COMPORTAMENTO AO ATRITO DE UM NOVO MATERIAL (COMPÓSITO PEEK-CF30) PARA APLICAÇÃO NA COMPONENTE ACETABULAR DA PRÓTESE DA ANCA

N. Marques e J. P. Davim

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





RESUMO

O Poly-ether-ether-ketone (PEEK) reforçado com fibras de carbono apresenta um potencial elevado para utilização em aplicações biomédicas, nomeadamente na prótese da anca. Neste trabalho pretende-se avaliar o desempenho ao atrito deste material em deslizamento contra aço utilizando água destilada como meio lubrificante, tendo em vista uma possível aplicação como superficie de deslizamento na componente acetabular da prótese da anca. Foram realizadas curvas de atrito (em função dos parâmetros de Stribeck e de Emmens) de forma a identificar o regime de lubrificação subjacente ao par de materiais em contacto e às condições operatórias de teste.

1- INTRODUÇÃO

Geralmente o componente acetabular de uma prótese da anca é realizado em polietileno de ultra-alta densidade (UHMWPE). Este componente articula contra uma cabeça femoral metálica (aço inoxidável 316L, Ti6Al4V ou CoCrMo) ou menos frequentemente cerâmica (alumina ou zircónia) (J. H. Dumbleton, 1981), (T. Stewart et al, 1997).

O comportamento tribológico de uma aspecto junta de substituição um é perfeito para seu 0 fundamental funcionamento e durabilidade. Geralmente, uma prótese da anca apresenta um tempo de vida compreendido entre 15 e 20 anos. Contudo, o número de cirurgias de substituição (designadas por artroplastias) tem vindo a aumentar nas pessoas mais jovens, pelo que é imperioso aumentar o tempo de vida de uma prótese da anca (C. M. McNie et al, 2000).

O desgaste associado ao UHMWPE é, a obstáculo à prazo, o maior longo durabilidade de uma prótese, devido à reacção das células adjacentes às partículas de desgaste (H. Dong et al, 1999). Do mesmo modo, um atrito excessivo pode originar o aparecimento de folgas que induzem instabilidade (C. M. Agrawal et al, 1995). No entanto, apesar de o atrito estar fortemente relacionado com o desgaste, um elevado atrito não implica necessariamente um elevado desgaste (A. Unsworth et al, 1975).

O "papel" do atrito para o sucesso de uma prótese da anca tem sido amplamente discutido pela comunidade científica (R. M. Hall and A. Unsworth, 1997). O atrito, para além de originar uma perda da eficiência mecânica (P. Blau, 1996), pode exercer um efeito preponderante no sucesso de uma prótese da anca, especialmente se a componente acetabular não se encontrar devidamente fixada. Do mesmo modo, a fixação inicial é provavelmente mais frágil após a cirurgia, do que o idealizado experimentalmente *in vitro* (R. M. Hall and A. Unsworth, 1997).

0 Poly-ether-ether-ketone (PEEK) reforçado com fibras de carbono (PEEK-CF30), apresenta uma grande resistência ao desgaste, devido à presença das fibras (B. H. Stuart, 1998), (Q. Wang et al, 1997), (M. Kurokawa et al, 1999), (R. P. Steijn, 1986). Este material tem sido investigado como substituto dos metais para aplicação estrutural na haste do fémur (G. R. Maharaj and R. D. Jamison, 1993). Contudo, o seu comportamento tribológico, como material de deslizamento para aplicação na componente acetabular da prótese da anca, não foi ainda largamente explorado (A. Wang et al, 1998).

Em deslizamento contra aço, o PEEK-CF30 promove a transferência de um filme da matriz polimérica para a superfície antagonista. Este filme provoca uma descida gradual e considerável do coeficiente de atrito durante a fase de rodagem após a qual estabiliza (J. P. Davim et al, 2001).

A teoria clássica de atrito de Coulomb define o coeficiente de atrito independente da velocidade e da carga no contacto. No entanto, com a presença de um lubrificante, o coeficiente de atrito do par de materiais em contacto depende da velocidade, tensão de contacto, viscosidade do lubrificante e rugosidade das superfícies (P. Blau, 1996), (J. G. Lancaster et al, 1997).

