

ANÁLISE COMPORTAMENTAL DOS COEFICIENTES DE ATRITO E DESGASTE DE SISTEMAS REVESTIDOS SUBMETIDOS A DESGASTE MICRO-ABRASIVO

Ronaldo Câmara Cozza¹
 Abel André Candido Recco²
 André Paulo Tschiptschin³
 Roberto Martins de Souza⁴
 Deniol Katsuki Tanaka⁵

Resumo

Este trabalho objetiva estudar a influência das durezas de filmes finos de nitreto de titânio (TiN) e carbeto de titânio (TiC) sobre os coeficientes de atrito e desgaste, em ensaios *ball-cratering*. Uma esfera de aço AISI 52100 e dois corpos de prova de aço-ferramenta AISI D2, um revestido com TiN e outro revestido com TiC, foram utilizados nos experimentos. A pasta abrasiva foi preparada com partículas de carbeto de silício (SiC) preto e água destilada. Duas forças normais e seis distâncias de deslizamento foram definidas, sendo as forças normal (N) e tangencial (T) monitoradas constantemente. Assim como N e T , com o auxílio de uma Régua Linear, o deslocamento (h) do corpo de prova, na direção paralela à aplicação da carga normal, foi continuamente medido, o que permite o cálculo do coeficiente de desgaste para as diferentes distâncias de deslizamento sem a necessidade de interrupção do ensaio. O coeficiente de atrito é determinado pela relação entre as forças tangencial e normal e, para ambos os revestimentos, os valores permaneceram, aproximadamente, na mesma faixa (entre $\mu = 0,4$ e $\mu = 0,9$). Por outro lado, o coeficiente de desgaste diminui com o aumento da dureza do revestimento.

Palavras-chave: Ensaio de desgaste; Coeficiente de atrito; Coeficiente de desgaste.

ANALYSIS OF THE FRICTION AND WEAR COEFFICIENTS OF COATED SYSTEMS SUBMITTED TO MICRO-SCALE ABRASION

Abstract

This work aims to study the influence of titanium nitride (TiN) and titanium carbide (TiC) coatings hardness on the friction coefficient and wear coefficient in ball-cratering micro-abrasive wear tests. A ball of AISI 52100 steel and two specimens of AISI D2 tool steel, one coated with TiN and another coated with TiC, were used in the experiments. The abrasive slurry was prepared with black silicon carbide (SiC) particles and distilled water. Two normal forces and six sliding distances were defined, and both normal (N) and tangential (T) forces were monitored constantly. The movement of the specimen in the direction parallel to the applied force was also constantly monitored with the help of a Linear Ruler. This procedure allows the calculation of the wear coefficient for the different sliding distances without the need to stop the test. The friction coefficient is determined by the ratio between the tangential and the normal forces, and for both TiN and TiC coatings, the values remained, approximately, in the same range (from $\mu = 0.4$ to $\mu = 0.9$). On the other hand, the wear coefficient decreases with the increase in coating hardness.

Key words: Wear testing; Friction coefficient; Wear coefficient.

¹Doutorando, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP – EPUSP. Professor do Centro Universitário da FEI e da FATEC-Mauá. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Cep 09850-901, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: rcamara@fei.edu.br

²Doutor em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP – EPUSP. Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cep 05508-030, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: abel.recco@poli.usp.br

³Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP – EPUSP.

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cep 05508-030, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: andre.tschiptschin@poli.usp.br

⁴Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP – EPUSP.

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cep 05508-030, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: roberto.souza@poli.usp.br

⁵Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP – EPUSP.

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cep 05508-030, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: dktanaka@usp.br

I INTRODUÇÃO

Recentemente, o ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa tem alcançado grande aceitação em universidades e centros de pesquisas, sendo amplamente adotado em estudos envolvendo desgaste abrasivo de materiais. A Figura 1a apresenta uma ilustração esquemática do princípio deste tipo de ensaio de desgaste abrasivo, em que uma esfera, em movimento de rotação, é forçada contra o corpo de prova, na presença de uma pasta abrasiva. Há duas configurações de equipamentos para conduzir este ensaio: “esfera-livre” (Figura 1b)⁽¹⁾ e “esfera-fixada” (Figura 1c).^(2,3)

