

ANÁLISE SOBRE A REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS E FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS EM ENSAIOS BALL-CRATERING

Ronaldo Câmara Cozza¹

Resumo

Os ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa vêm demonstrando uma participação importante em pesquisas que envolvem desgaste abrasivo. O contato entre um corpo de prova e uma esfera em movimento de rotação e a inserção de partículas abrasivas entre estes dois elementos gera uma cratera no corpo de prova, por intermédio da qual é analisado o comportamento ao desgaste do material ensaiado. O propósito deste trabalho é abordar a reprodutibilidade de resultados e a fragmentação de partículas abrasivas de carbeto de silício (SiC). Foram conduzidos ensaios com esferas de aço AISI 1010 cementado e corpos-de-prova de aço rápido, “com” e “sem” revestimento de nitreto de titânio (TiN). A pasta abrasiva foi preparada com carbeto de silício preto (tamanho médio de partícula de 5 μm) e água destilada. Na análise, observa-se que o modo de desgaste abrasivo por riscamento está relacionado a resultados de reprodutibilidade relativamente baixa. Para as condições de ensaios estabelecidas, não observa-se a fragmentação das partículas abrasivas, independente da distância de deslizamento, o que pode ser justificado, entre outros fatores, pela baixa força normal aplicada. **Palavras-chave:** Desgaste micro-abrasivo; Aço rápido; Nitreto de titânio; Carbeto de silício.

RESEARCH ABOUT RESULTS REPRODUTIBILITY AND ABRASIVE PARTICLES FRAGMENTATION IN BALL-CRATERING TESTS

Abstract

The micro-abrasive wear tests by rotating ball (crater wear) have played an important role in abrasive wear researches. In this type of test, the contact between a specimen and a ball on rotating motion and abrasive particles supplied between these two elements, results in a crater on the specimen, based on which the abrasive wear behaviour is analysed. The purpose of this work is to study results the reproductibility and the silicon carbide (SiC) abrasive particles fragmentation during micro-abrasive wear tests. Tests were conducted with carburized AISI 1010 steel balls and high speed steel specimens, “with” and “without” titanium nitride (TiN) coatings. The abrasive slurry was prepared with black silicon carbide (average particle size of 5 μm) and distilled water. Grooving abrasion is related with lower reproductibility results. For the test conditions of this work, no abrasive particles fragmentation was observed, independently of the sliding distance, what is justified, among others factors, by the low normal force applied.

Key words: Micro-abrasive wear; High speed steel; Titanium nitride; Silicon carbide.

I INTRODUÇÃO

O princípio do ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa está no contato entre uma esfera e um corpo de prova, sendo inserida entre estes uma pasta abrasiva.

Este tipo de ensaio é aplicado em pesquisas científicas que abordam o comportamento de materiais metálicos⁽¹⁻⁵⁾ e não-metálicos,^(1-3,6-14) sujeitos a ação de desgaste micro-abrasivo. Podem ser aplicadas forças normais menores que 0,1 N^(15,16) e, em ensaios conduzidos em filmes finos com espessura de 2,5 μm , é possível obter calotas esféricas sem atingir o substrato.⁽¹⁷⁾

Dois modos de desgaste abrasivo são atuantes: do rolamento das partículas abrasivas sobre o corpo de prova, resulta o modo denominado *desgaste abrasivo por rolamento*, enquanto o *desgaste abrasivo por riscamento* ocorre quando as partículas abrasivas deslizam sobre a superfície.^(1-3,12,18) Estes dois modos podem atuar simultaneamente,^(1,5) recebendo o nome de *desgaste abrasivo misto (rolamento + riscamento)*.⁽⁵⁾

Na composição da pasta abrasiva, comumente utiliza-se carbeto de silício (SiC)^(1-14,17,19-25) existindo dois

¹Engenheiro Mecânico, Professor Adjunto II, Centro Universitário da FEI – Fundação Educacional Inaciana “Padre Sabóia de Medeiros”, Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Cep 09850-901, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: rcamara@fei.edu.br; ronaldo.cozza@fatec.sp.gov.br

tipos:⁽²⁶⁾ “carbeto de silício verde” e “carbeto de silício preto”. Estas colorações variam em função das impurezas de cada material.⁽²⁶⁾ Outra diferença é a friabilidade, propriedade associada à capacidade de um material abrasivo manter, constantemente, arestas cortantes. O carbeto de silício “verde” apresenta maior friabilidade (diz-se que, “é mais friável”) que o “preto”.

Após a realização de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa, este trabalho voltou sua atenção para dois aspectos:

- *Influência das atuações dos modos de desgaste abrasivo sob a reprodutibilidade de resultados, sendo que reprodutibilidade deve ser entendida como “a capacidade de, sob mesmas condições de ensaio, obter-se crateras com dimensões geométricas análogas;”*
- *Influência da distância de deslizamento (S) sob a fragmentação de partículas abrasivas de carbeto de silício preto, assunto pouco questionado na literatura.*

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamento de Ensaio de Desgaste Micro-abrasivo

Para a realização dos ensaios, fez-se uso de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa, utilizado em trabalhos anteriores.^(1-4,11,12,27) A Figura 1 esquematiza seu princípio de funcionamento.

