómenos triboquímicos e de corrosão (oxidação).

No início da década de 60 (século XX), Rabinowicz [9, 10 e 11] discutiu a aplicação prática da energia de superfície na resolução de problemas de engenharia envolvendo sistemas tribológicos metálicos. Se o mecanismo de adesão pode ser considerado como o principal mecanismo de atrito para polímeros deslizando, a seco, sobre uma superfície 'lisa' [12], é razoável crer que as interacções electrostáticas e/ou de Van der Waals que ocorrem no contacto tenham papel fundamental para o coeficiente de atrito. No entanto, a compreensão dos fenómenos de adesão e a sua correlação com a energia de superfície (ou trabalho de adesão) fica um pouco mais dificultada quando do deslizamento sobre superfícies 'rugosas', pois a componente de deformação começa a ter papel decisivo no valor do coeficiente de atrito e nos mecanismos de desgaste [12]. Principalmente para os contactos polímero-polímero [13 e 14], a utilização do conceito de trabalho de adesão (W_{ab}), proposto por Dupré [15], assume papel predominante no entendimento da influência da energia de superfície tanto no coeficiente de atrito quanto na resistência ao desgaste.

Sabe-se que quanto menor a rugosidade do contra-corpo, maior será a adesão entre os corpos [16 e 17], porém, quanto mais rugosa a superfície, maior a penetração da aspereza do corpo rígido no polímero e mais intensos tornam-se os mecanismos abrasivos. Portanto, a influencia do acabamento superficial nas propriedades tribológicas dos polímeros depende de como atuam estes mecanismos concorrentes [18 e 19].

Um fenómeno especialmente importante do comportamento mecânico dos polímeros, e que deve ser levado em consideração em experimentos tribológicos, é a fluência. Alterações dimensionais em componentes que estão sujeitos à acção tribológica podem ser encaradas como uma degradação das características da superfície dos polímeros, podendo até inviabilizar o seu uso ou reduzir a vida útil do componente.

Dos polímeros de engenharia mais utilizados em aplicações tribológicas, o POM tem assumido uma posição de destaque, pois dentre as diversas características de grande interesse para aplicações de engenharia, pode-se citar: a resistência química; a grande estabilidade dimensional e térmica (resistência a altas temperaturas); a estabilidade química em relação as acções danosa dos raios ultravioleta e a resistência ao desgaste.

Devido à sua estabilidade dimensional combinada com a resistência ao desgaste, o POM apresenta-se como um material ideal para aplicações como engrenagens. Sendo o POM um polímero que pode ser moldado, por injecção e por sopro, e extrudado em forma de placas e perfis [20], a gama de geometria em que peças de POM podem ser fabricadas é muito grande e este fato faz com ele tenha um leque de aplicações muito variado. Dentre as aplicações tribológicas do POM, pode-se citar: carcaças de bombas, alojamentos, fechaduras, correntes, fieiras para extrusão de massa, roldanas, polias e mancais.

O presente trabalho procura compreender, mediante o uso de ensaios experimentais e análise de propriedades dos materiais, como as características topográficas e físico-químicas do contra-corpo poderão influenciar na resistência ao desgaste de um polímero de engenharia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos ensaios para a determinação da taxa de desgaste, seguindo as recomendações da Norma ASTM G-99 [21], foram utilizados pinos de POM copolímero (Hostaform® - TICONA) e discos de aço inoxidável duplex (austenítico-ferrítico) 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. A **Tabela 1** apresenta algumas propriedades de importância tribológica do POM copolímero.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas, térmicas e físico-químicas do POM. [22 e 23]

Propriedades	Unid.	POM
Temperatura de Fusão	[°C]	168
Temperatura de Transição Vítrea	[°C]	-65
Condutividade Térmica	[W/m.K]	0,30
Difusividade Térmica	[m^2/s]	1,42 x 10^{-7}
Massa Específica	[kg/m^3]	1,41
Massa Molecular	[g/mol]	7 x 10^4
Grau de Cristalinidade	[%]	69,2
Tensão de Escoamento	[MPa]	66
Módulo de Elasticidade	[MPa]	2300
Alongamento até a Ruptura	[%]	64,2
Resistência ao Impacto	[MPa]	9,3

Os discos de aço inoxidável duplex (austenítico-ferrítico) foram fornecidos pela Divisão de Metalurgia do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e pelo Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Com o objectivo de obter uma matriz austenítica isenta de carbonetos e/ou nitretos, foram realizados os tratamentos térmicos de solubilização e tempera. As condições de solubilização foram: temperatura de 950 °C, tempo de 3 horas e taxa de aquecimento de 20 °C/min. A tempera em óleo, sem agitação, foi realizada ao término da terceira hora. Após a realização dos tratamentos térmicos, verificou-se, mediante o uso de microscopia óptica, que o aço duplex é composto de uma matriz de austenita (58%) e grãos de ferrita (42%). A **Tabela 2** apresenta a composição química do aço inoxidável duplex.

