

Artigo Original

recebido: 13/11/97 e aceito: 09/04/99

**Projeto e construção de um
equipamento para ensaios de
desgaste de materiais para uso
em próteses ortopédicas**

*Project and construction of a wear
test device for orthopaedics prosthesis
materials*

Resumo

O estudo dos mecanismos de desgaste e da resistência ao desgaste para os materiais utilizados em sistemas sujeitos à fricção é fundamental para a otimização na escolha dos mesmos e para a previsão da durabilidade de um dispositivo mecânico. Com o objetivo de analisar as características tribológicas em pares de materiais, foi construído um equipamento na configuração "Tri - Pin - On - Disc" que permite a realização de ensaios de fricção de pinos contra discos. O equipamento permite a realização de ensaios com variação de velocidade, pressão de contato, regime de lubrificação/refrigeração e determinação dos coeficientes de atrito. Para a verificação da reprodutibilidade dos resultados fornecidos foram realizados ensaios com pinos de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular contra discos de aço inoxidável 316 L. Os ensaios foram feitos em seis diferentes condições de pressão e velocidades e os resultados mostraram a confiabilidade do equipamento.

Palavras-chave: Desgaste, Prótese, Polietileno UHMW

Abstract

The study of the wear mechanisms and the wear resistance is very important in the optimization in the materials selection processes. In order to analysis the tribological characteristics in materials to be used in orthopaedics prosthesis a wear test device in tri pin on disc configuration have been projected and constructed. With device is possible to do wear tests with different contact pressure, sliding velocities and to use lubrication. Six different PV conditions has been used in wear tests with Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) sliding against 316 L stainless steel aiming the verification of the equipment functionality. The results have shown the reliability of the equipment.

Keywords: wear, wear test device, UHMWPE

M.C. Reis

Pesquisador Associado
LABIOMEC - Universidade Estadual de Campinas
e-mail: mcreis@unicamp.br

C. A.C. Zavaglia

Prof. Livre Docente / Depart. de Eng. de Materiais
Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas

Introdução

O fenômeno do desgaste é comum na grande maioria dos dispositivos mecânicos. A sua existência pode ser o fator determinante na quantificação da vida útil de tais dispositivos. O desgaste é definido como a perda progressiva de massa da superfície em operação de um corpo, devido ao movimento relativo desta (Yamaguchi, 1990). Esta perda de material pode acarretar na perda da funcionalidade do componente e consequentemente do dispositivo no qual está inserido.

Diferentemente de outras propriedades mecânicas, o desgaste apresenta-se como uma variável no dimensionamento de componentes que, normalmente, não é equacionável de maneira precisa. De acordo com as condições existentes na utilização do componente é possível saber qual o mecanismo de desgaste ocorrerá predominantemente, entretanto a intensidade deste é de previsão incerta e com um grande número de variáveis. As dificuldades na previsão do comportamento ao desgaste estão, normalmente, associadas às variações dos parâmetros que compõe o sistema tribológico (Gahr, 1987).

O desgaste pode ter significado maior do que simplesmente os custos das partes inoperantes. Existem casos em que tais custos estão ligados à qualidade de vida de um ser humano ou até mesmo a permanência da mesma, por exemplo: os problemas de desgaste relacionados às próteses de articulações sinoviais humanas, tais como as de quadril e joelho. Estes conjuntos protéticos constituem sistemas tribológicos complexos e cuja compreensão tem se mostrado fundamental para ganhos de vida útil do conjunto e, conseqüentemente, melhoria da qualidade de vida dos pacientes.

O estudo dos mecanismos de desgaste e da resistência ao desgaste em um sistema tribológico é fundamental para a otimização na escolha dos materiais envolvidos e para a previsão da durabilidade do sistema. Este tipo de estudo é, normalmente, feito através de ensaios em equipamentos que simulam as condições tribológicas existentes no funcionamento do sistema, na aplicação real. Desta forma, os equipamentos que se destinam à simulação de sistemas tribológicos devem ser específicos para o tipo ou o mecanismo de desgaste que se pretende estudar.