A Figura 2 mostra a mesa de translação, em que se tem o berço movimentado (A) e o berço de movimentação (B). Entre esses elementos, está uma célula de carga (C), responsável pelo controle da força normal. Por sua vez, a carga normal é aplicada pela rotação de um fuso (D), que faz o corpo de prova avançar ou recuar.

Inicialmente, é aplicada a força normal (F_N), definida pelo pesquisador. Com o início do ensaio, a pasta abrasiva (partículas abrasivas + água destilada) é inserida entre o corpo de prova e a esfera, que está em movimento de rotação.

O estudo (ou a comparação) do comportamento ao desgaste abrasivo de diferentes materiais é realizado com base nas dimensões das crateras geradas no corpo de prova, comumente denominadas de *crateras de desgaste*,⁽²⁸⁻³⁰⁾ e nas atuações dos modos de desgaste abrasivo.^(1,3,5)

2.2 Materiais

Foram analisados corpos-de-prova de aço-rápido SINTER 23 (composição química nominal: 1,28% C, 4,2% Cr, 5% Mo, 6,3% W, 3,1% V), “com” e “sem” revestimento de nitreto de titânio (TiN). O aço-rápido passou por austenitização a 1.180°C e têmpera a 560°C; os revestimentos possuíam espessuras de 2 μm .

A pasta abrasiva foi composta por carbeto de silício preto e água destilada. Sua concentração ficou definida em 25% de SiC e 75% de água destilada, em volume, o que resulta em 1,045 $\text{g}_{\text{SiC}}/\text{cm}^3$ H_2O destilada.

O material abrasivo possui tamanho médio de partícula de 5 μm . A Figura 3a exibe uma micrografia eletrônica de varredura do SiC preto utilizado e, a Figura 3b, a respectiva distribuição granulométrica.

Foram utilizadas esferas de aço AISI 1010 cementado, com diâmetro de 25,4 mm (1”).

A Tabela 1 reúne os valores das durezas dos materiais utilizados (corpos-de-prova, esferas e partículas abrasivas). Originalmente, todas as unidades estavam em HV e foram convertidas para GPa.

2.3 Procedimento Experimental

Foram estabelecidas quatro condições de ensaio, como apresentado na Tabela 2.

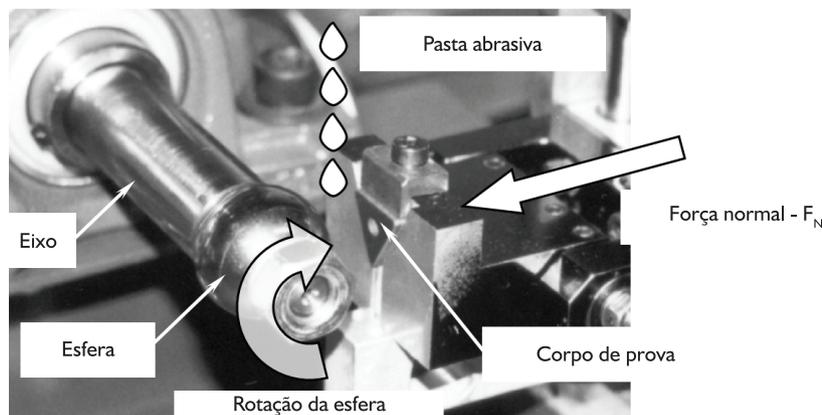


Figura 1. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa.^(1-4,11,12,27)

A rotação da esfera (37,6 rpm) foi a mesma adotada por Trezona, Allsopp e Hutchings.⁽⁵⁾ Com esta rotação, para uma esfera com diâmetro de 25,4 mm, tem-se uma velocidade tangencial periférica de 0,05 m/s (3 m/min), o que evita efeitos hidrodinâmicos.⁽¹⁶⁾ Todos os ensaios foram realizados sem paradas intermediárias e o gotejamento da pasta abrasiva foi realizado manualmente, por meio de um conta-gotas, sendo inserida 1 gota a cada 10 s.

Inicialmente, foi utilizado o gráfico da severidade de contato (S_C) em função da relação de durezas H_{CP}/H_E ,^(15,16) para obter-se uma previsão dos modos de desgaste abrasivo atuantes. Os índices “E” e “CP” referem-se, respectivamente, à esfera e ao corpo de prova, e a definição de S_C é dada pela Equação 1,⁽¹⁾ deduzida a partir dos trabalhos de Adachi e Hutchings^(15,16) e Hutchings:⁽¹⁸⁾

$$S_C = \frac{F_N \left(\frac{1}{H_E} + \frac{1}{H_{CP}} \right)}{\pi \left[\sqrt[3]{0,75 \cdot F_N \cdot R \cdot \left(\frac{1 - \nu_E^2}{E_E} + \frac{1 - \nu_{CP}^2}{E_{CP}} \right)^2} + 2 \cdot R \cdot D_p \right] \cdot \vartheta} \quad (1)$$

Na Equação 1, R é o raio da esfera, ν , o coeficiente de Poisson, E , o módulo de elasticidade, D_p , o tamanho médio das partículas abrasivas e ϑ , a porcentagem em volume, de partículas abrasivas na pasta abrasiva.