Tabela 2 – Composição química do aço inoxidável duplex (austenítico-ferrítico).

Elemento	C	Mn	Si	S	Cr	N
%	0,024	11,0	0,5	0,01	19,1	0,003

Os discos de alumina foram obtidos junto ao Laboratório de Cerâmica do Centro de Caracterização Tecnológica de Materiais do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares). A **Tabela 3** apresenta algumas propriedades relevantes dos materiais dos contra-corpos.

Tabela 3 – Propriedades dos discos de alumina e aço inoxidável duplex. [24]

Propriedades	Unid.	Alumina	Aço duplex
Condutividade Térmica	[W/m.K]	30	17
Difusividade Térmica	[m^2/s]	7,84x10^{-6}	2,21x10^{-5}
Tensão de Escoamento	[MPa]	300	-
Módulo de Elasticidade	[GPa]	370	170

A preparação das superfícies dos discos de alumina e aço inoxidável duplex com acabamentos diferenciados foi realizada mediante o processo de lixamento manual unidirecional com lixas de papel abrasivo, com partículas abrasivas de Al_2O_3 de diversas granulometrias. A **Tabela 4** mostra as condições de acabamento, a granulometria dos papeis abrasivos, a relação topográfica características das superfície dos discos, proposta por GUIMARÃES [7], além de um código de identificação de cada faixa de acabamento.

Tabela 4 – Características superficiais dos discos de alumina e aço inoxidável duplex.

Discos	Acabamento	Grana	ln(Rz) / ln(Sm)	Cód.
Al_2O_3	1,5 < Ra < 2,0 μm	60	0,573	R4
	0,3 < Ra < 0,6 μm	320	0,297	R3
Aço duplex	0,3 < Ra < 0,6 μm	180	0,336	R3
	0,05 < Ra < 0,2 μm	320	0,019	R2

Para se determinar o comportamento tribológico do sistema descrito acima, utilizou-se um tribômetro tipo pino-contra-disco, modelo TE-67 de fabricação Plint & Partners Ltd, pertencente ao Laboratório de Fenómenos de Superfície do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (LFS-PME-EPUSP).

A **Fig. 1** mostra um desenho esquemático com vista em corte e outra em perspectiva, com os principais componentes presentes no cabeçote do equipamento de desgaste.

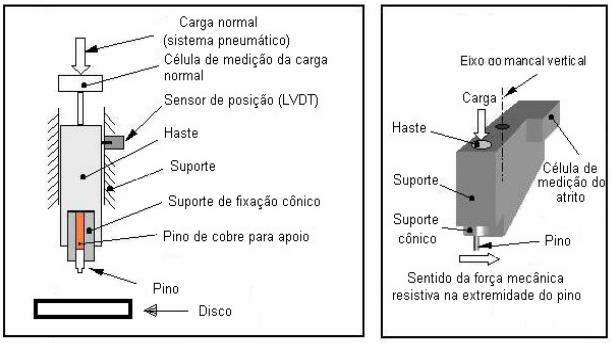


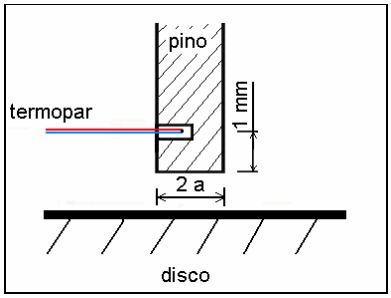
Fig. 1 – Vista lateral do tribômetro e desenho esquemático do cabeçote.

A taxa de desgaste [μm/m], foi determinada pela medição da variação da altura dos pinos 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, conseguindo, assim, uma ampla faixa de condições PV (*PV values*). A condição PV (pressão-velocidade) [25] representa o grau de severidade dos esforços na região de contacto. Esta condição limita a utilização dos materiais, de acordo com a condição PV limite de um dado material em um sistema específico, como, por exemplo, mancais de deslizamento.

