

UMA ABORDAGEM SOBRE REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS E FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS EM ENSAIOS DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA

Ronaldo Câmara Cozza, ronaldo.cozza@poli.usp.br¹
Leonardo Fernandes Muniz de Souza, leonardo@meltec.com.br²
Raony Rossetti da Fonseca Zeferino, raony.zeferino@poli.usp.br¹
Maurício David Martins das Neves, mdneves@ipen.br²
Roberto Martins de Souza, roberto.souza@poli.usp.br¹
Deniol Katsuki Tanaka, dktanaka@usp.br¹

¹LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária - 05508-030 - São Paulo - SP

²LMP - Laboratório de Metalurgia do Pó, CCTM - Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais, IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - 05508-000 - São Paulo - SP

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 calota 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). Ensaios foram conduzidos 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, observou-se que, conforme prediz a literatura (Adachi e Hutchings, 2005), o modo de desgaste abrasivo por riscamento está relacionado a resultados de reprodutibilidade relativamente baixa. Para as condições de ensaios estabelecidas, não houve a fragmentação das partículas abrasivas, independente da distância de deslizamento, o que é justificado, entre outros fatores, pela baixa força normal aplicada.*

Palavras-chave: *desgaste micro-abrasivo, ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, desgaste abrasivo por riscamento, aço-rápido, revestimento, nitreto de titânio, carbeto de silício.*

1. 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 (Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2007; Trezona *et al.*, 1999) e não-metálicos (Batista *et al.*, 2001; 2002a; 2002b; Bello e Wood, 2005; Bose e Wood, 2005; Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2006a; 2006b; 2007; Mergler e Huis in ‘t Veld, 2003; Rutherford e Hutchings, 1996; Zeferino *et al.*, 2007a; 2007b; 2007c) sujeitos a ação de desgaste micro-abrasivo. Podem ser aplicadas forças normais menores que 0,1 N (Adachi e Hutchings, 2003; 2005) e, em ensaios conduzidos em filmes finos de espessura 2,5 µm, é possível obter calotas esféricas sem atingir o substrato (Ramalho, 2005).

Dois modos de desgaste abrasivo são atuantes: do rolamento das partículas abrasivas sobre o corpo-de-prova, resulta o denominado *desgaste abrasivo por rolamento*, enquanto *desgaste abrasivo por riscamento* ocorre quando as partículas abrasivas deslizam sobre a superfície (Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2006b; 2007; Hutchings, 1992; Zeferino *et al.*, 2007a; 2007c). Estes dois modos podem atuar simultaneamente, recebendo o nome de *desgaste abrasivo misto (rolamento + riscamento)* (Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2006b; 2007).

Na composição da pasta abrasiva, comumente utiliza-se carbeto de silício (SiC) (Batista *et al.*, 2001; 2002a; 2002b; Bello e Wood, 2003; 2005; Bose e Wood, 2005; Ceschini *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2005; Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2006a; 2006b; 2007; Gee *et al.*, 2005; Kusano e Hutchings, 2005; Kusano *et al.*, 2004; Mergler e Huis in ‘t Veld, 2003; Ramalho, 2005; Rutherford e Hutchings, 1996; Shipway e Howell, 2005; Trezona *et al.*, 1999; Zeferino *et al.*, 2007a; 2007b; 2007c); existindo dois tipos (Saint-Gobain Abrasivos, 2008): “carbeto de silício verde” e “carbeto de

silício preto”. Estas colorações variam em função das impurezas de cada material (Saint-Gobain Abrasivos, 2008). Outra diferença é a friabilidade, propriedade que um material abrasivo possui de manter, constantemente, arestas cortantes. O carбето 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 a atenção para dois assuntos: *i) influência da atuação de desgaste abrasivo por riscamento sob a reprodutibilidade de resultados e ii) influência da distância de deslizamento (S) sob a fragmentação de partículas abrasivas de carбето de silício preto*, sendo este, um 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 anteriormente nos trabalhos de Cozza (2006), Cozza *et al.* (2005; 2006a; 2006b; 2007) e Zeferino *et al.* (2007a; 2007b; 2007c). A Fig. (1) esquematiza seu princípio de funcionamento.