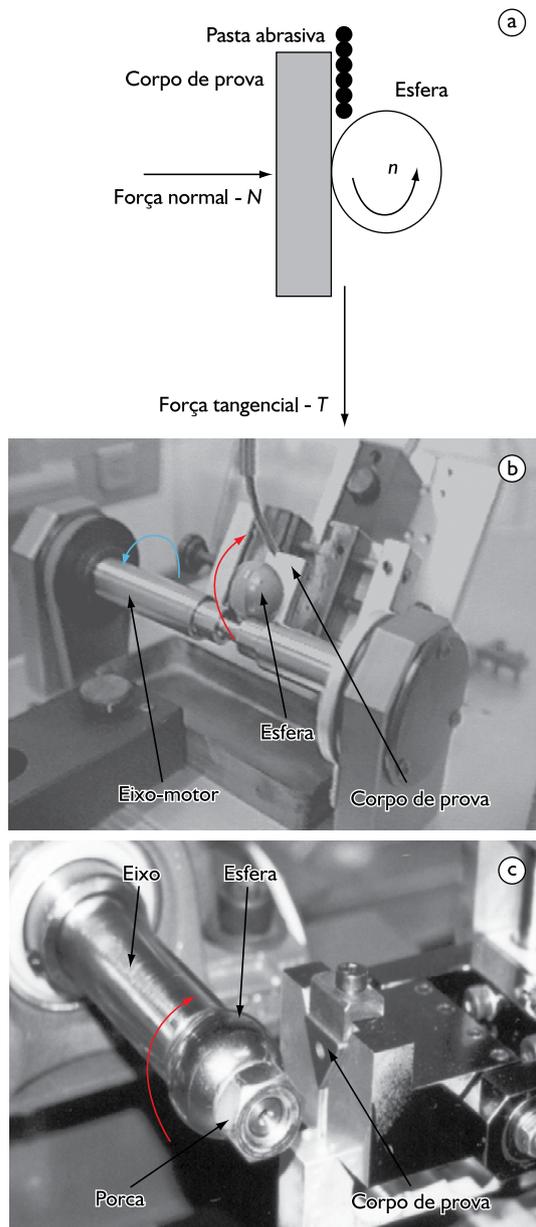


Figura 1. Ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa: a) princípio (ilustração esquemática; n é a rotação da esfera); configurações b) “esfera-livre”⁽¹⁾ e c) “esfera-fixada”.^(2,3)

O objetivo do ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa é gerar “crateras de desgaste” sobre o corpo de prova. A Figura 2 apresenta imagens de tais crateras, quando produzidas em sistemas revestidos, junto a uma indicação do volume de desgaste total (V), profundidade total da cratera de desgaste (h), espessura do revestimento (h_c), diâmetro interno (a)⁽⁴⁾ e diâmetro externo da cratera de desgaste (b).⁽⁴⁾

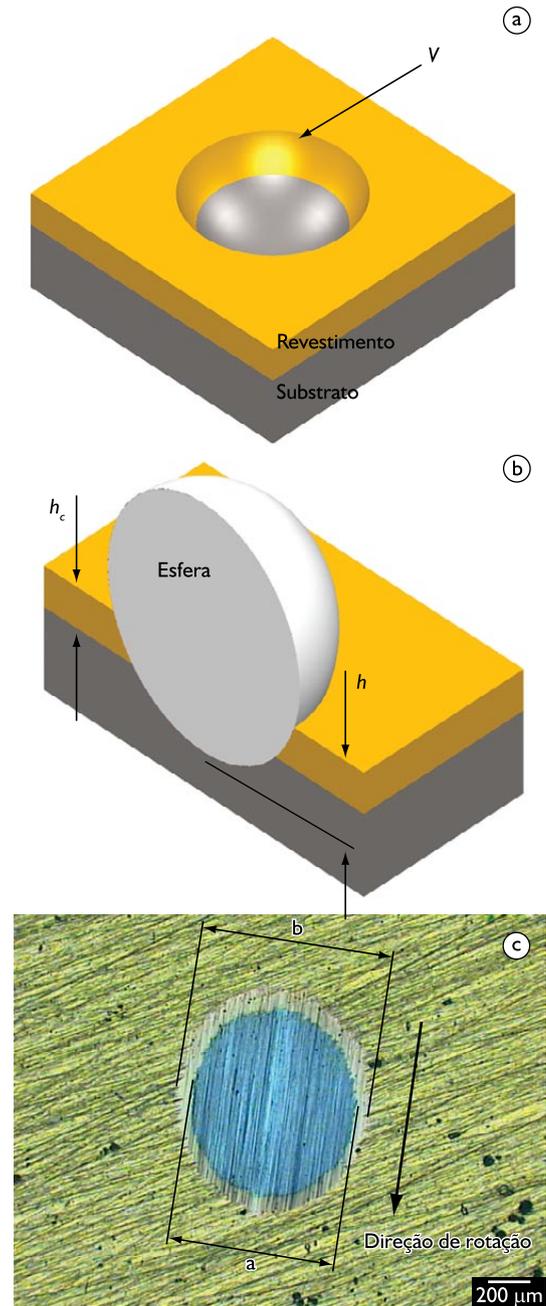


Figura 2. Imagens de crateras de desgaste geradas em sistemas revestidos: a) volume de desgaste total - V (ilustração esquemática); b) profundidade total - h e espessura do revestimento - h_c (ilustração esquemática); c) diâmetro interno - a ⁽⁴⁾ e diâmetro externo - b .⁽⁴⁾