Para a medição da temperatura média da superfície dos pinos durante os ensaios de desgaste foi utilizado o medidor de temperatura interno da máquina de desgaste com um termopar do tipo k (cromel-alumel) [26]. Foram feitos furos de 1 mm de diâmetro na lateral dos pinos e o termopar foi colocado, sob pressão, em seu interior. A **Fig. 2a** apresenta, de uma forma esquemática, o contacto entre

um pino de raio **a** e uma superfície plana, que neste caso são os discos. A **Fig. 2b** mostra uma fotografia de um pino de POM montado com o termopar, no cabeçote do tribômetro, após a realização de um ensaio. A correcção dos valores de temperatura foi feita mediante a formulação de Archard [27] para o contacto entre uma superfície circular deslizando contra um plano horizontal.

(a)



(b)

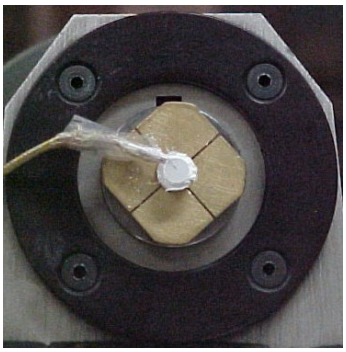


Fig. 2 – Desenho esquemático do sistema de medição de temperatura (a). Fotografia de um pino montado com a ponta do termopar em seu interior (b).

Para se obter o comportamento quanto à fluência dos materiais poliméricos, utilizou-se o próprio tribômetro suprimindo-se o movimento do disco, como equipamento capaz de aplicar uma força constante (50, 100 e 200 N) e de medir as deformações longitudinais devido a esforços de compressão. Como a área da secção transversal do pino é de $19{,}6 \times 10^{-6}$ m^2, os pinos foram submetidos a tensões compressivas de 2,5; 5,1 e 10,2 MPa, por períodos de 10 horas.

Para a determinação do trabalho de adesão dos pares tribológicos, utilizou-se o método de FOLKES (WU *apud* FOLKES) [28], o qual admite que a energia de superfície (γ) 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 contacto de um líquido em relação a uma superfície de um sólido.

O líquido polar utilizado foi água destilada e o de dispersão foi o diiodometano. A determinação dos ângulos de contacto foi feita em um Goniómetro NRL C.A., modelo 100-00, de fabricação Ramé-Hart Inc, do Laboratório de Plasmas e Aplicações do Departamento de Física e Química da Universidade Estadual Paulista (Campus de Guaratinguetá).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Trabalho de adesão e Mecanismos de desgaste

Os resultados da determinação dos valores de trabalho de adesão (W_{ab}) dos pares de materiais, calculados a partir dos ângulos de contacto medidos e da Equação Média Harmónica proposta por Wu [28], 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^{-4} J/m^2]
	Al_2O_3	101 ± 2
POM	Aço duplex	96,1 ± 0,9
	POM	95 ± 3

A **Tabela 5** apresenta o trabalho de adesão de um par tribológico até aqui não comentado; o par ***POM x POM***. A observação da superfície dos discos na região da trilha de contacto mostrou a presença de partículas de POM depositadas, tanto nos discos de alumina (em maior quantidade) quanto nos discos de aço duplex, formando uma camada descontínua e heterogénea (**Fig. 3**). Desta forma, pode-se afirmar que durante os ensaios houve momentos e/ou regiões com contacto polímero-polímero, no entanto, não se pode fazer afirmações quanto ao comportamento ao atrito e ao desgaste deste "par tribológico". Além disto, da análise da **Tabela 5** é possível afirmar que há uma maior tendência de adesão do par ***POM x Alumina***, tanto em relação ao par ***POM x Aço Duplex*** quanto ao ***POM x POM***.

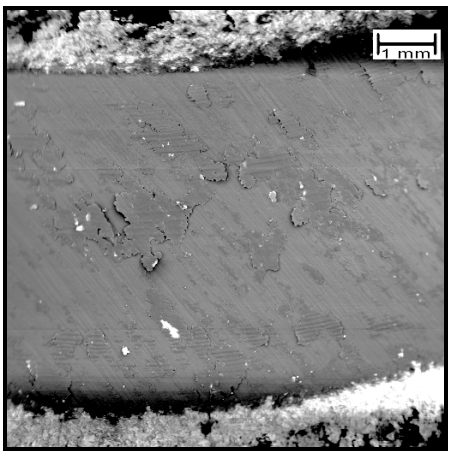


Fig. 3 – Trilha de contacto de disco de Al_2O_3, com rugosidade R3, após ensaio de desgaste.