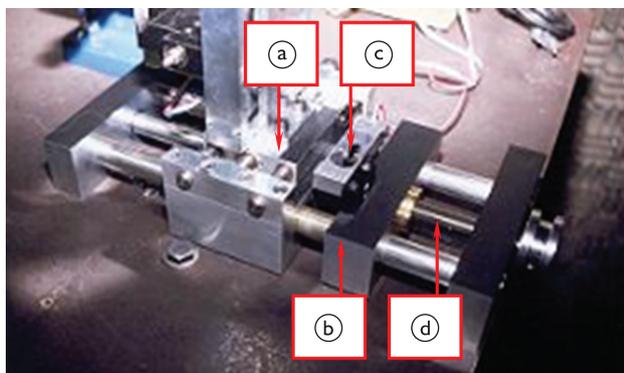


Figura 2. Sistema utilizado para aplicação da força normal sobre o corpo de prova.

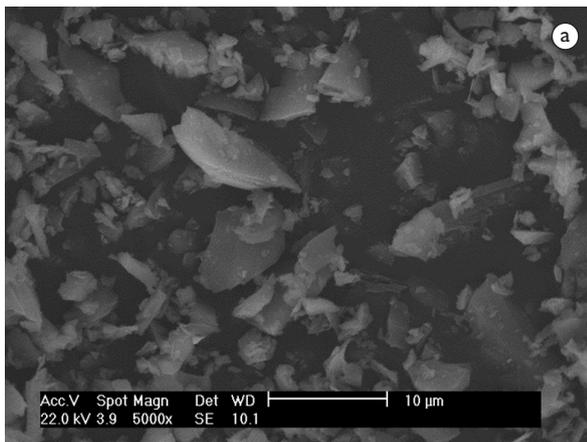


Figura 3. SiC preto. (a) Micrografia eletrônica de varredura. (b) Distribuição granulométrica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Influência da Atuação de Desgaste Abrasivo

Nas Figuras 4a e 4b estão os gráficos da severidade de contato em função de H_{CP}/H_E para o aço-rápido SINTER 23 e para o filme fino de TiN, respectivamente.

Os gráficos da Figura 4 indicam que a severidade de contato varia relativamente pouco em função do material considerado. De acordo com a Equação 1, a força normal, o diâmetro da esfera, o tamanho médio das partículas abrasivas e a concentração da pasta abrasiva exercem maior influência sob as atuações dos modos de desgaste abrasivo, quando comparados a dureza, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da esfera e do corpo de prova. Em particular, como publicado por Trezona, Allsopp e Hutchings,⁽⁵⁾ forças normais relativamente elevadas junto a concentrações de pasta abrasiva relativamente baixas favorecem a ação de desgaste abrasivo por rolamento, enquanto que, forças normais relativamente baixas em conjunto com concentrações de pasta abrasiva relativamente elevadas, tendem a favorecer o desgaste abrasivo por rolamento.

Embora nos gráficos da Figura 4 o modo de desgaste abrasivo atuante tenha sido rolamento, na prática obteve-se riscamento, como mostra a Figura 5.

Assim como para os ensaios realizados neste trabalho, Adachi e Hutchings^(15,16) conduziram pesquisas em um equipamento de configuração “esfera-fixa”. Entretanto, as construções mecânicas dos equipamentos são diferentes.^(1-4,11,12,15,16,27,31,32)

Tabela 1. Durezas dos materiais utilizados nos ensaios

	Material	Dureza [GPa]
Corpo de prova	Aço-rápido SINTER 23	9,66
	Filme fino de TiN	23,9
Esfera	Aço AISI 1010 cementado	8,0 – 8,5*
Partícula abrasiva	SiC	18,5 – 19,0

* Na superfície da esfera.

Tabela 2. Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios

Condição de ensaio	1	2	3	4
Força normal [N]	0,5	0,5	0,5	0,5
Rotação da esfera [rpm]	37,6	37,6	37,6	37,6
Distância de deslizamento* [m]	20	30	40	50
Número de repetições	3	3	3	3

* Distância de deslizamento: é a distância tangencial percorrida pela esfera em contato com o corpo de prova.