Os diâmetros interno e externo da cratera de desgaste são, comumente, medidos por microscopia óptica (embora outros métodos são possíveis de serem aplicados, por exemplo, pela adoção de softwares de CAD⁽²⁾). O volume de desgaste total e a profundidade total da cratera de desgaste podem ser calculados em função de b , utilizando-se as Equações 1⁽⁵⁾ e 2,⁽⁵⁾ respectivamente, em que R é o raio da esfera. Estas equações também são válidas para sistemas não-revestidos:

$$V \cong \frac{\pi b^4}{64R}, \text{ para } b \ll R \quad (1)$$

$$h \cong \frac{b^2}{8R}, \text{ para } b \ll R \quad (2)$$

Geralmente, são observados dois modos de desgaste abrasivo sobre a superfície da cratera desgastada: “rolamento” (Figura 3a),⁽⁶⁾ que resulta quando as partículas abrasivas rolam sobre o corpo de prova, enquanto “riscamento” (Figura 3b)⁽⁷⁾ é reportado quando as partículas abrasivas deslizam. Dependendo das condições de ensaio, “rolamento” e “riscamento” podem ocorrer simultaneamente em uma dada cratera de desgaste (Figura 3c).⁽³⁾

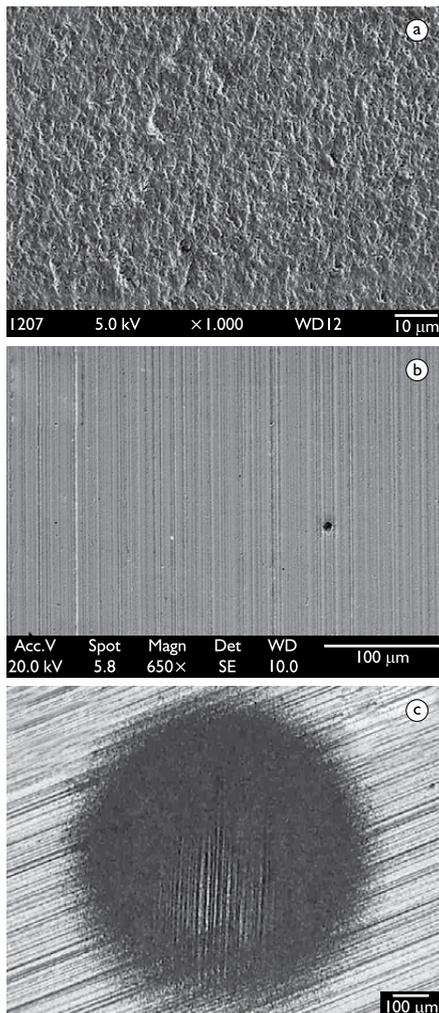


Figura 3. Modos de desgaste abrasivo: a) “rolamento”⁽⁶⁾; b) “riscamento”⁽⁷⁾; c) ação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e desgaste abrasivo por riscamento.⁽³⁾

O comportamento ao desgaste de diferentes materiais é analisado com base nas dimensões da cratera de desgaste e/ou nos modos de desgaste abrasivo atuantes.

Desde os primeiros trabalhos de Hutchings,^(5,6) foram publicadas outras importantes contribuições, que enfatizaram pesquisas envolvendo: i) transição entre os modos de desgaste abrasivo⁽⁸⁾, ii) coeficiente de desgaste (k)⁽⁹⁾ e iii) desgaste micro-abrasivo de sistemas revestidos,⁽⁹⁾ mas poucos trabalhos foram dedicados ao estudo do coeficiente de atrito (μ).^(10,11)

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da dureza de revestimentos de TiN e TiC sobre os coeficientes de atrito (μ) e desgaste (k), em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa.

2 DETALHAMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Equipamento de Ensaio de Desgaste Micro-abrasivo

Foi utilizado um equipamento de configuração “esfera-fixa” (Figura 4) nos ensaios.

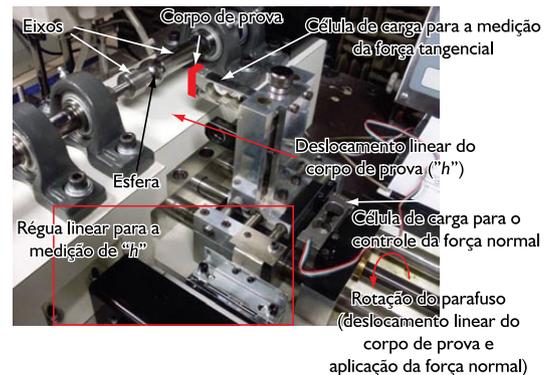


Figura 4. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa-fixa, utilizado nos experimentos deste trabalho. Corpo de prova: ilustração esquemática.