Além de mecanismos de desgaste tipicamente adesivos, a observação microscópica das superfícies de desgaste dos pinos de POM, mostrou que os mecanismos de desgaste que atuaram, tanto nos ensaios com alumina quanto nos ensaios com aço duplex, foram: a fadiga (formação de ondas) e a abrasão.

A **Fig. 4** apresenta micrografias das superfícies de contanto de pinos, onde se observam os aspectos característicos dos mecanismos de fadiga e abrasão.

(a)

(b)

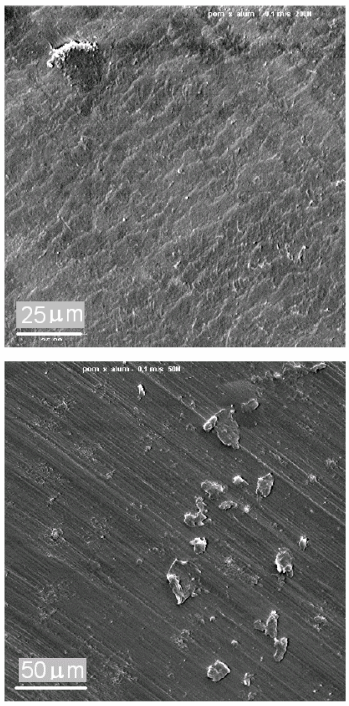


Fig. 4 – Superfície dos pinos (POM x Al_2O_3 - R3) com os mecanismos de desgaste actuantes, fadiga (a) e abrasão (b).

3.2. Temperatura no contacto e Coeficiente de atrito

A realização de ensaios preliminares foi determinante para que se optasse por ensaios de desgaste com medição de temperatura, em condições PV (pressão-velovidade) superiores a 1,02 [MPa . m/s]. Esta escolha se deve ao fato de que nos ensaios realizados com condições PV menos severas, o calor gerado na interface dos materiais não provocou um aumento significativo na temperatura média do pino, não excedendo 30 °C. **Tabela 6** apresenta os valores da temperatura medida no pino, após o período de *running-in*, em diversas condições PV e de acabamento superficial.

Tabela 6 – Temperatura próxima à superfície do pino.

Carga [N]	Vel. [m/s]	Condição PV [MPa .m/s]	CONTRA-CORPO	
			duplex (R2)	duplex (R3)
200	0,1	1,02	52,2 ± 0,9	54,4 ± 1,0
50	1,0	2,55	①	①
100	0,5	2,55	72,4 ± 1,2	56,1 ± 1,1
100	1,0	5,10	104,5 ± 0,6	81,6 ± 1,4
200	0,5	5,10	112,2 ± 1,3	83,0 ± 0,5
200	1,0	10,20	③	③
Carga [N]	**Vel. [m/s]**	**Condição PV [MPa .m/s]**	**CONTRA-CORPO**	
			Al_2O_3 (R3)	**Al_2O_3 (R4)**
200	0,1	1,02	66,2 ± 1,0	58,0 ± 1,2
50	1,0	2,55	73,9 ± 0,4	109,2 ± 0,7
100	0,5	2,55	119,9 ± 1,3	114,6 ± 1,5
100	1,0	5,10	99,6 ± 1,9	123 ± 2
200	0,5	5,10	②	②
200	1,0	10,20	③	③

Observações: ① Devido a problemas técnicos, não foi possível realizar estas medições de temperatura. ② Nestes ensaios com alumina, a temperatura no contacto atingiu níveis próximos aos de fusão do POM, sendo assim, estes ensaios foram descartados, tanto para as análises de taxa de desgaste quanto para as de coeficiente de atrito. ③ Os ensaios realizados com condição PV = 10,20 [MPa . m/s] conduziram à fusão do polímero.