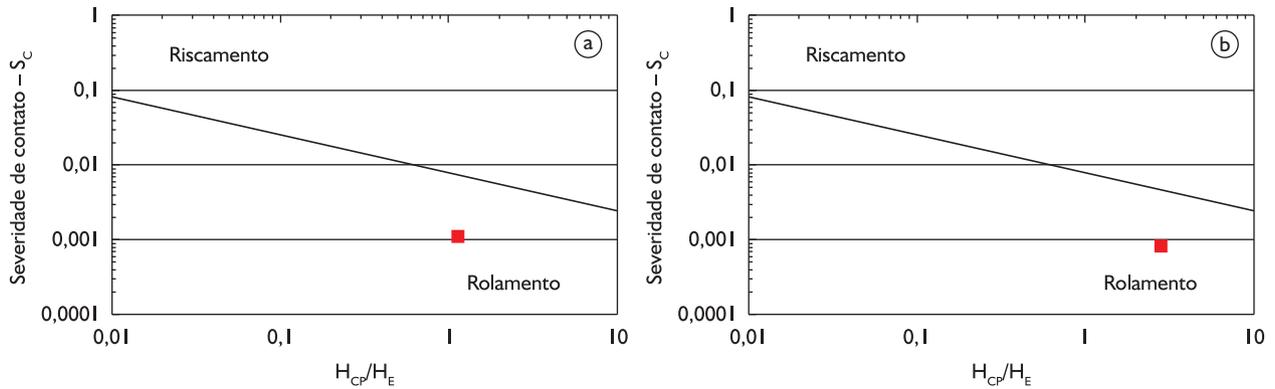


Figura 4. Gráficos da severidade de contato em função do quociente H_{CP}/H_E . Adaptação dos trabalhos de Adachi e Hutchings.^(15,16) (a) Aço-rápido SINTER 23; (b) filme fino de TiN.

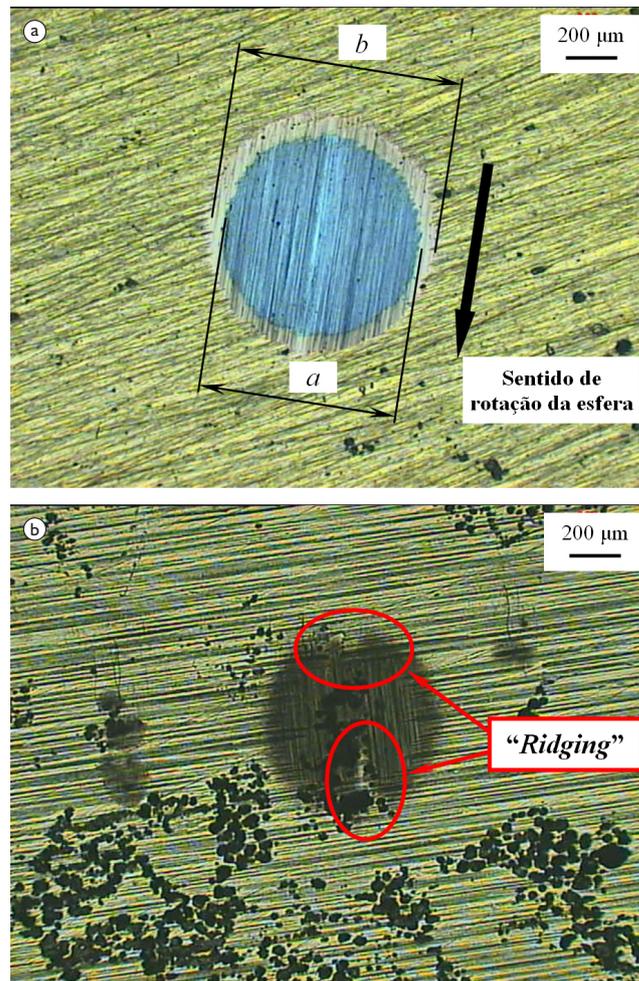


Figura 5. Crateras de desgaste: (a) Aço-rápido SINTER 23 com revestimento de TiN. Definição dos diâmetros “a” e “b”; $S = 50$ m; (b) Aço-rápido SINTER 23 sem revestimento; $S = 20$ m.

Na região central da cratera de desgaste da Figura 5b observa-se a presença de *ridging*, que são imperfeições na formação da cratera de desgaste devido ao contato entre a esfera e o corpo de prova, também relatado por Allsopp, Trezona e Hutchings,⁽³³⁾ Gee et al.⁽³⁴⁾ e Gee e Wicks,⁽³⁵⁾ e que pode introduzir erros no valor do volume de desgaste - V , calculado pela Equação 2,⁽³⁶⁾ em que d é o diâmetro da cratera de desgaste. Esse fenômeno ocorre devido a não penetração de partículas abrasivas na região central, em consequência da elevada tensão de Hertz,^(18,34) como esquematiza a Figura 6.⁽³³⁾ Neste trabalho, o mesmo atua somente nas crateras de desgaste geradas nos corpos-de-prova sem revestimento.

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad (2)$$



Figura 6. Formação de *ridging*.⁽³³⁾

A Figura 7 apresenta os gráficos do volume de desgaste em função do tempo de ensaio, para o aço-rápido SINTER 23 “com” e “sem revestimento” de TiN.