Uma forma comum de distinguir os mecanismos de lubrificação presentes no contacto entre um par de materiais é a realização de uma curva de Stribeck. A figura 1 apresenta a titulo genérico uma curva de Stribeck.



Fig. 1- Curva de Stribeck (P. Blau, 1996).

De acordo com W. C. Emmens, para baixos valores da tensão de contacto, o coeficiente de atrito entre metais é fortemente dependente da rugosidade das superfícies. Quando duas superfícies interagem em movimento relativo na presença de um lubrificante este é forçado a escoar por uma rede de microcanais capaz de suportar parte da carga aplicada. Este mecanismo é o responsável pela descida do coeficiente de atrito (W. C. Emmens, 1988). Do mesmo modo, é sabido que a rugosidade da superfície mais dura é um factor de extrema importância no comportamento tribológico do UHMWPE (J. G. Lancaster et al, 1997) e do PEEK-CF30 (J. P. Davim et al, 2001).

Para o UHMWPE, o aumento da velocidade de deslizamento manifesta-se com a subida do coeficiente de atrito. Ao invés, um aumento na tensão de contacto provoca a diminuição do coeficiente de atrito (B. Weightman et al, 1972). Em funcionamento in vivo uma prótese da anca, cuja componente acetabular é realizada em UHMWPE, apresenta geralmente uma espessura do filme lubrificante muito inferior à rugosidade superficial do componente em UHMWPE. consequentemente verifica-se um regime de lubrificação limite ou mista e a geração de partículas de desgaste (D. Jalali-Vahid et al. 2001), (T. Stewart et al, 1997), (Z. M. Jin et al, 1997).

Durante uma solicitação dinâmica da tensão de contacto verifica-se a formação

de um mecanismo vulgarmente designado por "filme comprimido" (J. H. Dumbleton, 1981), susceptível de ocorrer *in vivo* e capaz de assegurar alguma protecção às superfícies de deslizamento. Deste modo, adicionalmente pretendeu-se avaliar a evolução do coeficiente de atrito de acordo com um perfil de solicitação dinâmica da tensão de contacto e da velocidade de deslizamento.

O objectivo deste estudo foi verificar o efeito da rugosidade, da velocidade de deslizamento e da tensão de contacto no coeficiente de atrito do par PEEK-CF30/Aço e, simultaneamente, identificar o regime de lubrificação subjacente relacionando o coeficiente de atrito com os parâmetros de Stribeck e de Emmens.

2- PLANEAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados numa máquina de configuração pino sobre disco com movimento unidireccional. Os pinos foram materializados pelo PEEK-CF30 (representando a componente acetabular). Ao invés, os discos foram realizados em aço (representando a componente femoral).

2.1- Materiais e lubrificante

Os pinos foram ensaiados com um diâmetro de 10 mm e uma geometria de face plana acabada por maquinagem. O PEEK utilizado nos pinos apresentava um teor de reforço de 30% de fibras curtas (PEEK-CF30). As propriedades deste material são apresentadas na tabela 1.

Os discos, realizados em aço inoxidável 316L, apresentavam uma dureza de 230 HB e a seguinte composição química: 0.03% C, 2% Mn, 0.05% P, 0.03% S, 1% Si, 16-18% Cr, 10-14% Ni e 2-3% Mo.

obtidos por discos foram Os maquinagem para'um diâmetro de 76 mm e uma espessura de 8 mm. Seguidamente, foram acabados por rectificação para diferentes rugosidades predefinidas no plano experimental. A rugosidade das superfícies avaliada com ùm foi rugosímetro Hommelwerke Tester T1000 segundo uma direcção perpendicular às estrias provocadas pelo processo de rectificação.

Apesar do soro bovino ser o meio de aconselhado devido às suas teste semelhanças com o líquido sinovial em termos do conteúdo proteico, a água destilada tem sido utilizada como meio lubrificante em experiências in vitro (C. M. Agrawal et al, 1995; V. Saikko, 1992). A água destilada apresenta uma viscosidade muito semelhante à do soro bovino e de experiências realizadas acordo com anteriormente, o valor registado para o coeficiente de atrito para os dois meios lubrificantes praticamente coincidiram (C. M. Agrawal et al, 1995), (P. Kumar et al, 1991), (H. McKellop et al, 1978).