Para as análises de taxa de desgaste, os valores de temperatura medidos foram admitidos como os valores médios de temperatura na interface dos materiais. Essa hipótese, que elimina a necessidade em se fazer correcções nos valores de temperatura medidos, se justifica, pois:

- com o decorrer dos ensaios de desgaste, a superfície de contacto do pino se aproxima da ponta do termopar, o que tornaria as correcções muito pequenas;
- em algumas condições PV mais elevadas e, portanto, com maiores temperaturas no contacto, o ensaio foi interrompido devido ao desgaste do pino levar ao contacto do termopar com o contra-corpo, indicando assim que as medidas de temperatura nos instantes finais destes ensaios eram realizadas na interface pino-disco.

A **Tabela 6** mostra que os ensaios realizados com discos de alumina sempre apresentaram valores de temperatura superiores àqueles com aço inoxidável duplex. Admitindo que a geometria dos corpos-de-prova de rugosidade R3 são idênticas, pode-se supor que as temperaturas mais elevadas nos ensaios com discos de Al_2O_3 decorrem de dois factores:

- maior capacidade de gerar calor na região do contacto, evidenciada pelos valores de coeficiente de atrito das colunas com acabamento superficial tipo R3 (**Tabela 6);**
- menor capacidade em dissipar o calor gerado, evidenciado pelos valores de difusividade e condutibilidade térmica **(Tabela 3).**

Tabela 7 - Coeficiente de atrito para as diversas condições de ensaio.

Carga [N]	Vel. [m/s]	Condição PV [MPa .m/s]	CONTRA-CORPO	
			duplex (R2)	duplex (R3)
200	0,1	1,02	0,375 ± 0,018	0,326 ± 0,017
50	1,0	2,55	0,360 ± 0,030	0,328 ± 0,017
100	0,5	2,55	0,317 ± 0,013	0,264 ± 0,014
100	1,0	5,10	0,280 ± 0,050	0,240 ± 0,020
200	0,5	5,10	0,292 ± 0,007	0,194 ± 0,016
200	1,0	10,20	-	-
Carga [N]	**Vel. [m/s]**	**Condição PV [MPa .m/s]**	**CONTRA-CORPO**	
			duplex (R2)	**duplex (R3)**
200	0,1	1,02	0,325 ± 0,004	0,350 ± 0,050
50	1,0	2,55	0,530 ± 0,150	0,470 ± 0,070
100	0,5	2,55	0,470 ± 0,100	0,430 ± 0,050
100	1,0	5,10	0,386 ± 0,011	0,400 ± 0,050
200	0,5	5,10	-	-
200	1,0	10,20	-	-

Do ponto de vista do acabamento superficial, os resultados apresentados nas **Tabelas 6** e **7**, indicam comportamentos diferenciados para cada tipo de disco.

Da análise destas tabelas pode-se dizer que:

- nos ensaios com aço inoxidável duplex, o aumento da rugosidade dos discos conduz a uma redução nos valores de coeficiente de atrito e, consequentemente, a valores de temperaturas no contacto também menores. Este fato sugere que o nível acabamento superficial tipo R2 privilegia a ocorrência de mecanismos adesivos em detrimento dos abrasivos. Neste caso, a parcela do atrito devido às forças adesivas é mais importante que o efeito de penetração das asperezas do metal no polímero;

- nos ensaios com alumina, o aumento da rugosidade dos discos não apresenta influência significativa nos valores de coeficiente de atrito, tampouco pode-se fazer qualquer consideração quanto à temperatura. É possível então que a intensificação dos efeitos de penetração das asperezas da cerâmica no polímero esteja sendo contrabalançada com a redução de efeitos adesivos.

Observa-se também na **Tabela 6** que nos ensaios com a mesma condição PV (2,55 e 5,10 [MPa . m/s]), a temperatura sempre foi mais elevada no ensaio com maior carga aplicada. Este fato sugere que o aumento da temperatura possui uma maior relação com a carga aplicada do que com a velocidade de deslizamento. Nota-se também que a elevação de PV conduz, como era de se esperar, à elevação da temperatura, excepto no caso da alumina na condição PV = 5,10 [MPa . m/s] e velocidade de 0,5 m/s. Este resultado excepcional não pôde ser explicado até o momento.

3.3. Taxa de desgaste

Os resultados dos ensaios de fluência compressiva realizados no próprio equipamento de desgaste [22] mostraram que, para o período de ensaio de 10 horas, os efeitos de fluência deste polímero podem ser considerados insignificantes, pois os valores de deformação permanente medidos foram da mesma ordem de grandeza da incerteza de medição dos valores de desgaste, isto já considerando a elevação de temperatura dos pinos durante os ensaios.