A esfera é fixa por dois eixos e a rotação (eixos + esfera) é controlada por um par “servo-motor/servo-controlador”. A força normal, controlada por uma célula de carga, é aplicada por um segundo par “servo-motor/servo-controlador” (este rotaciona um parafuso e é aplicada a força normal) e a força tangencial gerada durante os ensaios é medida por outra célula de carga, em que o corpo de prova é fixado. Finalmente, com o auxílio de uma Régua Linear, é possível medir, continuamente, o deslocamento do corpo de prova (ou, a profundidade da cratera de desgaste – h) durante os ensaios, com precisão de $1 \mu\text{m}$.

2.2 Materiais

Os experimentos foram conduzidos com uma esfera de aço AISI 52100, de diâmetro (D) 25,4 mm (1"). Dois corpos de prova de aço-ferramenta AISI D2, um revestido com nitreto de titânio (TiN) e outro revestido com carбето de titânio (TiC), foram utilizados nos ensaios; estes materiais foram utilizados na Tese de Doutorado de A.A.C. Recco.⁽¹²⁾

O aço-ferramenta AISI D2 possui composição química nominal (% em massa) de 1,59% C, 0,34% Mn, 0,29% Si, 0,02% P, 0,006% S, 11,20% Cr, 0,56% Mo e 0,94% V, tendo sido recebido no estado recozido. Posteriormente, foi submetido a austenitização a 1080°C durante 30 minutos (resfriamento: óleo) e revenimento a 540°C por 2 horas (resfriamento: ar).

Os filmes finos foram depositados no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em uma câmara de Diodo RF *Magnetron Sputtering* Reativo. A Tabela 1 apresenta os parâmetros constantes e, a Tabela 2, as condições individuais de deposição, as espessuras (h_c) dos filmes finos e seus respectivos módulos reduzidos de Young (E^*). Os valores de E^* foram calculados com dados obtidos a partir de ensaios de nanoindentação, aplicando-se a Equação 3.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-v_c^2}{E_c} + \frac{1-v_i^2}{E_i} \quad (3)$$

E_c , v_c , E_i e v_i são os módulos de Young e os coeficientes de Poisson do revestimento e do indetador, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros constantes de deposição dos revestimentos de TiN e TiC

Parâmetro	Condição
Temperatura	350 °C
Voltagem de polarização	0 V
Potência do gerador de RF aplicada ao cátodo magnetron	500 W
Pressão inicial de Ar	3,0 m Torr
Pressão de base	2.10 ⁻⁶ Torr

Tabela 2. Condições de deposição dos revestimentos de TiN e TiC

Filme fino	Fluxo de N ₂ [sccm]	Fluxo de CH ₄ [sccm]	$\frac{F_{N_2}}{F_{N_2} + F_{Ar}}$	$\frac{F_{CH_4}}{F_{CH_4} + F_{Ar}}$	Pressão [mTorr]	Tempo [min]	h_c [μm]	E^* [GPa]
TiN	6,0	-	0,23	-	3,5	165,0	2,0	270,9
TiC	-	5,0	-	0,19	2,5	105,0	2,3	135,1

A aderência dos revestimentos foi analisada por meio do ensaio de adesão Rockwell C, regido pela Norma DIN-CEN/TS 1071-8. Os índices de qualidade ficaram entre HF1 e HF4, que especificam a condição de "adesão suficiente".

A Tabela 3 apresenta os valores de dureza (H) dos materiais utilizados neste trabalho (substrato, filmes finos, esfera e partículas abrasivas).⁽¹³⁾

Tabela 3. Dureza dos materiais utilizados neste trabalho

	Material	Dureza - H [GPa (HV)]	
Substrato	Aço-ferramenta AISI D2	7,3	(744)
Filme fino*	TiN	25,6	
	TiC	14,3	
Esfera	Aço AISI 52100	8,4	(856)
Partículas abrasivas	SiC	18,5-19,0	(1886-1937) ⁽¹³⁾

* Durezas medidas com o uso de um indetador Berkovich, em ensaios de nanoindentação.

A pasta abrasiva foi preparada com 25% de carбето de silício (SiC) preto (Figura 5a),⁽¹³⁾ com tamanho médio de partículas de 5 μm, e 75% de água destilada, em volume, o que resulta em 1,045 g de SiC por cm³ de água destilada.^(2,3) A Figura 5b⁽¹³⁾ apresenta a distribuição granulométrica das partículas abrasivas.