	Fabela 1	1- Descrição	das propriedades	do PEEK-CF30.
--	-----------------	--------------	------------------	---------------

Propriedade	Unidade	Norma	Valor PEEK-CF30
Densidade	[g/cm3]	ISO 1183	1.41
Taxa de absorção de água -após 24/96 horas imerso em água a 23°C	[%]	DIN 53495	
Propriedades Mecânicas	-		
Tensão de cedência Deformação à rotura	[MPa] [%]	ISO 527 ISO 527 ISO 527	3
Modulo de elasticidade Dureza por indentação esférica H 358/30 ou H 961/30	MPa	ISO 2039-1	340

2.2- Tribómetro

Um tribómetro do tipo pino sobre disco, modelo Plint TE 67/HT controlado por computador, foi utilizado para a realização dos ensaios. A figura 2 apresenta o tribómetro utilizado.



Fig. 2- Tribómetro Plint TE67/HT utilizado.

O pino foi fixado ao braço de carga por uma bucha de aperto, ficando assim com dois graus de liberdade: um vertical, de forma a permitir a aplicação directa da carga e um horizontal, que origina a medição da força de atrito.

A carga aplicada provem de um sistema pneumático montado em linha com uma célula de carga com funcionamento à compressão.

Um motor d.c. assegura velocidades controladas e um termopar do tipo K, com uma ponta resistente ao desgaste, permite a medição da temperatura na superfície do disco (também definida e controlada por computador) durante o movimento de deslizamento. Uma indicação do processo de desgaste é dada por um potenciómetro linear montado no pistão de carga do sistema pneumático.

2.3- Procedimento experimental

O tempo afecto a cada um dos ensaios realizados foi diminuto (cerca de - 8 minutos), pelo que foi minimizada a transferência de filmes da matriz polimérica. Os ensaios foram realizados individualmente a uma rugosidade e tensão de contacto constantes, variando apenas a velocidade de deslizamento (V) de acordo com o ilustrado na figura 3 (a). O valor da velocidade variou de um valor máximo (0.6 m/s) até um valor mínimo (0.01 m/s) e voltou novamente ao patamar superior.

Cada patamar de velocidade foi mantido constante durante 30 segundos, dos quais os últimos 10 serviram para a aquisição de valores do coeficiente de atrito com uma frequência de 1 Hz, sendo a sua média guardada em tempo real para um ficheiro predefinido no software de programação.

Refira-se que a carga média aplicada na junta da anca é de aproximadamente três vezes o peso do corpo humano o correspondente a uma tensão de contacto de 3.45 MPa. No entanto, a tensão de contacto verificada na junta da anca pode situar-se na gama 2.1-10.35 MPa. Ao invés, a velocidade média verificada está compreendida entre 0.02 e 0.05 m/s. Do mesmo modo, a rugosidade da superfície mais dura deve ser baixa (tipicamente na ordem de um $R_a = 0.05 \ \mu\text{m}$) (J. H. Dumbleton, 1981), (ASTM F732-82, 1991).



Fig. 3- (a) Perfil de velocidade utilizado; (b) Exemplo de um mapa de atrito obtido.

Os ensaios, num total de nove, foram realizados sob condições operatórias distintas, nas quais foram variados o valor da rugosidade média aritmética (R_a) da superfície metálica (0.10, 0.70 e 1.20 µm) e da tensão de contacto (P) aplicada (2.5, 5 e 10 MPa). Posteriormente os nove ensaios foram repetidos de forma a confirmar os resultados obtidos na primeira série. No fim de cada ensaio foi obtido um mapa de atrito, como ilustrado a título genérico na figura 3 (b).