Com o objetivo da realização de estudos tribológicos em articulações artificiais humanas foi projetado e construído um equipamento mecânico que permite a realização de ensaios de desgaste em condições semelhantes daquelas encontradas nesses sistemas protéticos. A configuração adotada é a de três pinos contra um disco (Tri pin on disc). O projeto foi realizado de maneira a permitir a variação das velocidades de escorregamento entre os pinos e o disco, a utilização de fluido de refrigeração/lubrificação, a programação do ciclo de ensaio e medida dos coeficientes de atrito.

O Equipamento Desenvolvido

O equipamento baseia-se na configuração de três pinos contra um disco (Thorpe, 1981). Este tipo de configuração oferece vantagem, em termos estatísticos, devido ao fornecimento de três resultados para cada ensaio, minimizando, assim, o número de ensaios necessários para o estudo em questão.

Para efeito de descrição, o equipamento pode ser dividido em duas partes: **sistema de ensaio e sistema motor – controle**. O sistema de ensaio pode, ainda, ser subdividido em duas partes também: célula de ensaio e suporte do disco. A Figura 1 mostra o equipamento de ensaio de desgaste.

Sistema de ensaio

Célula de ensaio - Consiste da placa suporte em aço inoxidável onde são encaixados os três pinos cilíndricos que serão friccionados contra o disco e um quarto pino que será o controle de variação de massa, devido à absorção de umidade. Esta placa apresenta, portanto, quatro furos não passantes com diâmetro de 15 mm; três estão dispostos a 120 graus e em um raio de 45 mm do centro e um é central para a fixação do pino de controle de absorção de umidade. Na face com os furos está colado um tubo de acrílico para conter o líquido que tem a função de lubrificação e refrigeração das

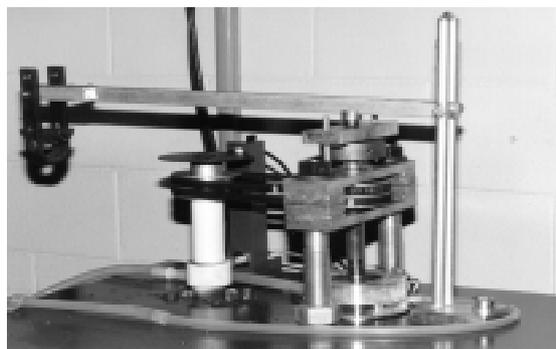


Figura 1. Equipamento de ensaio de desgaste desenvolvido

superfícies de atrito. Na face inferior é fixada, por três parafusos, uma base em aço que funciona como encaixe ao eixo inferior do equipamento. O conjunto descansa sobre uma esfera que tem como função permitir pequenas inclinações de modo a garantir que os três

pinos sejam solicitados de maneira igual. O conjunto formado pela placa, o tubo de acrílico e a base é chamado de “célula de ensaio” e é mostrado na Figura 2.

O eixo inferior do equipamento suporta toda a carga normal aplicada aos pinos, ficando apoiado em um rolamento cônico de rolos e um rolamento radial de esferas. A partir da rotação do disco em contato com os pinos, a força de atrito tende a gerar rotação do conjunto célula de ensaio e eixo inferior, mas o movimento é impedido devido a uma barra que é fixada ao eixo e que se apoia em uma célula de carga. A Figura 3 mostra a foto com parte do eixo inferior, a barra de apoio do eixo na célula de carga e a mesma.

Com a determinação da força de compressão aplicada sobre a célula de carga e conhecendo-se a carga normal aplicada sobre os pinos, é possível calcular a força de atrito e consequentemente o coeficiente de atrito dinâmico.

Apesar do uso de uma célula de carga devidamente calibrada é importante lembrar que o sistema para a determinação dos coeficientes de atrito deve ser aferido como um todo. Devido ao fato de que o eixo inferior está apoiado em rolamentos, a expectativa é de que o atrito gerado por estes altere as medidas obtidas pela célula de carga. Porém, como as solicitações são estáticas, é de se esperar, também, que a influência dos rolamentos seja constante. Para os objetivos deste trabalho tal aferição não se fez necessária, pois não se pretendia medir coeficientes de atrito e portanto não foi realizada.