Desta forma, os dados de taxa de desgaste apresentados na **Tabela 8**, não necessitaram de correcção quanto a efeitos de fluência. Este fato já era esperado, pois uma das principais características dos poliacetais (POM homopolímero ou copolímero) é a sua grande estabilidade dimensional, mesmo em temperaturas 'elevadas'.

A partir dos resultados apresentados na **Tabela 7**, será analisada a influência das variáveis de controle (condição PV, temperatura no contacto e acabamento superficial) nos valores de taxa de desgaste do POM deslizando contra superfícies metálicas e cerâmicas.

Tabela 8 – Taxa de desgaste [µm/m] de POM.

Carga [N]	Vel. [m/s]	CONTRA-CORPO duplex (R2)	CONTRA-CORPO duplex (R3)
50	0,1	0,008 ± 0,003	0,016 ± 0,003
50	0,5	0,014 ± 0,005	0,051 ± 0,010
50	1,0	0,014 ± 0,009	0,04 ± 0,02
100	0,1	0,010 ± 0,006	0,014 ± 0,005
100	0,5	0,024 ± 0,015	0,048 ± 0,011
100	1,0	0,007 ± 0,000	0,040 ± 0,012
200	0,1	0,016 ± 0,007	0,09 ± 0,04
200	0,5	0,084 ± 0,013	0,07 ± 0,04

Carga [N]	Vel. [m/s]	CONTRA-CORPO Al_2O_3 (R3)	CONTRA-CORPO Al_2O_3 (R4)
50	0,1	0,013 ± 0,006	0,065 ± 0,003
50	0,5	0,26 ± 0,19	0,50 ± 0,18
50	1,0	0,57 ± 0,07	1,0 ± 0,4
100	0,1	0,54 ± 0,14	0,44 ± 0,07
100	0,5	1,2 ± 0,7	2,16 ± 0,11
100	1,0	1,9 ± 0,3	3,2 ± 0,8
200	0,1	1,20 ± 0,09	0,67 ± 0,14
200	0,5	-	-

A **Fig. 5** mostra o efeito do contra-corpo em relação à condição PV e à temperatura no contacto, para os ensaios com acabamento superficial tipo R3.

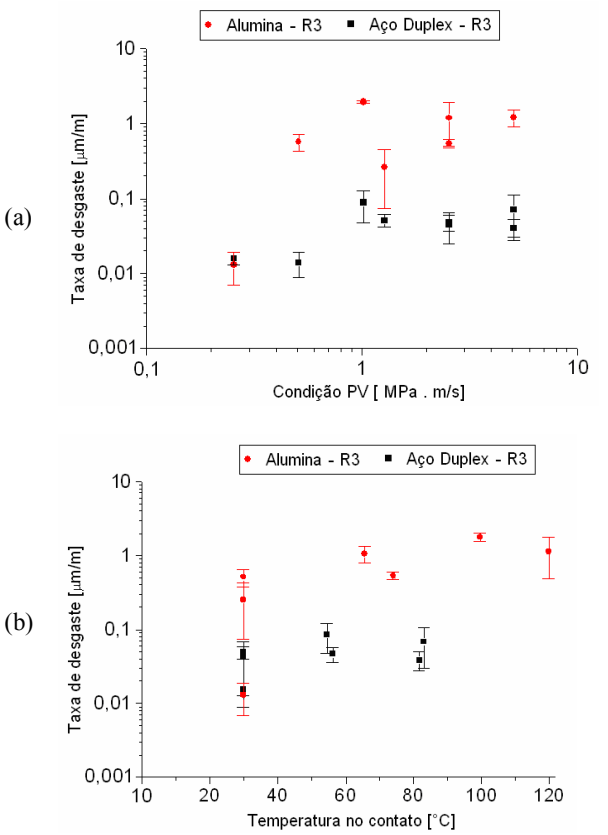


Fig. 5 – Taxa média de desgaste de POM (R3) em função: da condição PV (a) e da temperatura no contacto (b).