Pela literatura,^(10,16) desgaste abrasivo por riscamento gera resultados com reprodutibilidade relativamente menor, quando comparados a números em que

o modo de desgaste é predominantemente, ou exclusivamente, por rolamento. Nas crateras de desgaste obtidas neste trabalho, o modo de desgaste abrasivo atuante é unicamente por riscamento, o que explica a obtenção de resultados de baixa reprodutibilidade ($R^2 = 0,74$ e $R^2 = 0,75$). Cozza⁽³⁷⁾ observou valores de $R^2 = 0,98$, em ensaios em que atuaram os modos *rolamento* e *misto*.

Conceitualmente, deduz-se que, com o revestimento de maior dureza, o volume de desgaste total da cratera seja menor. Entretanto, na Figura 7 observa-se que o volume de desgaste total relacionado às crateras geradas no corpo de prova revestido é maior que o volume gerado no corpo de prova sem revestimento. Este resultado também está em concordância qualitativa com a literatura.^(6-8,14,17,38,39) Para revestimentos de CrN, Batista et al.⁽⁷⁾ atribuem esse comportamento à ação de *ploughing*⁽⁴⁰⁾ e *cutting*,⁽⁴⁰⁾ que podem ser entendidos como, respectivamente, a “deformação” e o “corte” do material, nos estágios iniciais dos ensaios. Para corpos-de-prova não-revestidos, o menor valor de V calculado está relacionado à deformação do material, que inibe o processo de desgaste abrasivo⁽⁷⁾.

Outro fator que deve ser considerado na análise dos resultados, é o tamanho médio das partículas abrasivas (questionado, também, por Batista et al.⁽⁷⁾) adotadas neste trabalho, 5 μm , o que é 2,5 vezes maior que a espessura dos filmes finos. Entretanto, somente com os resultados gerados, e aqui apresentados, não é seguro estabelecer conclusões sobre a relação entre espessura de revestimento, tamanho de partículas abrasivas e volume de desgaste.

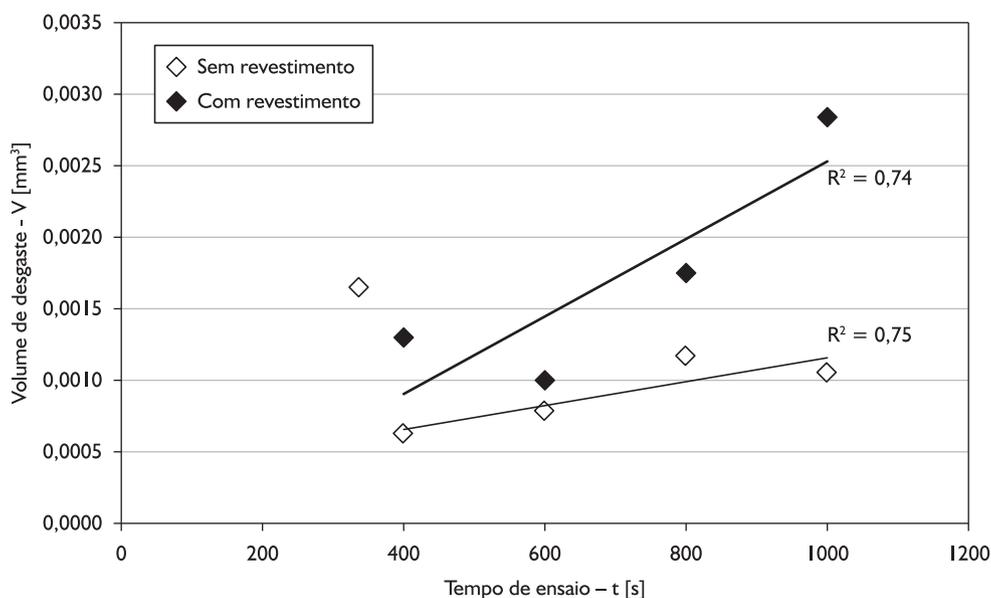


Figura 7. Gráficos do volume de desgaste em função do tempo de ensaio.

3.2 Fragmentação das Partículas Abrasivas

A Figura 8 apresenta imagens das partículas abrasivas após a realização dos ensaios, em que (a), (b), (c) e (d) referem-se às partículas abrasivas utilizadas nos ensaios conduzidos nos corpos-de-prova de aço-rápido SINTER 23 com revestimento de TiN, para as distâncias de deslizamento de 20 m, 30 m, 40 m e 50 m, respectivamente. A imagem (e) apresenta as partículas abrasivas

resultantes de um ensaio realizado em um corpo de prova não-revestido e a imagem (f) mostra uma imagem do carbetto de silício sem uso.

Com o auxílio de um programa de CAD, foram realizadas medições das áreas projetadas das partículas abrasivas. Com base nestes resultados, conclui-se que não há fragmentação das partículas abrasivas, independente da distância de deslizamento.