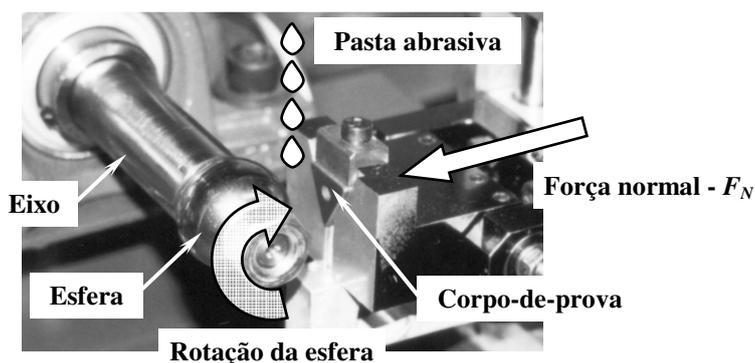


Figura 1. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa (Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2006a; 2006b; 2007; Zeferino *et al.*, 2007a; 2007b; 2007c).

Neste equipamento, 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 calotas geradas no corpo-de-prova, comumente denominadas de *crateras de desgaste*, e nas atuações dos modos de desgaste abrasivo (Cozza, 2006a; Cozza *et al.*, 2005; 2006b; 2007).

2.2. Materiais

Foram analisados corpos-de-prova de aço rápido SINTER 23 (1180/560), “com” e “sem” revestimento de nitreto de titânio (TiN). O aço-rápido foi doado pela Villares Metals S.A., e a nomenclatura “1180/560” refere-se, respectivamente, às temperaturas de “austenitização e têmpera” (1180 °C) e “revenimento” (560 °C) (Araújo Filho, 2006). Os revestimentos possuíam espessuras de 2 μm , e foram depositados pela BRASIMET Comércio e Indústria S.A.. A Fig. (2) exibe a secção transversal de um corpo-de-prova de aço rápido SINTER 23 (1180/560) revestido com TiN.

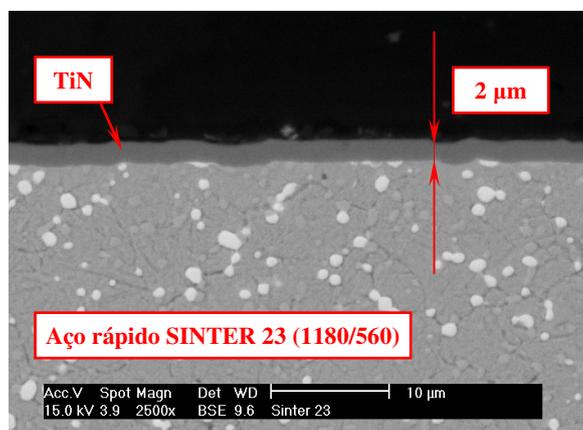


Figura 2. Secção transversal do aço rápido SINTER 23 (1180/560) revestido com TiN. Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura.

A pasta abrasiva foi composta por carbeto de silício preto e água destilada. Sua concentração está definida na Tab. (1), onde as duas colunas da esquerda mostram as porcentagens, em volume, de SiC e água destilada para a concentração. Na coluna da direita, está a massa de SiC por unidade de volume de água destilada ($g_{SiC}/cm^3 H_2O Destilada$).

Tabela 1. Concentração da pasta abrasiva.

% SiC (em volume)	% Água Destilada (em volume)	$g_{SiC}/$ $cm^3 H_2O Destilada$
25	75	1,045

O material abrasivo foi adquirido junto à empresa Minasolo – Comércio e Representações Ltda., e possui tamanho médio de partícula de 5 μm . A Fig. (3) exibe uma micrografia eletrônica de varredura do SiC preto utilizado.

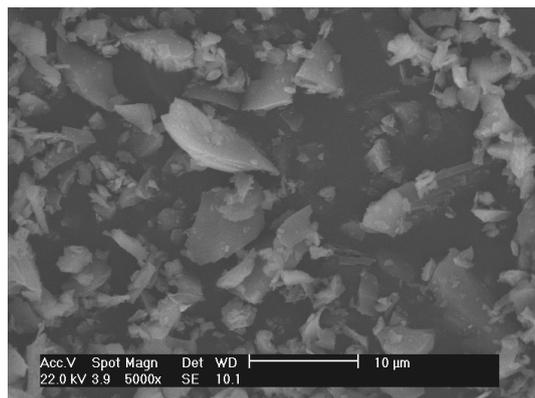


Figura 3. Carbeto de silício preto. Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura.