A **Fig. 5a** mostra que, com o aumento da condição PV, mais clara fica a tendência dos valores de taxa de desgaste dos ensaios realizados com alumina apresentarem-se mais elevados do que aqueles obtidos nos ensaios com aço inoxidável duplex. A **Tabela 5** mostra que o trabalho de adesão do par ***POM x Alumina*** é significativamente maior que o par ***POM x Aço Duplex***. Haveria portanto, uma maior afinidade para a formação de ligações fracas na interface dos dois materiais, característica dos mecanismos adesivos, no par com alumina. No entanto, somente esse fato não explica a diferença de comportamento do desgaste do POM com ambos os materiais dos discos, visto ainda que os mecanismos de desgaste mais evidentes estiveram relacionados com fenómenos abrasivos (fadiga e abrasão). Os valores mais elevados da temperatura (**Fig. 5b**) nos ensaios com alumina provocam grandes alterações nas propriedades mecânicas do polímero (redução de módulo de elasticidade e de tensão de escoamento e aumento no alongamento à ruptura), tornando-o mais susceptível a perda de massa por mecanismos abrasivos.

A **Fig. 6** confirma o comportamento com desgaste mais severo dos sistemas com alumina em relação aos com aço duplex nos ensaios contra POM. No entanto, o efeito do acabamento superficial não é tão marcante, ou seja, tanto nos ensaios com alumina quanto nos ensaios do aço duplex, os níveis de variação de acabamentos superficiais não foram suficientes diferentes para alterar, significativamente, as taxas de desgaste.

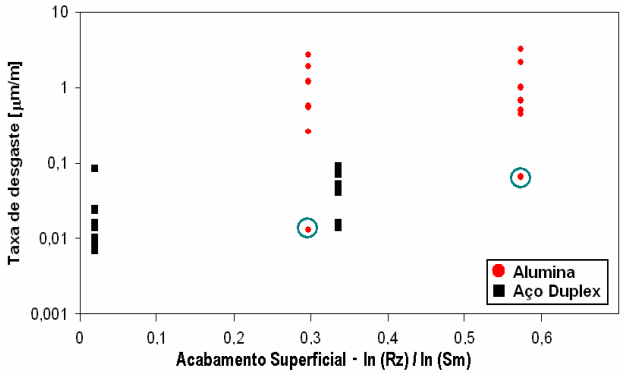


Fig. 6 - Taxa média de desgaste do POM em função do acabamento superficial.

A observação microscópica da superfície de desgaste dos pinos, cujos valores de taxa de desgaste na **Fig. 6** estão marcados com um círculo, apresentou apenas a morfologia de desgaste com riscos; evidenciando que somente o mecanismo de abrasão esteve atuando nestes ensaios.

Ao analisar cada variável independente dos ensaios com os pares tribológicos estudados, foi possível organizá-las sequencialmente quanto ao grau de influência em relação à taxa de desgaste do polímero. A **Fig. 7** mostra que mais importante que as condições PV e que o nível de acabamento superficial dos discos, é a natureza do contra-corpo que se mostrou o parâmetro mais influente nos resultados de ensaios de desgaste.

Material do contra-corpo

Alumina > Aço Duplex	87,5
Alumina = Aço Duplex	12,5
Alumina < Aço Duplex	0,0

Acabamento superficial do disco

rugosidade maior = taxa de desgaste mais elevada	52,6
rugosidade maior = taxa de desgaste diminui	45,1
rugosidade maior = taxa de desgaste não se altera	5,3

Condição PV

taxa de desgaste se eleva com a condição PV	46,7
taxa de desgaste independe da condição PV	46,7
taxa de desgaste diminui com a condição PV	6,6

Fig. 7 – Quadro resumo dos resultados de desgaste, evidenciando as influências das diversas variáveis em termos percentuais.

A **Fig. 7** confirma alguns dos resultados esperados para os experimentos, indicando que o aumento da condição PV, intensifica a ocorrência dos diversos mecanismos de desgaste e que quanto mais rugosa a superfície do contra-corpo, maior serão os danos causados pelo aspecto abrasivo das asperezas.

O quadro resumo dos resultados de taxa de desgaste apresentado na **Fig. 7** também deixa claro que o exposto acima não ocorre em 100% dos casos, ou seja, o efeito destas variáveis na taxa de desgaste do POM poderá não ser tão expressivo, quando considerarmos a grande dispersão dos resultados de desgaste.

4. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados e das observações realizadas durante a execução deste trabalho, foi possível chegar nas seguintes conclusões:

- em todos os ensaios ocorreram os mecanismos de fadiga (formação de onda), abrasão e transferência de filme (mecanismo tipicamente devido a adesão). Este último foi mais intenso nos ensaios de desgaste de ***POM x Alumina***;
- associou-se a maior intensidade do mecanismo de desgaste tipo formação de filme nos ensaios ***POM x Alumina*** com os valores mais elevados do trabalho de adesão (W_{ab}) neste pares;
- o efeito do acabamento superficial na taxa de desgaste não foi conclusivo. Entretanto, em mais da metade das amostras o efeito do aumento da rugosidade conduz a um aumento no desgaste; revelando a importância de mecanismos de abrasão no desgaste do polímero;
- A variação da condição PV não foi suficiente para elevar a taxa de desgaste em aproximadamente metade dos experimentos. Na outra metade a variação da condição

PV levou ao aumento do desgaste. Não foi possível explicar o comportamento paradoxal de 5,3% dos ensaios onde a elevação da condição PV conduz a uma redução da taxa de desgaste;

- o par ***POM x Duplex***, apresentou menores valores de temperatura para as mesmas condições de deslizamento. Nesse caso, o fato da difusividade térmica do aço duplex ser superior à da alumina, contribui para que o calor gerado na interface dos corpos não conduza a um aumento indesejado de temperatura;

- a capacidade de dissipação de calor do par tribológico, que é directamente ligada à natureza físico-química do contra-corpo, mostrou ser o factor mais relevante (87% dos casos) quanto a resistência ao desgaste do POM nos sistemas tribológicos estudados.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro por meio do projecto 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 Ticona, Camacan, Iochpe-Maxion e Cormatec.

REFERÊNCIAS

[1] M. Ashby & D. R. H. Jones. Engineering Materials: An introduction to microstruture, processing and design. Vol. 2, Pergamon Press, (1995) p. 201-239.

[2] S. Bahadur, Wear, **245** (2000) 92.

[3] G. C. Rubem, T. A. Blanchet & F. E. Kennedy. Journal of Materials Science , **28** (1993) 1045.

[4] V. A. Belyi, A. I. Sviridyonok, V. A. Smurugov & V. V. Nevzorov. Journal of Lub. Technology, **109** (1977) 396.

[5] J. R. Cooper, D. Dowson & J. Fisher. Wear, **162-164** (1983) 378.

[6] P. R. Stupak, J. H. Kang & J. A. Donovan. Wear, **141** (1990) 73.

[7] M. S. Guimarães. 2° Workshop "Qualificação de chapas para a indústria automobilística, EPUSP (1999) p. 155.

[8] P. J. Blau, Friction Science and Technology, Marcell Dekker Inc (1996) p.251.

[9] E. Rabinowicz, J. Applied Phys., **32**, n°8 (1961) 1440.

[10] E. Rabinowicz, Wear, **7** (1964) 9.

[11] E. Rabinowicz. Metals Eng. Quartely. **ASM** (1967) 4.

[12] L-H. Lee. **ASTM-STP** (1974) 31.

[13] H. Czichos, Wear, **88** (1983) 27.

[14] G. Erhard, Wear, **84** (1983) 167.

[15] A. W. Adamson, Physical Chemistry of Surfaces, John Wiley & Sons (1996) p.179-308.

[16] K. H. Zum-Gahr, Microstruture and Wear of Materials - Tribology Series, n°10 - Elsevier, (1987) p.437- 447.

[17] I. M. Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Edward Arnold (1992) p.51-57.

[18] B. Briscoe. Trib. International, **14**, Issue 4 (1981) 231.

[19] G.M. Bartenevev & V. V. Lavrentev, Friction and Wear of polymers, Tribology Series, **n°6**. Elsevier (1981) p. 10-260.

[20] B. Elchison, Mod. Plast. Encyclopedia, **B1-B4** (2001).

[21] ASTM G 99-90 Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. **Vol. 03.02** – Wear and erosion; metal corrosion. Section 3 (1992) p.387.

[22] C. H. Silva, Degradação de UHMWPE e de POM devido a acção tribológica contra aço inoxidável e alumina. Tese de Doutorado. EPUSP (2003) 262p.

[23] Ticona – Technical Literatura Library (version 1.0), CD-ROM (2001).

[24] ASM Engineered Materials Reference Book, 2nd Edition, Ed. ASM International, (1994).

[25] K.G. Budinski, ASTM, **STP 1105** (1991) 89.

[26] M.S. Ray,. Engineering Experimentation. Ideas, Techniques and Presentation. McGrsw-Hill (1988) p. 124.

[27] J. F. Archard, Wear, **2** (1959) 439.

[28] S. Wu, Journal of Polymer Science, **34** (1971) 19.