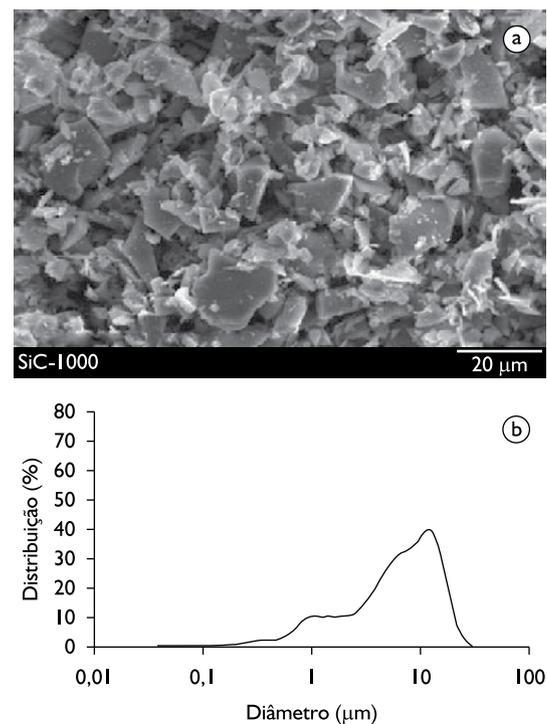


Figura 5. Partículas abrasivas de SiC⁽¹³⁾: a) imagem obtida por SEM; b) distribuição granulométrica.

2.3 Ensaios de Desgaste Micro-abrasivo

A Tabela 4 apresenta as condições selecionadas para os ensaios.

Foram definidos dois valores de força normal: $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N. A rotação da esfera foi de $n = 37,6$ rpm, previamente selecionada por Trezona, Allsopp e Hutchings⁽⁶⁾ e Adachi

Tabela 4. Condições de ensaio selecionadas para os experimentos de desgaste

Condição de ensaio ⇒	1	2	3	4	5	6
Força normal - N_1 [N]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Força normal - N_2 [N]	5	5	5	5	5	5
Distância de deslizamento* - S [m]	10	16	25	40	63	100
Rotação da esfera - n [rpm]	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Tempo de ensaio - t	200 s (3 min 20 s)	320 s (5 min 20 s)	500 s (8 min 20 s)	800 s (13 min 20 s)	1.260 s (21 min)	2.000 s (33 min 20 s)

* Valores tomados com base na Série de Renard - R20/4⁽¹⁴⁾.

e Hutchings.⁽⁸⁾ Para $n = 37,6$ rpm e $D = 25,4$ mm, a velocidade tangencial periférica da esfera é igual a $v = 0,05$ m/s, que, provavelmente, reduz ou elimina a ocorrência de efeitos hidrodinâmicos durante os ensaios.⁽⁸⁾

Foram realizadas três repetições para cada valor de N . A pasta abrasiva foi continuamente agitada e, inserida manualmente entre o contato corpo de prova/esfera, com o auxílio de uma seringa, a uma taxa de 1 gota a cada 20 s (frequência estabelecida por Kusano e Hutchings).⁽¹¹⁾

2.4 Aquisição de Dados e Análise de Resultados

A Régua Linear permitiu um constante monitoramento da profundidade da cratera de desgaste (h), sendo possível o cálculo do volume de desgaste total (V) (revestimento + substrato), com a Equação 4,⁽⁶⁾ sem a necessidade de interrupção do ensaio e medição do diâmetro da cratera de desgaste. O volume do substrato (V_s) e o volume do revestimento (V_c) foram calculados pelas Equações 5 e 6, respectivamente:

$$V \cong \pi R h^2, \text{ para } h \ll R \quad (4)$$

$$V_s \cong \pi R (h - h_c)^2, \text{ para } h \ll R \quad (5)$$

$$V_c \cong \pi R (2h h_c - h_c^2), \text{ para } h \ll R \quad (6)$$

Os coeficientes de desgaste total (kt), do substrato (ks) e do revestimento (kc) foram determinados pelas Equações 7, 8 e 9, respectivamente:

$$kt = \frac{\pi R h^2}{NS} \quad (7)$$

$$ks = \frac{\pi R (h - h_c)^2}{NS} \quad (8)$$

$$kc = \frac{\pi R (2h h_c - h_c^2)}{NS} \quad (9)$$

Os valores das forças normal (N) e tangencial (T) foram registrados a cada $t = 40$ s e, então, o coeficiente de atrito calculado pela Equação 10:

$$\mu = \frac{T}{N} \quad (10)$$

Para cada corpo de prova (“aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiN” e “aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiC”), as três curvas do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio ($\mu = f(t)$) obtidas sob $N_1 = 1,25$ N, foram comparadas com as três curvas de $\mu = f(t)$ obtidas sob $N_2 = 5$ N, por meio de ANOVA (Análise de Variância), com um nível de significância (α) de 10%. Em seguida, as seis curvas de $\mu = f(t)$, geradas com o “aço-ferramenta AISI D2 + TiN”, foram comparadas com as seis curvas de $\mu = f(t)$ produzidas a partir do “aço-ferramenta AISI D2 + TiC”, também através de ANOVA, com $\alpha = 10\%$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modos de Desgaste Abrasivo

Análises por microscopia óptica das crateras de desgaste obtidas neste trabalho indicam que, em todos os casos, o modo de desgaste abrasivo foi “riscamento”. As Figuras 6a e 6b apresentam imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos centros das crateras de desgaste produzidas sobre aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiN, sob $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, respectivamente. As Figuras 6c e 6d apresentam imagens do centro das crateras de desgaste geradas sobre o substrato revestido com TiC, para $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, respectivamente. Em todos os casos, os ensaios foram perfurantes, isto é, a profundidade final da cratera de desgaste foi maior do que a espessura do revestimento.