Foram utilizadas esferas de aço AISI 1010 cementado, com diâmetro de 25,4 mm (1”), adquiridas junto à empresa Só Esferas – Comércio de Esferas Ltda..

A Tabela (2) 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.

Tabela 2. Durezas dos materiais utilizados nos ensaios.

	Material	Dureza [GPa]	
Corpo-de-prova	Aço rápido SINTER 23 (1180/560)	9,66	(Araújo Filho, 2006)
	Filme fino de TiN	23,9	(Araújo Filho, 2006)
Esfera	Aço AISI 1010 cementado	8 – 8,5 ⁽¹⁾	(Cozza, 2006a)
Partícula abrasiva	SiC	18,5 – 19	(Cozza, 2006a)

(1): Na superfície da esfera.

2.3. Procedimento experimental

Foram estabelecidas quatro condições de ensaio, como mostra a Tab. (3).

Tabela 3. 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

A rotação da esfera (37,6 rpm) foi a mesma adotada por Trezona *et al.* (1999). Com esta rotação, para uma esfera de diâmetro 25,4 mm, tem-se uma velocidade tangencial periférica de 0,05 m/s, o que evita efeitos hidrodinâmicos (Adachi e Hutchings, 2005). 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.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Influência da atuação de desgaste abrasivo por riscamento

Inicialmente, foi utilizado o gráfico da severidade de contato (S_C) em função da relação de durezas H_{CP}/H_E (Adachi e Hutchings, 2003; 2005), 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 Eq. (1) (Cozza, 2006a), deduzida a partir dos trabalhos de Adachi e Hutchings (2003; 2005) e Hutchings (1992):

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

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.

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 (1180/560) e para o filme fino de TiN, respectivamente.

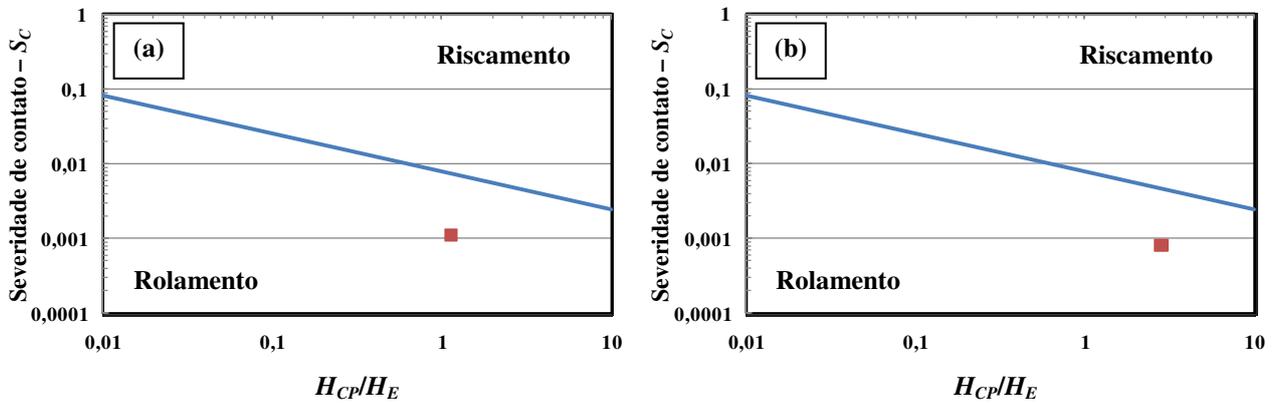


Figura 4. Gráficos da severidade de contato em função do quociente H_{CP}/H_E . Adaptação dos trabalhos de Adachi e Hutchings (2003; 2005). (a) Aço rápido SINTER 23 (1180/560). (b) filme fino de TiN.

Os gráficos da Fig. (4) indicam que a severidade de contato variou relativamente pouco em função do material considerado. 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.