Suporte do Disco - É uma placa de aço inoxidável onde é fixado, por um parafuso central, o disco de ensaio. Este conjunto é encaixado no eixo – motor. Na outra ponta deste eixo está fixada uma base com rolamento axial, para suportar o carregamento que será imposto às superfícies de contato.

O eixo - motor é livre para deslizar dentro de uma bucha, transmitindo assim o carregamento aplicado, mas gira solidário a ela. Na bucha está fixada a polia dupla para correias em “V”, ligadas ao eixo de um motorreductor. A Figura 4 mostra um disco e seu suporte, a Figura 5 mostra o posicionamento do disco e suporte fixados na ponta inferior do eixo – motor e a Figura 6 mostra a porção superior do eixo – motor, onde é fixada a base do rolamento axial e placa de apoio da alavanca de aplicação de carga.

Sistema Motor – Controle

O eixo – motor é acionado pela bucha que, por sua vez, esta fixada por interferência à polia dupla de correias em “V”. O conjunto é movido por um mo-



Figura 2. Célula de ensaio



Figura 3. Eixo inferior, barra de apoio e célula de carga



Figura 4. Disco de ensaio e suporte para fixação

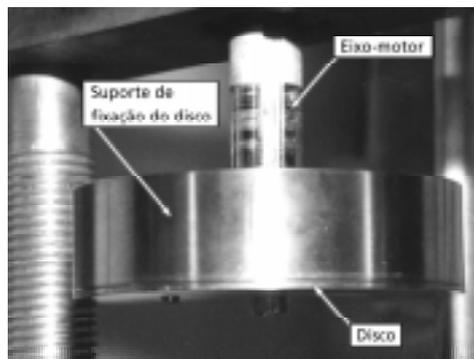


Figura 5. Disco e suporte fixados na ponta inferior do eixo-motor.



Figura 6. Ponta superior do eixo – motor com a base do rolamento axial e placa de apoio da alavanca de aplicação de carga



Figura 7. Foto com vista do eixo acionador, correias de transmissão e sensores do tacômetro e do contador de ciclos

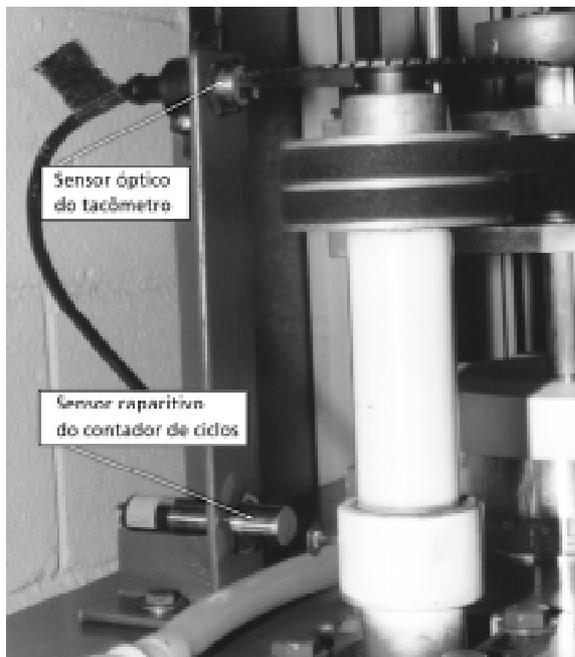


Figura 8. Detalhe do suporte com sensores para tacômetro e contador de ciclos

torredutor coaxial de 1,5 CV, alimentado e controlado por um inversor de frequência. A Figura 7 mostra o do eixo acionador do equipamento, que está ligado ao motorreductor e transmite o torque para as correias.

Para a medição do regime de rotação o equipamento conta com um tacômetro digital que recebe sinais de um sensor óptico. Para a contagem de ciclos e desligamento automático do motor existe um contador digital programável de ciclos, que recebe sinais de um sensor capacitivo. A Figura 8 mostra o detalhe do suporte dos sensores para o tacômetro e o contador de ciclos nele fixados.