3.2 Comportamento do Coeficiente de Atrito

A Figura 7 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito (μ) em função do tempo de ensaio; “linhas de tendência” foram traçadas para, aproximadamente, indicar os limites dos valores

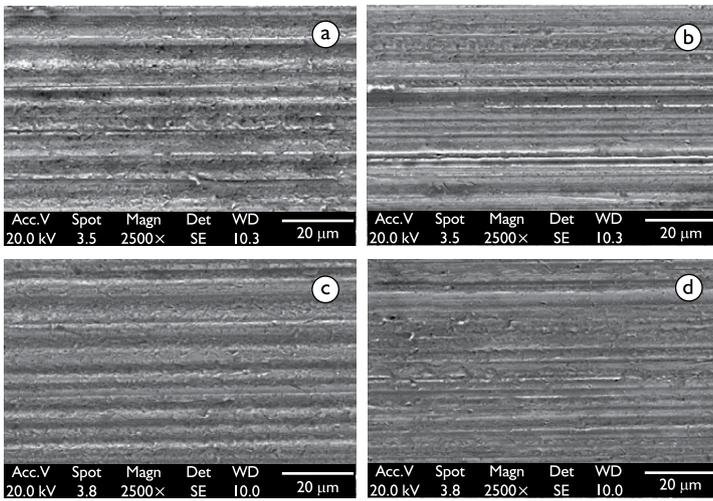


Figura 6. Ocorrência de desgaste abrasivo por riscamento. a) e b): aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiN, força normal de 1,25 N e 5 N, respectivamente; c) e d): aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiC, força normal de 1,25 N e 5 N, respectivamente. $S_g = 100$ m.

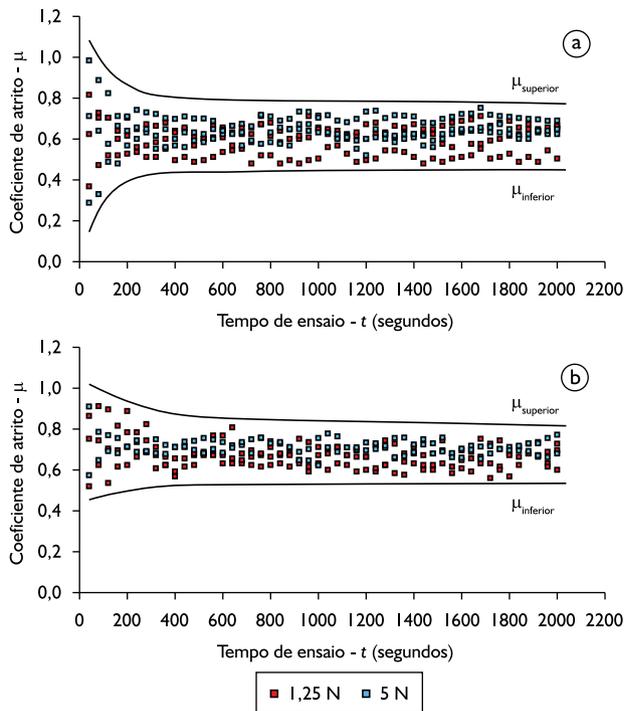


Figura 7. Curvas de $\mu = f(t)$ para aço-ferramenta AISI D2 revestido com: a) TiN e b) TiC.

experimentais de μ . Assim como Cozza, Tanaka e Souza,⁽⁷⁾ foram definidas duas grandezas, μ_{superior} e μ_{inferior} , que demarcam, respectivamente, os valores superiores e inferiores das linhas de tendência para $t_6 = 2.000$ s.

Tanto para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiN” quanto para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiC”, para ambas forças normais, $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, a faixa de atuação do coeficiente de atrito permaneceu entre $\mu = 0,4$ e $\mu = 0,9$. Com o aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiN, foi observada uma relação $\mu_{\text{superior}}/\mu_{\text{inferior}} \cong 1,8$, e com o aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiC, este quociente foi de $\mu_{\text{superior}}/\mu_{\text{inferior}} \cong 2$.

Por ANOVA, foi observado que:

- “AISI D2 + TiN”: para $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, os valores de μ são estatisticamente diferentes. Na Figura 7a, os valores dos coeficientes de atrito são maiores para $N_2 = 5$ N;
- “AISI D2 + TiC”: para $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, os valores de μ são estatisticamente diferentes. Na Figura 7b, os valores dos coeficientes de atrito são maiores para $N_2 = 5$ N;
- Comparação entre “AISI D2 + TiN” e “AISI D2 + TiC”: para $N_1 = 1,25$ N e $N_2 = 5$ N, os valores de μ são estatisticamente diferentes.