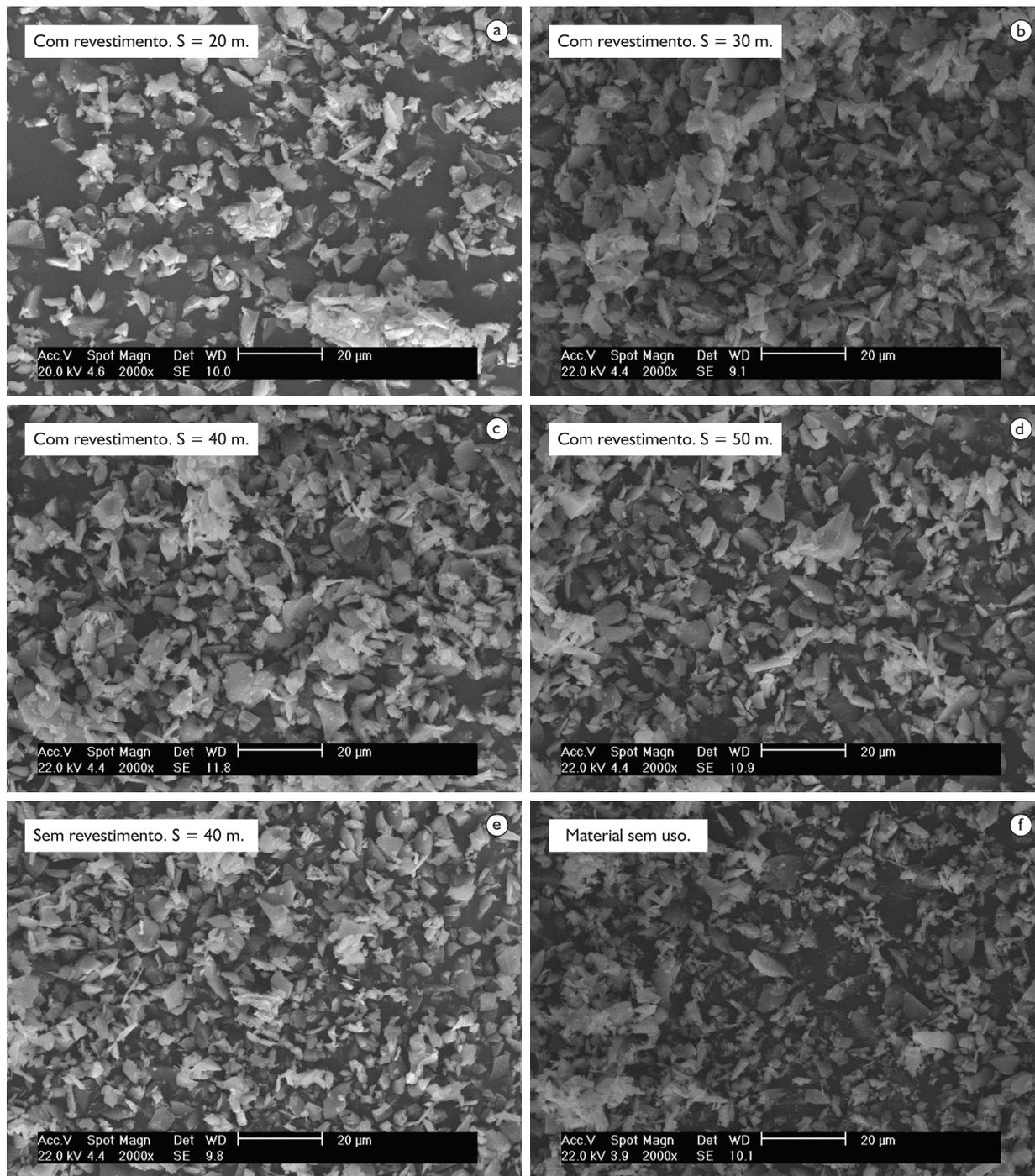


Figura 8. Carbetto de silício (a) S = 20 m, (b) S = 30 m, (c) S = 40 m e (d) S = 50 m: ensaios realizados em corpos-de-prova revestimento; (e) SiC = 40 m: ensaio realizado em corpo de prova sem revestimento. (f) SiC sem uso.