Adicionalmente, foram realizados mais dois ensaios à rugosidade mais baixa (R_a = 0.10 µm) e com velocidades médias na gama 0.01-0.15 m/s, de acordo com um perfil dinâmico da tensão de contacto e velocidade de deslizamento (ilustrado na a velocidade Assim. de 4). figura deslizamento e a tensão de contacto seguiram uma função sinusoidal (com um periodo de 1 segundo) desfasadas em cerca modo, pretende-se 180°. Deste de aproximadamente mais representar 0 possível as condições de movimento verificadas in vivo. As tensões de contacto médias utilizadas foram 2.5 e 5 MPa. A escolha dos valores associados à velocidade de deslizamento e à tensão de contacto foi limitada por condicionantes da máquina para os ensaios dinâmicos, no entanto convém salientar que os valores considerados abrangem os verificados na gama de utilização normal de uma junta da anca (J. H. Dumbleton, 1981).

3- RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

A evolução do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento, para diferentes valores da tensão de contacto e rugosidade da superfície metálica, pode ser observada na figura 5. A gama de velocidades de deslizamento característica $(V \le 0.1 \text{ m/s})$ do funcionamento *in vivo* na junta da anca está limitada à esquerda pela linha a traço descontínuo.

Da análise da figura 5, é observável a preponderância da rugosidade da superfície metálica nos valores do coeficiente de atrito obtidos. Verifica-se que para valores de rugosidade baixa ($R_a = 0.10 \mu$ m) e tensão de contacto baixa/média (P = 2.5/5 MPa) o valor do coeficiente de atrito baixa substancialmente (figura 5 a). Esta observação poder-se-á dever ao facto de baixas tensões de contacto provocarem uma área real inferior à área aparente, mesmo em deslizamento, permitindo o escoamento







Fig. 5 - Evolução do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento. a) Rugosidade média aritmética, R_a = 0.10 µm; b) R_a = 0.70 µm; c) R_a = 1.20 µm.

do fluido lubrificante pelos microcanais formados. Outro aspecto a realçar é o facto de o coeficiente de atrito a elevada rugosidade ($R_a = 1.20 \mu$ m) apresentar, para uma condição de baixa tensão de contacto (P = 2.5 MPa) e elevada velocidade de deslizamento (V > 0.1 m/s), um coeficiente de atrito ligeiramente superior ao verificado para tensões de contacto superiores (figura 5. c). Uma possível justificação para esta observação poder-se-á dever ao facto de valores da tensão de contacto média/alta (P= 5/10 MPa) originarem, em presença de elevada rugosidade da superfície metálica, uma transferência "suave" de um filme proveniente da matriz do material compósito para o disco metálico (J. P. Davim et al, 2001), (J. P. Davim and N. Marques, 2001).

Os ensaios realizados sob um perfil dinâmico da tensão de contacto e velocidade de deslizamento (de acordo com a figura 4) foram realizados, como referido atrás, para o valor de rugosidade mais baixa (R_a) 0.10 μm), velocidades = de deslizamento na gama 0.01-0.15 m/s e tensões de contacto baixas/médias (P = 2.5e 5 MPa). Os resultados obtidos são apresentados na figura 6.





O comportamento do PEEK-CF30 sob um perfil dinâmico da velocidade de deslizamento e tensão de contacto contraria o verificado para um perfil estático. Com a introdução do perfil dinâmico verifica-se um aumento do coeficiente de atrito. Este facto poder-se-á dever à existência de um contacto sólido, entre ambas as superfícies, provocado pela solicitação dinâmica. Deste modo o suposto mecanismo de lubrificação designado por "filme comprimido" não se verificou.

3.1- Parâmetro de Stribeck

A curva que relaciona o coeficiente de variáveis diferentes as atrito com operacionais (leia-se tensão de contacto e deslizamento) e que velocidade de de regimes evidencia os diferentes lubrificação é a chamada curva de Stribeck (T. Stewart et al, 1997), (R. M. Hall and A. Unsworth, 1997), (W. C. Emmens, 1988). O parâmetro de Stribeck é definido pela seguinte expressão:

$$S = \eta \frac{V}{P}$$
(1)

sendo η a viscosidade em [Pa.s], V a velocidade de deslizamento em [m/s] e P a tensão de contacto em [Pa].

O valor da viscosidade da água destilada foi admitido como η = 0.000845 [Pa.s]. Desta forma aplicando a expressão (1) aos resultados obtidos foram elaboradas curvas de Stribeck para os diferentes materiais e distintas condições operatórias. As curvas correspondentes são apresentadas na figura 7.