3.3 Relação entre Dureza e Coeficiente de Atrito

A dureza de um material afeta a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento e/ou desgaste abrasivo por riscamento, como descrito no mapa de desgaste de Adachi e Hutchings.⁽⁸⁾ Além disso, os modos de desgaste abrasivo desempenham uma importante influência sobre o coeficiente de atrito. Kusano e Hutchings,⁽¹¹⁾ conduzindo ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa em um equipamento de configuração “esfera-livre”, reportam valores de $\mu = 0,2$, aproximadamente, sob condições de *desgaste abrasivo por rolamento*. Cozza, Tanaka e Souza⁽⁷⁾ reportam valores relativamente maiores, entre $\mu = 0,2$ e $\mu = 1,2$, em um equipamento de configuração “esfera-fixa” e sob condições de *desgaste abrasivo por riscamento*. A faixa de valores de coeficiente de atrito relatada neste trabalho (de $\mu = 0,4$ a $\mu = 0,9$) está incluída na faixa obtida no trabalho antecedente de Cozza, Tanaka e Souza⁽⁷⁾ (entre $\mu = 0,2$ e $\mu = 1,2$) e isto pode estar relacionado com a ocorrência de desgaste abrasivo por riscamento.

Em relação aos corpos de prova analisados neste trabalho, o substrato (aço-ferramenta AISI D2) foi o mesmo para ambos os revestimentos, TiN e TiC e, provavelmente, é correto dizer que sua dureza teve a mesma influência sobre a ocorrência do modo de desgaste abrasivo (“riscamento”, em todos os experimentos) e sobre o comportamento do coeficiente de atrito. De fato, embora as curvas $\mu = f(t)$ sejam estatisticamente diferentes, os valores médios são similares (“aço-ferramenta AISI D2 + TiN”: 0,6 e 0,65, para 1,25 N e 5 N, respectivamente; “aço-ferramenta AISI D2 + TiC”: 0,67 e 0,74, para 1,25 N e 5 N, respectivamente). Logo, neste trabalho, as durezas dos revestimentos não influenciaram significativamente os valores do coeficiente de atrito com a variação do tempo de ensaio.

3.4 Comportamento do Coeficiente de Desgaste

A Figura 8 apresenta o comportamento do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio, para o “aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiN” e para “aço-ferramenta AISI D2 revestido com TiC”. Esta figura exibe o coeficiente de desgaste total (k_t) (substrato + revestimento), o coeficiente de desgaste do substrato (k_s) e o coeficiente de desgaste do revestimento (k_c).

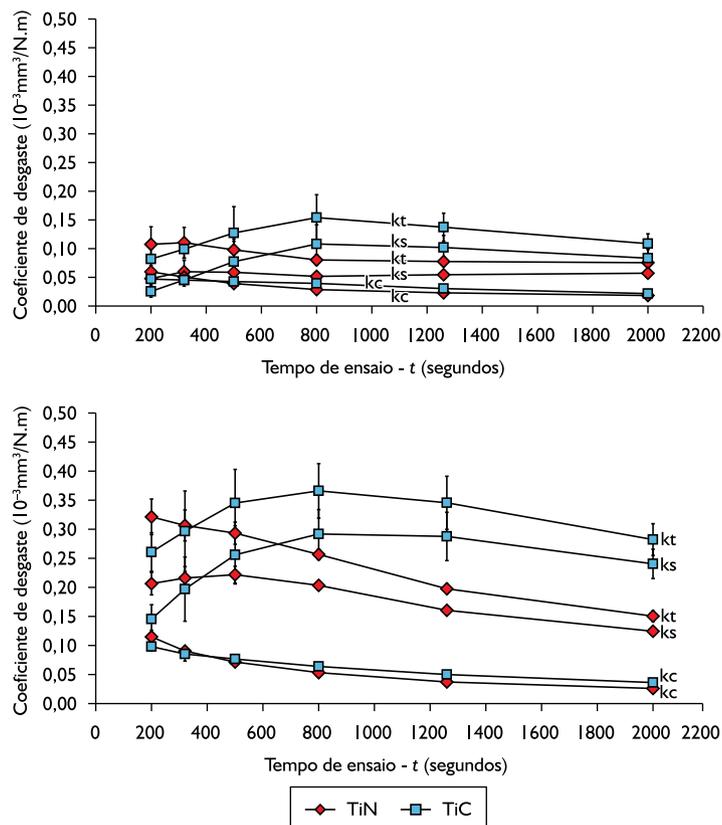


Figura 8. Coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio. a) $N_1 = 1,25 \text{ N}$; b) $N_2 = 5 \text{ N}$.