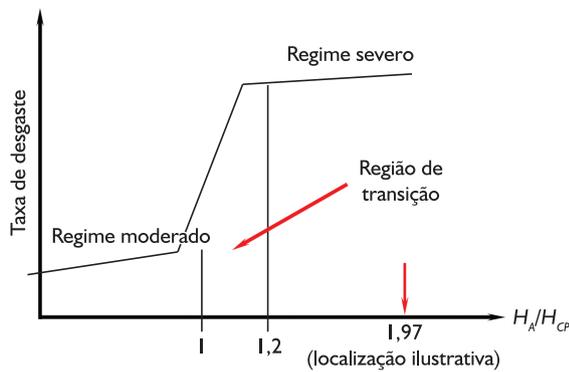


Figura 9. Relação esquemática entre a taxa de desgaste e a razão H_A/H_{CP} . Os valores 1,0 e 1,2 limitam a região de transição entre os regimes de desgaste.⁽⁴¹⁾

Mesmo com o aumento da distância de deslizamento, durante os ensaios, ocorre o constante gotejamento de pasta abrasiva sem uso. Em uma condição considerada “ideal”, as partículas abrasivas entram em contato com o sistema “corpo de prova/esfera”, somente uma vez, sendo precedidas por uma nova quantidade de material.

O aço-rápido SINTER 23 possui dureza de 9,66 GPa e, o SiC, 19 GPa. Estes valores resultam em um quociente $H_A/H_{CP} = 1,97$, o que, no gráfico da Figura 9, está compreendido na região de “regime de desgaste severo”. H_A é a dureza do carbetto de silício.

Provavelmente, quanto maior a relação H_A/H_{CP} , menor a possibilidade de ocorrer a fragmentação das partículas abrasivas, pois o regime de desgaste é dito “severo” para o corpo de prova e não para as partículas abrasivas. Maior relação H_A/H_{CP} significa que o material abrasivo está em contato com um corpo de prova de menor dureza.

Para as condições de ensaio aqui estabelecidas, independente da distância de deslizamento, não é relacionada a fragmentação das partículas abrasivas. Entretanto, é completamente errado concluir que, de forma generalizada, não há a fragmentação das partículas abrasivas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa

fixa. Além da distância de deslizamento e do quociente H_A/H_{CP} , outro parâmetro que deve ser considerado é a força normal. Neste trabalho foi aplicada $F_N = 0,5$ N, o que é considerado um valor relativamente baixo.

São necessárias futuras pesquisas envolvendo diferentes valores de S , F_N e H_A/H_{CP} para que seja possível estabelecer conclusões sobre a fragmentação de partículas abrasivas. Além disso, é importante que seja considerado o tamanho de partícula e tipo de carbetto de silício (“preto” ou “verde”).

Provavelmente, o carbetto de silício “verde” apresenta maior “facilidade” de fragmentação, em comparação ao SiC “preto”. Esta hipótese é estabelecida com base no fato de que o SiC “verde” é mais friável, o que está relacionado diretamente a sua fragmentação, necessária para manter as arestas cortantes das partículas abrasivas.

4 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- A análise de previsibilidade de atuação dos modos de desgaste abrasivo realizada com base nos trabalhos de Adachi e Hutchings^(15,16) (Equação 1 e Figura 4) não coincidi com a prática. Uma possível explicação para este resultado talvez tenha sido as diferentes configurações mecânicas dos equipamentos utilizados;
- Conforme a literatura consultada,^(10,16) quando o modo de desgaste abrasivo atuante é riscamento, obtêm-se resultados de reprodutibilidade relativamente baixa, quando comparados a resultados relacionados ao modo rolamento; e
- Para as condições de ensaio estabelecidas neste trabalho, não é observada fragmentação das partículas abrasivas de carbetto de silício preto, independente da distância de deslizamento.

REFERÊNCIAS

- 1 Cozza RC. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo [Mestrado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; 2006.
- 2 Cozza RC, Souza RM, Tanaka DK. Wear mode transition during the micro-scale abrasion of WC-Co P20 and M2 tool steel. In: Anais do 18. International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2005; 2005; Ouro Preto, Brasil. Rio de Janeiro: ABCM; 2005.
- 3 Cozza RC, Mello JDB, Tanaka DK, Souza RM. Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear*. 2007;263:111-116.
- 4 Cozza RC, Recco AAC, Tschiptshin AP, Souza RM, Tanaka DK. Análise comportamental dos coeficientes de atrito e desgaste de sistemas revestidos submetidos a desgaste micro-abrasivo. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.* 2010;6:237-244. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00604010>