Na realização deste projeto foram levadas em consideração as variáveis típicas envolvidas em um ensaio de desgaste por fricção. São elas:

- Tipo de movimento e velocidades entre as superfícies;
- Pressão de contato entre as superfícies;
- Presença de lubrificantes e/ou refrigeração;
- Acabamento superficial;
- Distância total percorrida no ensaio.

Para o melhor entendimento do equipamento a Figura 9 mostra o desenho esquemático de montagem do mesmo e para o esclarecimento quanto às características de operação, foi feita uma análise segundo estes cinco itens apresentados acima.

Tipo de Movimento e Velocidades entre as Superfícies - O equipamento construído apresenta movimento rotativo, podendo ter sentido constante ou alternado. A velocidade ou o regime de rotação pode ser variada linearmente através da utilização de um inversor de frequência trifásico Toshiba® VF – SX de 1,5 CV, que controla a rotação do sistema motorreductor WEG -YOKI® 1,5 CV, acionador do equipamento. A utilização do inversor de frequência permite a programação de rampas de aceleração e desaceleração, bem como da inversão de rotação. Desta forma, é possível a realização de ensaios em diversas condições de velocidades, sentido de rotação e acelerações.

Pressão de Contato entre as Superfícies - A pressão de contato entre as superfícies dos pinos e o disco é determinada pela força aplicada sobre os mesmos e pela área total de contato, sendo esta última, obviamente, função do diâmetro dos pinos. A placa suporte da célula de ensaio tem furação para a utilização de pinos de 15 mm de diâmetro.

Visando a utilização de pinos de diâmetro de 10 mm foram confeccionados adaptadores para encaixe nos furos da placa suporte, sendo um deles mostrado na Figura 10 juntamente com um pino de Polietileno. A