Os resultados obtidos, apresentados na figura 7 (a), indiciam que o PEEK-CF30 (sob uma condição da tensão de contacto constante) apresenta uma curva de Stribeck na região de lubrificação limite/mista. Contudo, nos casos em que a rugosidade do disco é baixa ($R_a = 0.10 \ \mu m$) e a tensão de contacto situa-se na gama baixa/média (P = 2.5/5 MPa), a linha de tendência definida pela maior parte dos pontos não é respeitada. É precisamente nesta última condição da tensão de contacto e rugosidade que funciona in vivo a prótese da anca. Assim, se a rugosidade da superfície metálica for baixa, em condições normais, o coeficiente de atrito associado ao par de contacto PEEK-CF30/Aço assumirá valores relativamente baixos.

De acordo com os resultados apresentados na figura 7 (b), o perfil dinâmico origina a formação de uma linha de tendência diferente característica de um contacto sólido.

3.2- Parâmetro de Emmens

A análise da variação do coeficiente de atrito com o parâmetro de Stribeck não tem em conta o efeito da rugosidade da superfície metálica que de acordo com os resultados apresentados anteriormente (figura 5) é um factor preponderante no comportamento ao atrito do par PEEK-CF30/Aço (J. P. Davim et al, 2001). Desta forma, procurou-se realizar curvas de atrito que incluíssem o efeito da rugosidade da superfície metálica. Por conseguinte, utilizou-se o recurso ao parâmetro hidrodinâmico definido por Emmens (W. C. Emmens, 1988) de acordo com a seguinte expressão:

$$H = \eta \frac{V}{P.R_{pm}^{2}}$$
(2)

sendo η a viscosidade em [Pa.s], V a velocidade de deslizamento em [m/s], P a tensão de contacto em [Pa] e R_{pm} a

rugosidade média de aplainamento em $[\mu m]$, definida como a média aritmética dos cincos maiores picos acima da linha média do perfil de rugosidade.

A aplicação da equação (2) aos resultados obtidos permitiu obter os gráficos apresentados na figura 8.

Os resultados obtidos, apresentados na figura 8 (a), indiciam que com a introdução do parâmetro de Emmens foi obtida uma linha de tendência "bem definida" própria de um regime de lubrificação limite/mista, inclusive para os valores característicos de funcionamento in vivo na junta da anca. Contudo, para uma condição da tensão de contacto, P = 10 MPa e rugosidade média aritmética, $R_a = 0.10 \ \mu m$, a linha de tendência não é respeitada. Esta situação dever-se-á, muito provavelmente, ao facto da elevada tensão de contacto não permitir o escoamento do fluido lubrificante pelos microcanais. A mesma observação foi verificada para pares de contacto metálicos (sujeitos a um processo de conformação plástica), onde se concluiu que o coeficiente de atrito a elevadas pressões não é controlado pelo quadrado da rugosidade (W. C. Emmens, 1988).

Os resultados apresentados na figura 8 (b) reforçam a existência de uma situação de contacto sólido entre as superfícies de contacto quando é aplicado um perfil dinâmico da tensão de contacto e velocidade de deslizamento.

3.3- Observação das Superfícies de Deslizamento

A transferência de filmes da matriz polimérica para a superfície do disco foi, como já referido atrás, observada para os casos de uma tensão de contacto média/alta (P = 5/10 MPa) e elevada rugosidade $(R_a = 1.20 \text{ µm})$.





A observação das superfícies de contacto numa fase posterior à realização dos ensaios é importante para a identificação de possíveis mecanismos de transferência de filmes associados ao par de materiais em contacto e à configuração utilizada. Deste modo, as superfícies de deslizamento foram sujeitas a uma observação por microscopia electrónica de varrimento (MEV). A Figura 9 ilustra a superfície do PEEK-CF30 (após ensaio) observada por MEV.

Na figura 9, é visível o aparecimento de estrias de abrasão e de algumas "áreas brancas" em torno das fibras de carbono. Com o recurso a microanálise de raio-X foi possível identificar que estas "áreas brancas" deviam-se à transferência de ferro proveniente da superfície metálica.