Tanto para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiN” quanto para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiC”, a aplicação da força normal $N_2 = 5 \text{ N}$ resulta nos maiores valores de k_t , k_s e k_c do que com $N_1 = 1,25 \text{ N}$, o que é um resultado de concordância qualitativa com a literatura;^(15,16) maiores forças normais favorecem maiores coeficientes de desgaste e, menores forças normais, menores coeficientes de desgaste.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, W. M. *Efeito da pressão de compactação e tamanho do pó de ferro na micro-abrasão do ferro sinterizado a vapor*. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- 2 COZZA, R. C. *Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo*. 2006. 217 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Cada corpo de prova apresenta um comportamento distinto em termos dos coeficientes de desgaste k_t e k_s em função do tempo de ensaio. Para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiN”, o coeficiente de desgaste total e o coeficiente de desgaste do substrato diminuem em função do tempo de ensaio, enquanto que os valores de k_t e k_s do “aço-ferramenta AISI D2 + TiC” apresentam um ponto máximo em, aproximadamente, $t_4 = 800 \text{ s}$. Em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, é usualmente recomendado conduzir comparações entre materiais apenas após a obtenção do regime permanente de desgaste, isto é, a partir do instante em que nenhuma variação significativa no coeficiente de desgaste é observada com a ascensão do tempo de ensaio. Este conceito opõe-se a uma rigorosa comparação entre os valores de k_t e k_s , para os diferentes corpos de prova, na Figura 8, uma vez que o regime permanente de desgaste não foi atingido em alguns casos, especialmente com o corpo de prova revestido com TiC.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que:

As durezas dos revestimentos não apresentam uma influência significativa sobre os valores de coeficiente de atrito; eles mantiveram-se na mesma faixa, entre $\mu = 0,4$ e $\mu = 0,9$, e com valores médio entre 0,6 e 0,74. Além disso, tanto para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiN” quanto para o “aço-ferramenta AISI D2 + TiC”, as curvas de coeficiente de atrito apresentam, praticamente, o mesmo comportamento, independente das durezas dos revestimentos.

Em termos gerais, mesmo o regime permanente de desgaste não ter sido obtido em alguns casos, o corpo de prova revestido com TiN (maior dureza) apresentou os menores valores de coeficientes de desgaste (k_t , k_s e k_c), quando comparado ao corpo de prova revestido com TiC. Em termos do coeficiente de desgaste do revestimento, k_c , a diferença pode estar associada com a maior espessura ou com a menor dureza do filme fino de TiC.

- 3 COZZA, R. C. *et al.* Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear*, v. 263, n. 1-6, p. 111-6, Sep. 2007.
- 4 COZZA, R. C. *et al.* Uma abordagem sobre reprodutibilidade de resultados e fragmentação de partículas abrasivas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa. In: CONEM 2008 - CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5., 2008, Salvador, BA. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2008. 1 CD-Rom.
- 5 RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 25, n. 2, p. 250-60, Mar. 1997.
- 6 TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, v. 225-229, part 1, p. 205-14, Apr. 1999.
- 7 COZZA, R. C.; TANAKA, D. K.; SOUZA, R. M. Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – preliminary results. *Wear*, v. 267, n. 1-4, p. 61-70, June 2009.
- 8 ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. *Wear*, v. 255, n. 1-6, p. 23-9, Aug.-Sep. 2003.
- 9 BATISTA, J. C. A.; GODOY, C.; MATTHEWS, A. Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex (single-layered) PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr-N coatings. *Tribology International*, v. 35, n. 6, p. 363-72, June 2002.
- 10 RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. *Surface and Coatings Technology*, v. 79, n. 1-3, p. 231-9, Feb. 1996.
- 11 KUSANO, Y.; HUTCHINGS, I. M. Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test. *Wear*, v. 258, n. 1-4, p. 313-7, Jan. 2005.
- 12 RECCO, A. A. C. *Estudo da obtenção e das propriedades dos filmes de TiN e TiC depositados sobre aços ferramentas AISI H13 e D2 nitretados e não nitretados.* 2008. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 13 IZHEVSKYI, V. A. *et al.* Liquid phase sintered SiC ceramics from starting materials of different grade. *Cerâmica*, v. 50, n. 315, p. 261-7, Sep. 2004.
- 14 AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *Norma DIN 804: Machine tools; On-load speeds for machine tools; Nominal values, limiting values, transmission ratios.* Washington, DC, 1977.
- 15 BOSE, K.; WOOD, R. J. K. Influence of load and speed on rolling micro-abrasion of CVD diamond and other hard coatings. *Diamond and Related Materials*, v. 12, n. 3-7, p. 753-6, Mar.-July 2003.
- 16 BOSE, K.; WOOD, R. J. K. Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings. *Wear*, v. 258, n. 1-4, p. 322-32, Jan. 2005.

Recebido em: 13/11/2009

Aceito em: 07/07/2010