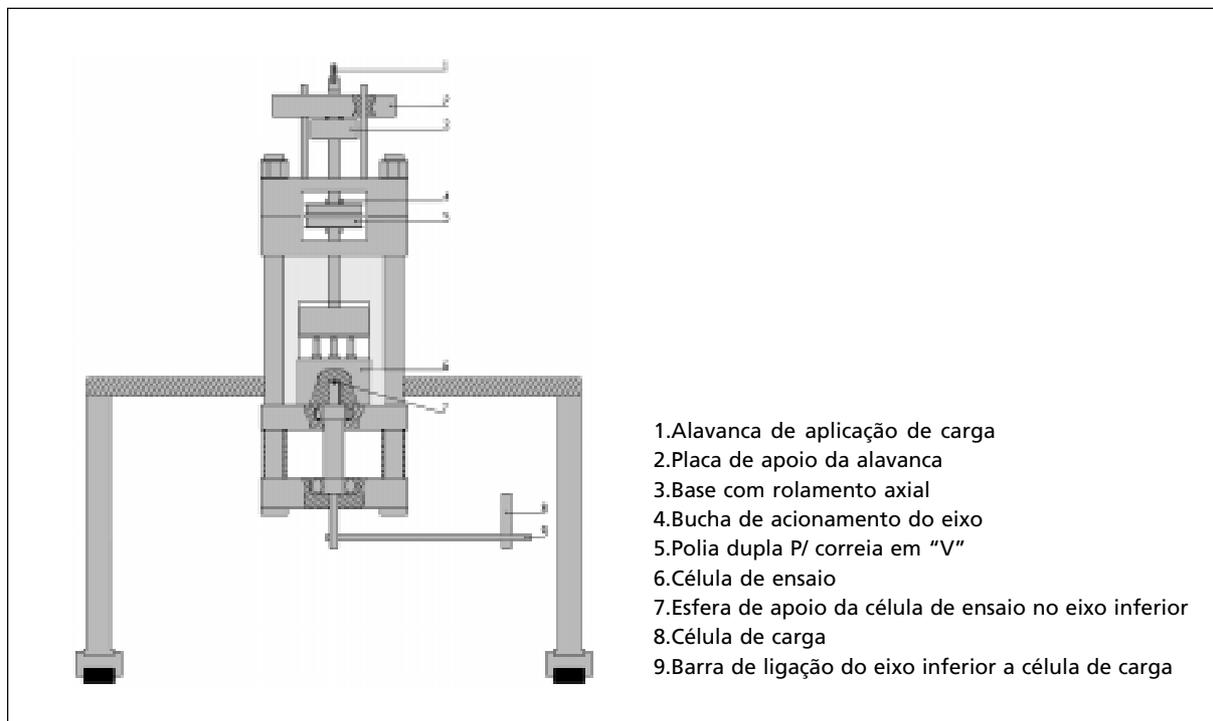


Figura 9. Desenho esquemático do equipamento de ensaio de desgaste

partir deste tipo de adaptação fica aberta a possibilidade de utilização de pinos em grande intervalo de diâmetros. Além de pinos é possível a fixação de anéis ou discos, utilizando os furos da placa suporte para fixação. Portanto, o equipamento permite a realização de ensaios com variação dimensional (diâmetros dos pinos, por exemplo) e de geometria dos corpos de prova (utilização de disco ou anel no lugar de pinos).

Presença de Lubrificantes - O equipamento dispõe de reservatório e uma bomba elétrica submersa, gerando um circuito fechado para a utilização de fluido lubrificante. A utilização deste para os ensaios envolvendo polímeros está relacionada, principalmente, à função de refrigeração. Entretanto, dependendo das características das superfícies dos pinos e do disco utilizados é possível a formação de um sistema de lubrificação hidrodinâmico (Caravia *et alii*, 1993 e Caravia *et alii*, 1995).

Por ser o objetivo do projeto deste equipamento a simulação das condições tribológicas de uma articulação do tipo sinovial, não foi instalado um filtro para recolher os *debris* gerados pelo desgaste no ensaio, uma vez que nas condições *in vivo* estes também permanecerão no fluido sinovial.

A temperatura da célula de ensaio e, conseqüentemente, dos corpos de prova pode ser mantida estável através da circulação de água que, por sua vez, esta armazenada em um reservatório de três

litros, sendo que o volume aproximado da célula é de 0,3 litros. A relação de 1:10 entre os volumes do reservatório e da célula, possibilita a estabilização da temperatura do sistema para as condições de ensaio previstas neste projeto.

Acabamento Superficial - Por tratar de fricção, a rugosidade das superfícies envolvidas pode determinar se a mecânica inicial de desgaste será adesiva ou abrasiva. Este ponto é particularmente importante em sistemas tribológicos metal – polímero (Barrett *et alii*, 1992).

A posição relativa entre disco e pinos pode gerar variações do comportamento ao desgaste, no ensaio de alguns materiais plásticos (Yamaguchi, 1990). A princípio, o projeto do equipamento prevê o posicionamento do disco atuando sobre os pinos. O objetivo



Figura 10. Adaptador para pino de diâmetro 10 mm

é minimizar a acumulação das partículas liberadas entre as superfícies pois estas influenciam no comportamento do sistema tribológico.

Ensaio de Desgaste

Para a verificação do funcionamento do equipamento, foram realizados ensaios de desgaste em diferentes condições PV, ou seja: com variação das pressões de contato (P) entre pinos e disco e velocidades de deslizamento (V).

Foram utilizados discos de aço inoxidável 316 L, usinados a partir de chapa de 5mm de espessura e pinos de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM), usinados a partir de chapas comercialmente disponíveis. Todos os ensaios foram realizados em duplicata, com a presença de água destilada e deionizada circulando entre a célula de ensaio e o reservatório.

O desgaste foi determinado a partir da perda em peso de cada pino, acrescido do valor relativo à absorção de água, determinado pela variação de massa do pino de controle. Os pinos foram pesados em uma balança digital Metler-Toledo® com precisão de 10^{-4} gramas.

Preparação do Material

A preparação da superfície de ensaio dos discos foi realizada através de polimento com circulação de água, em uma politriz metalográfica. Foram utilizadas lixas com as seguintes granulometrias: 100, 200, 320, 400, 600 e 1200.