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

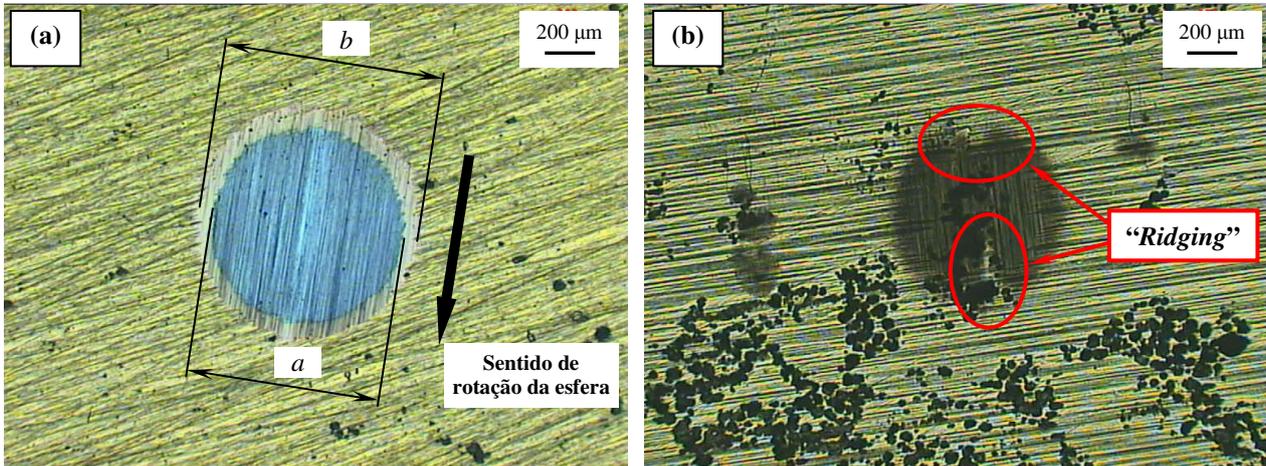


Figura 5. Crateras de desgaste. (a) Aço rápido SINTER 23 (1180/560) com revestimento de TiN. Definição dos diâmetros “a” e “b”. $S = 50$ m. (b) Aço rápido SINTER 23 (1180/560) sem revestimento. $S = 20$ m.

Assim como para os ensaios realizados neste trabalho, Adachi e Hutchings (2003; 2005) conduziram pesquisas em um equipamento de configuração “esfera-fixa”. Entretanto, as construções mecânicas dos equipamentos são diferentes (Cozza, 2006a; 2007a; 2007b; Cozza *et al.*, 2005; 2006a; 2006b; 2007; Zeferino *et al.*, 2007a; 2007b; 2007c; Adachi e Hutchings, 2003; 2005), o que pôde ter tido conseqüências nas atuações dos modos de desgaste.

Na região central da cratera de desgaste da Fig. (5b), observa-se a presença de “ridging”, também relatado por Allsopp *et al.* (1998), Gee *et al.* (2003) e Gee e Wicks (2000), e que pode inserir erros no valor de V . Este fenômeno ocorre devido a não penetração de partículas abrasivas na região central, em conseqüência da elevada tensão de Hertz (Hutchings, 1992; Gee *et al.*, 2003), como esquematiza a Fig. (6) (Allsopp *et al.*, 1998). Neste trabalho, o mesmo atuou somente nas crateras de desgaste geradas nos corpos-de-prova sem revestimento.

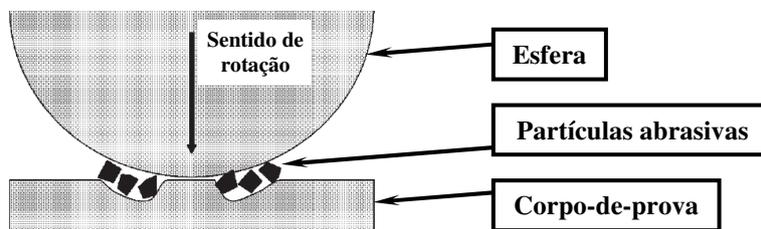


Figura 6. Formação de “ridging” (Allsopp *et al.*, 1998).

A Figura (7) apresenta os gráficos do volume de desgaste em função do tempo de ensaio, para o aço rápido SINTER 23 (1180/560) “com” e “sem revestimento” de TiN.