Fig. 9 - Micrografia obtida por MEV da superfície do PEEK-CF30 após ensaio.

4- CONCLUSÕES

Tendo em consideração a metodologia experimental utilizada e os resultados obtidos, é possível apresentar as seguintes conclusões:

O efeito da tensão de contacto no coeficiente de atrito do par PEEK-CF30/Aço é desprezível para valores de elevada rugosidade ($R_q \ge 0.70 \ \mu m$). Para valores de baixa rugosidade ($R_a = 0.10 \ \mu m$) e tensão de contacto baixa/média (P = 2.5/5MPa) o valor do coeficiente de atrito baixa significativamente. Contudo, é nesta gama de valores de rugosidade e tensão de contacto que funciona a junta da anca em condições normais. Para uma tensão de contacto elevada (P = 10 MPa) o mesmo comportamento (baixo coeficiente de atrito) não se verifica, muito provavelmente devido à baixa densidade de microcanais formados entre as superfícies de contacto. Assim, em condições normais de funcionamento semelhantes às verificadas in vivo, o par de contacto analisado coeficientes apresenta de atrito relativamente baixos, compreendidos na gama 0.05-0.12.

A introdução de uma condição dinâmica da tensão de contacto e velocidade de deslizamento não melhorou o comportamento ao atrito do par PEEK-CF30/Aço, o que indicia que a acção do mecanismo "filme comprimido" não se verificou.

A análise pelo parâmetro de Stribeck evidenciou, para as condições de funcionamento in vivo normais (baixa rugosidade e baixa/média tensão de contacto), uma curva de valores bem distinta da obtida para todas as outras condições. Pelo contrário, a introdução do parâmetro de Emmens mostrou que os valores do coeficiente de atrito obtidos para as condições de funcionamento in vivo normais, são contabilizados pela curva de atrito formada. Apenas para um valor de rugosidade baixa ($R_a = 0.10 \ \mu m$) e tensão de contacto elevada (P = 10 MPa) a curva de atrito não foi "respeitada". Deste modo, é demonstrado que para baixos/médios valores da tensão de contacto, o coeficiente de atrito do par PEEK-CF30/Aço apresenta uma forte dependência com o parâmetro de Emmens que contabiliza a viscosidade do lubrificante, a tensão de contacto, a velocidade de deslizamento e sobretudo a rugosidade da superfície metálica.

O aumento da velocidade de deslizamento promove uma descida gradual do coeficiente de atrito do par PEEK-CF30/Aço. O par PEEK-CF30/Aço sob uma condição de lubrificação com água destilada funciona numa região limite/mista em toda a gama de velocidades utilizada.

O par de contacto PEEK-CF30/Aço apresenta a transferência de filmes da matriz polimérica para a superfície metálica, sobretudo no caso de uma elevada rugosidade ($R_a = 1.20 \mu m$). Do mesmo modo, existe a transferência de pequenas quantidades de ferro (provenientes da superfície metálica) para o material compósito, especialmente em torno das fibras de carbono.

REFERÊNCIAS

- J. H. Dumbleton, "Tribology of natural and artificial joints", Elsevier Scientific Publishing Company, (1981).
- T. Stewart, Z. M. Jin and J. Fisher, "Friction of composite cushion bearings for total knee joint replacements under adverse lubrication conditions", *Journal of Engineering in Medicine Part H*, 211 (1997) 451-465.
- C. M. McNie, D. C. Barton, E. Ingham, J. L. Tipper, J. Fisher and M. H. Stone, "The prediction of polyethylene wear rate and debris morphology produced by microscopic asperities on femoral heads", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine – Part H*, 11:3 (2000) 163-174.
- H. Dong, W. Shi and T. Bell, "Potential of improving tribological performance of UHMWPE by engineering the Ti6Al4V counterfaces", *Wear*, 225-229 I (1999) 146-153.
- C. M. Agrawal, D. M. Micallef and J. Mabrey, in: D. L. Wise et al. (ed.), "The Wear of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene", in Encyclopedic Handbook of Biomaterials and Bioengineering, Part A:

materials, Volume 2, Marcel Dekker Inc, 1995, p.1759-1793.