Após o polimento cada disco era lavado, primeiro com detergente e água corrente e em seguida com álcool etílico absoluto, e secado em fluxo de ar quente.

Foram feitas medidas de rugosidade (Ra) para um lote de cinco discos. As medidas foram realizadas no sentido radial dos discos e o valor determinado foi menor que 0,05mm para todos os casos. Devido à limitação do equipamento disponível não foi possível determinar o valor exato da rugosidade, entretanto para o objetivo deste trabalho era importante apenas que todos os discos fossem preparados igualmente.

Não houve um cuidado especial quanto às superfícies dos pinos de PEUAPM, ficando o acabamento superficial resultante da usinagem como o utilizado nos ensaios de desgaste.

A limpeza inicial dos pinos foi feita com esponja, água e detergente, em seguida eram colocados em um banho de álcool etílico absoluto sob ultra – som por 60 segundos.

Os discos foram preparados todos de uma vez, embalados e guardados para serem utilizados com o andamento dos testes. Os pinos, entretanto, eram preparados em número de quatro e utilizados para ensaios no mesmo dia, diminuindo a possibilidade da ocorrência de contaminação. O manuseio (tanto dos discos quanto dos pinos), após a lavagem, era feito com luvas de látex novas. Este procedimento teve como objetivo evitar ou minimizar as possibilidades da ocorrência de contaminação no sistema tribológico.

Ao produto pressão de contato (P) por velocidade (V) atribui-se a sigla PV. Para a caracterização tribológica foram estabelecidas seis diferentes condições PV de ensaios, a partir da utilização de três velocidades e de três pressões de contato diferentes. A Tabela 1 mostra as velocidades e pressões de contato utilizadas, bem como as seis condições PV adotadas dentre as combinações possíveis.

As condições selecionadas de velocidades se apresentam em valores superiores às médias encontradas em próteses articulares de quadril, entretanto sua escolha se justifica no fato de que a idéia para os ensaios é a simulação em algumas horas de processos de desgaste que normalmente duram alguns anos. As velocidades foram escolhidas baseadas em valores médios indicados na literatura para a realização destes tipos de simulação (Dowson *et alii*, 1985; Dowson and Wallbridge, 1985; Cooper *et alii*, 1991; Marcus *et alii*, 1991; Barrett *et alii*, 1992; Cooper *et alii*, 1993; Jin *et alii*, 1993; Marcus and Allen, 1993).

As pressões de contato foram adotadas dentro do intervalo de valores possíveis para uma prótese articular de quadril. Neste caso os valores podem flutuar em função de características tais como o peso do paci-

Tabela 1. Condições de ensaio de desgaste

Velocidades em m/min.	10	20	30
Pressões de contato em Kgf/cm²	24	40	55

Condições PV utilizadas (m/min; Kgf/cm²): 240, 400, 480, 550, 720 e 800

Condições PV utilizadas (MPa; metro/s): 0,4, 0,66, 0,8, 0,91, 1,2 e 1,33

ente e tipo de movimento realizado. Subir escadas, por exemplo, pode resultar em esforços na articulação em valores de até quatro vezes o peso próprio do indivíduo (Wang *et alii*, 1995).

A distância total de deslizamento percorrida em cada ensaio foi de 60.000 metros, o que representa um número total de 212.207 voltas. A duração dos ensaios variou entre 33,3, 50 e 100 horas. Como foram realizados dois ensaios para cada uma das seis condições, o tempo total de ensaio para este estágio do trabalho foi de aproximadamente 867 horas.

Resultados dos Ensaios de Desgaste

Para a medida do desgaste foi utilizado o Fator de Desgaste (K), que é definido como o quociente entre o volume de material desgastado pela força normal de contato e pela distância percorrida, dado por:

$$K = \frac{(V)}{(P) \times (L)} \quad (1)$$

onde: V = Volume de material desgastado [mm³]; P = Força normal aplicada [N]; L = Distância percorrida [m]; K = Fator de desgaste [mm³/N m].