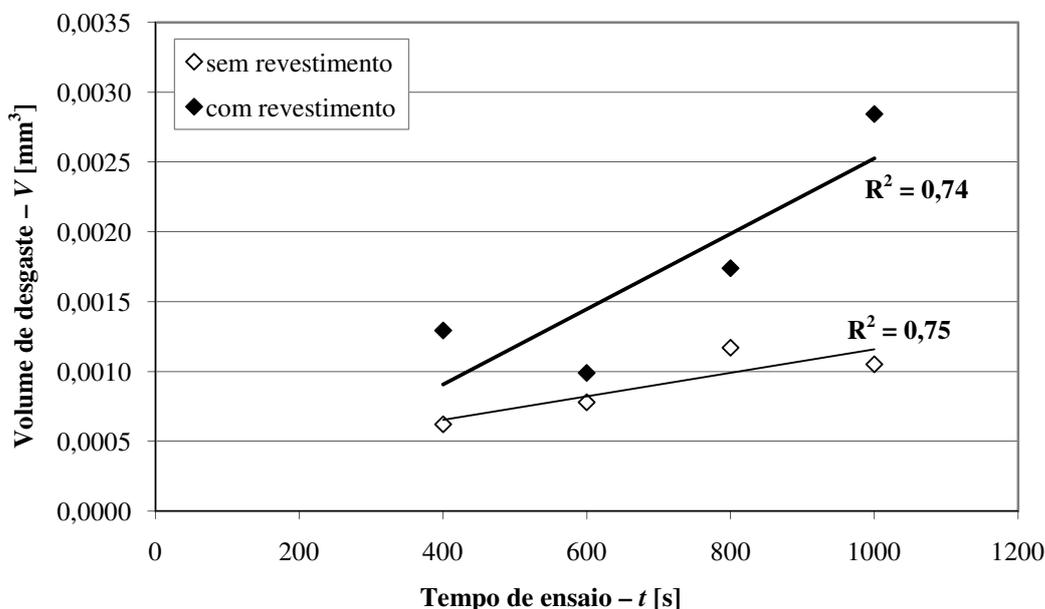


Figura 7. Gráficos do volume de desgaste em função do tempo de ensaio.

Pela literatura (Adachi e Hutchings, 2005; Bose e Wood, 2005) desgaste abrasivo por riscamento gera resultados com reprodutibilidade relativamente menor, quando comparados a números em que o modo de desgaste foi predominantemente ou, exclusivamente, por rolamento. Nas crateras de desgaste obtidas neste trabalho, o modo de desgaste abrasivo atuante foi unicamente por riscamento, o que explica a obtenção de resultados de baixa reprodutibilidade.

Na Figura (7) observa-se que o volume de desgaste total relacionado às crateras geradas no corpo-de-prova revestido foi maior que o volume gerado no corpo-de-prova sem revestimento. Este resultado, também, está em concordância qualitativa com a literatura (Batista *et al.*, 2001; 2002a; 2002b; 2003; Ramalho, 2005; Rutherford e Hutchings, 1996).

Conceitualmente, deduz-se que, com o revestimento, o volume de desgaste total da cratera diminua. Entretanto, o revestimento é efetivamente eficaz, quando somente o mesmo está sob a ação de desgaste. Em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, a esfera não só causa desgaste no revestimento como, também, pode causar, simultaneamente, desgaste no substrato.

Possivelmente, um filme fino de 2 μm de espessura, sob condições de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, não tenha capacidade para diminuir o volume de desgaste total da cratera. Na realidade, o filme fino pode estar amplificando o “real” valor de V .

Na Fig. (5a), como $b > a$, com base na equação $V = \pi b^4/64R$, o volume de desgaste pode ter um acréscimo significativo, o que explica os resultados apresentados nos gráficos da Fig. (6).

Outro fator que deve ser considerado na análise dos resultados, é o tamanho médio das partículas abrasivas 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 possível estabelecer quaisquer conclusões sobre a relação entre espessura de revestimento, tamanho de partículas abrasivas e volume de desgaste.

3.2. Fragmentação das partículas abrasivas

Na Figura (8) estão imagens das partículas abrasivas após a realização dos ensaios. (a), (b), (c) e (d) referem-se às partículas abrasivas utilizadas nos ensaios conduzidos nos corpos-de-prova de aço rápido SINTER 23 (1180/560) com revestimento de TiN, para as distâncias de deslizamento de 20, 30, 40 e 50 metros, respectivamente. (e) são as partículas abrasivas resultantes de um ensaio realizado em um corpo-de-prova não-revestido e, (f), é uma imagem do carreto de silício sem uso.