- A. Unsworth, D. Dowson, V. Wright and D. Koshal, "The frictional Behavior of Human Synovial Joints", *Journal of Lubrication Technology*, (1975) 377-381.
- R. M. Hall and A. Unsworth, "Friction in hip prostheses- Review", *Biomaterials*, 18 (1997) 1017-1026.
- P. Blau, "Friction Science and Technology", Marcel Dekker, New York, 1996.
- B. H. Stuart, "The application of Raman spectroscopy to the tribology of polymers", *Tribology International* 31: 11 (1998) 687-693.
- Q. Wang, Q.Xue and W. Shen, "The friction and wear properties of nanometre SiO₂ filled polyetheretherketone", *Tribology International*, 30: 3 (1997) 193-197.
- M. Kurokawa, Y. Uchiyama and S. Nagai, "Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone", *Tribology International*, 32 (1999) 491-497.
- R. P. Steijn, "Friction and Wear", in: Brostow,
 W. and Corneliussen, R. D. (ed.): "Failure of Plastics", Hanser Publishers, Munchen, 1986.
- Gary R. Maharaj and Russel D. Jamison, in: "Composite Materials for Implant Applications in the Human Body-Characterization and Testing", eds. Russel D. Jamison and Leslie N. Gilbertson (ASTM Publication, 1993).
- A. Wang, R. Lin, V. K. Polineni, A. Essner, C. Stark and J. H. Dumbleton, "Carbon fiber reinforced polyether ether ketone composite as a bearing surface for total hip replacement", *Tribology International*, 31: 11 (1998) 661-667.
- J. P. Davim, N. Marques, and A. Monteiro Baptista, "Effect of carbon fibre reinforcement in the frictional behaviour of peek in a water lubricated environment", *Wear* 251 (2001) 1100-1104.
- J. G. Lancaster, D. Dowson, G. H. Isaac and J. Fisher, "The wear of ultra-high molecular weight polyethylene sliding on metallic and ceramic counterfaces representative of current femoral surfaces in joint replacement", *Journal of Engineering in Medicine - Part H*, 211 (1997) 17-24.

- W. C. Emmens, "The Influence of Surface Roughness on Friction", Controlling Sheet Metal Forming Processes, Michigan (1988) 63-70.
- B. Weightman, S. Simon, I. Paul, R. Rose and E. Radin, "Lubrication Mechanism of Hip Joint Replacement Prostheses", Journal of Lubrication Technology, April (1972) 131-135.
- D. Jalali-Vahid, M. Jagatia, Z. M. Jin and D. Dowson, "Prediction of lubricating film thickness in UHMWPE hip joint replacements", *Journal of Biomechanics*, 34 (2001) 261-266.
- Z. M. Jin, D. Dowson and J. Fisher, "Analysis of fluid film lubrication in artificial hip joint replacements with surfaces of high elastic modulus", *Journal of Engineering in Medicine - Part H*, 211 (1997) 247-256.
- V. Saikko, "A simulator study of friction in total replacement hip joints", *Journal of Engineering In Medicine - Part H*, 206 (1992), 201-211.
- P. Kumar, M. Oka, K. lkeuchi, K. Shimizu, T. Yamamuro, H. Okumura and Y. Kotura, "Low wear rate of UHMWPE against zirconia ceramic (Y-PSZ) in comparison to alumina ceramic and SUS 316L alloy", J. Biomed. Mater Res., 25 (1991) 813-828.
- H. McKellop, I. C. Clarke, K. L. Markolf and H. C. Amstutz, "Wear characteristics of UHMW polyethylene: A method for accurately measuring extremely low wear rates", J. Biomed. Mater. Res., 12 (1978) 895-927.
- ASTM F732-82, "Reciprocating pin-on-flat evaluation of friction and wear properties of polymeric materials for use in total joint prostheses", in 1991 Annual Book of ASTM Standards. Section 13, Medical Devices and Services, R. Storer, Editor, ASTM. 227-232, 1991.
- J. P. Davim and N. Marques, "Evaluation of Tribological Behaviour of Polymeric Materials for Hip Prostheses Application", *Tribology Letters*, 11 (2001) 91-94.