O comportamento dos fatores de desgaste no intervalo das condições tribológicas ensaiadas mostrou um crescimento proporcional ao aumento do produto PV. A Figura 11 mostra os fatores de desgaste para cada um dos corpos de prova (CDP) ou

seja os pinos de PEUAPM, em cada um dos dois ensaios realizados. O desgaste médio obtido entre os três pinos e os dois ensaios das seis diferentes condições está representado pela linha tracejada e a reta obtida por regressão linear está representada em linha contínua.

Entre PV 240 e 800 existem ensaios nas três velocidades e nas três pressões previstas, a partir da observação do gráfico pode – se notar que a dispersão dos resultados entre cada pino tende a aumentar com o crescimento do valor do produto “pressão – velocidade”. Na condição de PV 800 a dispersão dos resultados entre cada pino e entre os dois ensaios atingiu o máximo. Este crescimento na dispersão de resultados dos fatores de desgaste pode ser explicado pelo fato de que sob condições mais severas as possibilidades de ocorrência de um processo misto de desgaste são maiores e, portanto, as taxas de desgaste podem flutuar em função da eventual ocorrência de um novo mecanismo de desgaste e/ou do momento em que este passe a existir.

Conclusões

Os valores dos fatores de desgaste (K) cresceram entre PV 240 e 800 de forma aproximadamente linear, mas a dispersão dos resultados entre cada pino e entre os dois ensaios aumentou sensivelmente até o máximo na condição PV 800.

A maior dispersão, quanto aos resultados obtidos nas condições do produto PV mais elevados, pode ser

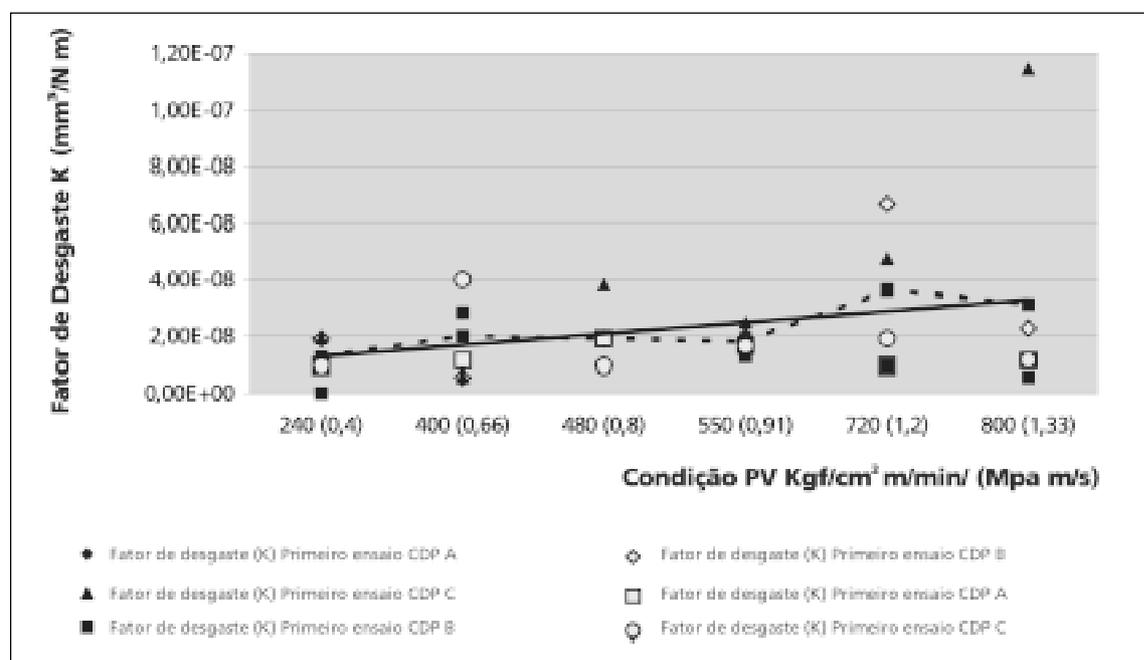


Figura 11 Fatores de desgaste (K) em função da condição PV, intervalo de 240 a 800 (0,4 a 1,33). Valores apresentados para cada pino, para média dos pinos e curva obtida por regressão linear.

explicada pelo fato de que sob condições mais severas as possibilidades da ocorrência de um processo misto de desgaste são maiores e, portanto, as taxas de desgaste podem flutuar em função da eventual ocorrência de um novo mecanismo de desgaste e/ou em função do momento em que este passe a existir (Reis, 1997).