- 5 Trezona RI, Allsopp DN, Hutchings IM. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*. 1999;225-229(Part 1):205-214. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)
- 6 Batista JCA, Matthews A, Godoy C. Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings. *Surf Coat Tech*. 2001;142-144:1137-1143. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01189-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01189-6)
- 7 Batista JCA, 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. *Tribol Int*. 2002;35:363-372. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00017-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00017-8)
- 8 Batista JCA, Joseph MC, Godoy C, Matthews A. Micro-abrasion wear testing of PVD TiN coatings on untreated and plasma nitrided AISI H13 steel. *Wear*. 2002;249:971-979. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00833-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00833-X)
- 9 Bello JO, Wood, R. J. K. Micro-abrasion of filled and unfilled polyamide 11 coatings. *Wear*. 2005;258:294-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.08.008>
- 10 Bose, K.; Wood RJK. Optimum test conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings. *Wear*. 2005;258:322-332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.018>
- 11 Cozza RC, Souza RM, Tanaka DK. Influência do desgaste da esfera na formação das calotas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa. In: *Anais do 4. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2006; 2006; Recife, Brasil*. Rio de Janeiro: ABCM, 2006.
- 12 Cozza RC, Tanaka DK, Souza RM. Micro-abrasive wear of DC and pulsed DC titanium nitride thin films with different levels of film residual stresses. *Surf Coat Tech*. 2006;201:4242-4246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.044>
- 13 Mergler YJ, Huis In 't Veld H. Micro-abrasive wear of semi-crystalline polymers. *Tribol Res Design Eng Sys*. 2003;41:165-173.
- 14 Rutherford KL, Hutchings IM. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. *Surf Coat Tech*. 1996;79:231-239. [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)
- 15 Adachi K, Hutchings IM. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. *Wear*. 2003;255:23-29. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00073-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00073-5)
- 16 Adachi K, Hutchings IM. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness. *Wear*. 2005;258:318-321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.02.016>
- 17 Ramalho A. Micro-scale abrasive wear of coated surfaces-prediction models. *Surf Coat Tech*. 2005;197:358-366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.024>
- 18 Hutchings IM. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 7. ed. London: Edward Arnold; 1992.
- 19 Bello JO, Wood RJK. Grooving micro-abrasion of polyamide 11 coated carbon steel tubulars for downhole application. *Wear*. 2003;255:1157-1167.
- 20 Ceschini L, Palombarini G, Sambogna G, Firrao D, Scavino G, Ubertalli G. Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests. *Tribol Int*. 2006;39:748-755. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.003>
- 21 Chen H, Xu C, Zhou Q, Hutchings IM, Shipway PH, Liu J. Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings. *Wear*. 2005;258:333-338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.044>
- 22 Gee MG, Gant AJ, Hutchings IM, Kusano Y, Schiffman K, Van Acker K et al. Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test. *Wear*. 2005;259:27-35.
- 23 Kusano Y, Hutchings IM. Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test. *Wear*. 2005;258:313-317. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.02.020>
- 24 Kusano Y, Van Acker K, Hutchings IM. Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates. *Surf Coat Tech*. 2004;183:312-327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.010>
- 25 Shipway PH, Howell L. Microscale abrasion-corrosion behaviour of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings. *Wear*. 2005;258:303-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.04.003>
- 26 Saint-Gobain Abrasivos. São Paulo; 2008 [acesso em 15 fev. 2008]. Disponível em: <http://www.saint-gobain.com.br>.
- 27 Cozza RC. Estudo do desgaste e atrito em ensaios microabrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante [doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2011.
- 28 Hutchings IM. Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach. *Tribol Int*. 1998;31:5-15. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00004-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00004-8)
- 29 Rutherford KL, Hutchings IM. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. *J Test Eval*. 1997;25:250-260.
- 30 Cozza RC. Influence of the normal force, abrasive slurry concentration and abrasive wear modes on the coefficient of friction in ball-cratering wear tests. *Tribol Inter*. No prelo 2013.

- 31 Cozza RC. Técnicas de aplicação e medição das forças normal e tangencial em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa [monografia]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2006.
- 32 Cozza RC. Adoção de técnicas de difração e imagem na caracterização de materiais e análise de resultados obtidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera [monografia]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2007.
- 33 Allsopp DN, Trezona RI, Hutchings IM. The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test. *Tribol Lett.* 1998;5:259-264. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019178716408>
- 34 Gee MG, Gant A, Hutchings I, Bethke R, Schiffman K, Van Acker K et al. Progress towards standardisation of ball cratering. *Wear.* 2003;255:1-13.
- 35 Gee MG, Wicks MJ. Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings. *Surf Coat Tech.* 2000;133-134:376-382. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00966-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00966-X)
- 36 Cozza RC. A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. *Surf Coat Tech.* 2013;215:224-233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.088>
- 37 Cozza RC. Effect of pressure on abrasive wear mode transitions in micro-abrasive wear tests of WC-Co P20. *Tribol Inter.* 2013;57:266-271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2012.06.028>
- 38 Batista JCA, Godoy C, Pintaúde G, Sinatora A, Matthews A. An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests. *Surf Coat Tech.* 2003;174-175:891-898. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00351-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00351-7)
- 39 Rutherford KL, Bull SJ, Doyle ED, Hutchings IM. Laboratory characterization of the wear behaviour of PVD-coated tool steels and correlation with cutting tool performance. *Surf Coat Tech.* 1996;80:176-180. [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02706-8](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)02706-8)
- 40 Barge M, Rech J, Hamdi H, Bergheau J-M. Experimental study of abrasive process. *Wear.* 2008;264:382-388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.046>
- 41 Kruschov MM. Resistance of metals to wear by abrasion as related to hardness. In: Conference on Lubrication and Wear; 1957; London, England. [S.n.t.]. p. 655-659.

Recebido em: 28/07/2012

Aceito em: 18/02/2013