Os resultados obtidos mostraram – se confiáveis e não se percebeu nenhum indício que denotasse alteração tendenciosa dos resultados, por falha do equipamento ou erro de concepção do projeto. Foram realizados ensaios que totalizaram mais de oitocentas horas de duração, em diferentes condições de velocidades e pressões de contato entre os pinos e o disco e não foi detectado nenhum indicativo de problema do projeto. Os ensaios realizados mostraram dados confiáveis, atestando a viabilidade do projeto e as possibilidades de sua utilização para o desenvolvimento de novos sistemas tribológicos para conjuntos protéticos.

Referências

- Barrett, T. S., Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W. (1992). "Effect of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra high molecular weight polyethylene". *Wear*. v. 153, p. 331.
- Caravia, L., Dowson, D. and Fisher, J. (1993). "Start up and steady state friction of thin polyurethane layers". *Wear*. v. 160 p. 191-197.
- Caravia, L., Dowson, D., Fisher, J., Corkhill, P. H. and Tighe, B. J. (1995). "Friction of hydrogel and polyurethane elastic layers when sliding against each other under a mixed lubrication regime". *Wear*. v. 181-183, p. 236-240.
- Cooper, J. R., Dowson, D. and Fisher, J. (1991). "Birefringent studies of polyethylene wear specimens and acetabular cups". *Wear*. v. 151, p. 391-402.
- Cooper, J. R., Dowson, D. and Fisher, J. (1993). "Macroscopic and microscopic wear mechanisms in ultra – high molecular weight polyethylene". *Wear*. v. 162-164, p. 378-384.
- Dowson, D., El-Hady, M. M., Gillis, B. J. and Atkinson, J. R. (1985). "Influence of counterface topography on the wear of ultra high molecular weight polyethylene under wet or dry conditions, in polymer wear and its control". *American Chemical Society*. Washington DC. p. 171-188.
- Dowson, D. and Wallbridge, N. C. (1985). "Laboratory wear tests and clinical observations of penetration of femoral heads into acetabular cups in total replacement hip joints. I: Chanley prostheses with Polytetrafluoroethylene acetabular cups". *Wear*. v. 104, p. 203-215.
- Gahr, Z. K. (1987). *Microstructure and wear of materials*. *Tribology series 10*, Elsevier Science Publishers.
- Jin, Z.M., Dowson, D. and Fisher, J. (1993). "Wear and friction of medical grade polyurethane sliding on smooth metal counterfaces". *Wear*. v. 162-162, p. 627-630.
- Marcus, K., Ball, A. and Allen, C. (1991). "The effect of grinding direction on the nature of transfer film formed during the sliding wear of ultrahigh molecular weight polyethylene against stainless steel". *Wear*. v. 151, p. 323-336.
- Marcus, K. and Allen, C. (1993). "Effects of fillers on the friction and wear behaviour of Ultrahigh molecular weight polyethylene during water – lubricated reciprocating sliding wear". *Wear*. v. 162-164, p. 1091-1102.
- Reis, M.C. (1997). *Estudo da influência de parâmetros de processamento na resistência ao desgaste do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Campinas.
- Thorp, J. M. (1981). "A novel tri – pin – on – disc tribometer designed to retain lubricants". *Tribology International*. April. p. 121-125.
- Wang, A., Sun, D. C., Stark, C. and Dumbleton, J. H. (1995). "Wear mechanisms of UHMWPE in total joint replacements". *Wear*. v. 181-183, p. 241-249.
- Yamaguchi, Y. (1990). *Tribology of plastic materials*. *Tribology Series 16*. Elsevier Science Publishers.