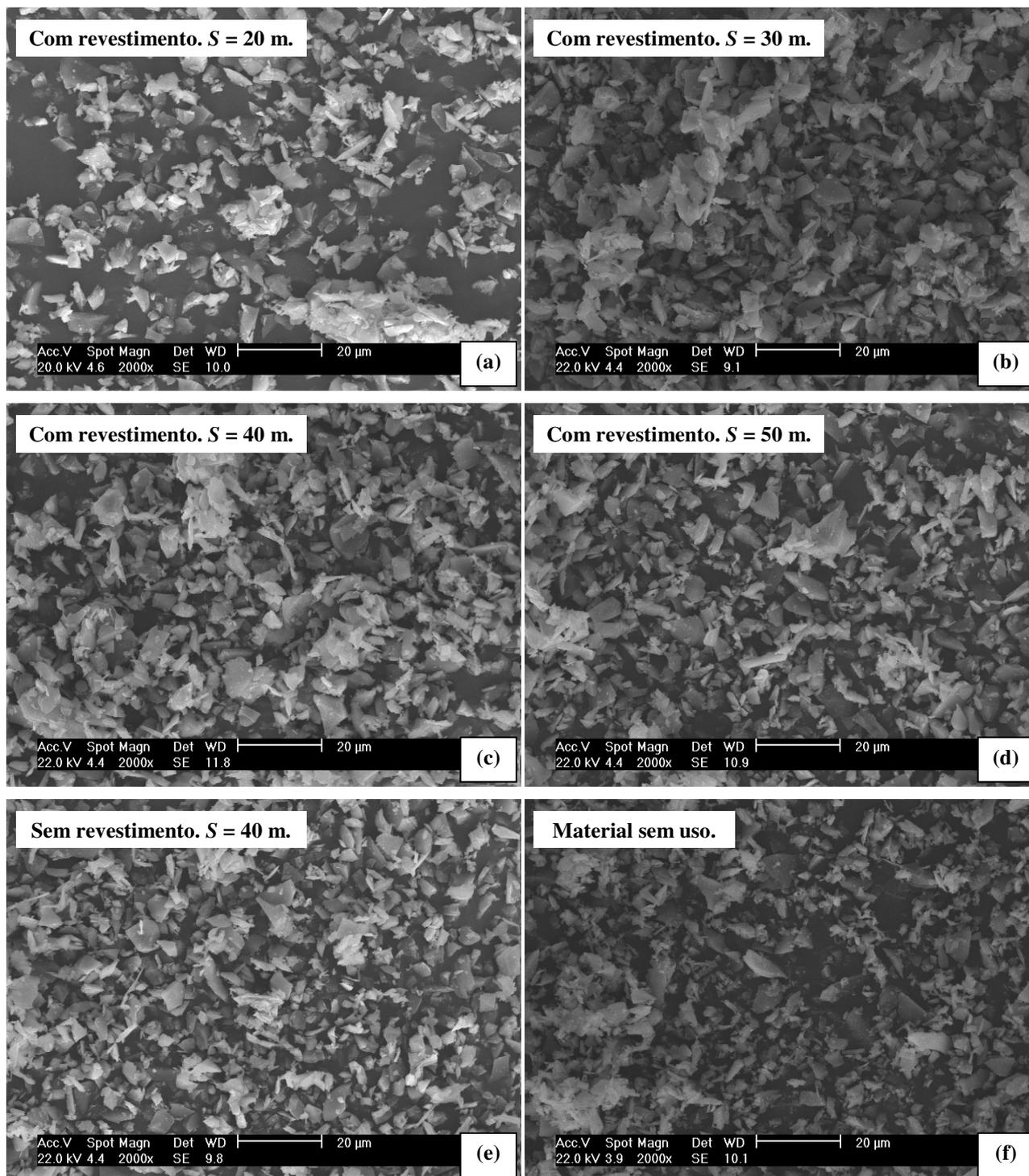


Figura 8. Partículas abrasivas. (a) $S = 20$ m, (b) $S = 30$ m, (c) $S = 40$ m e (d) $S = 50$ m: ensaios realizados em corpos-de-prova revestidos. (e) $S = 40$ m: ensaio realizado em corpo-de-prova sem revestimento. (f): SiC sem uso.

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 houve a fragmentação das partículas abrasivas, independente da distância de deslizamento.

Mesmo com o aumento da distância de deslizamento, durante os ensaios, houve 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 (1180/560) 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 Fig. (9), está compreendido na região de “regime de desgaste severo”. H_A é a dureza do carreto de silício.

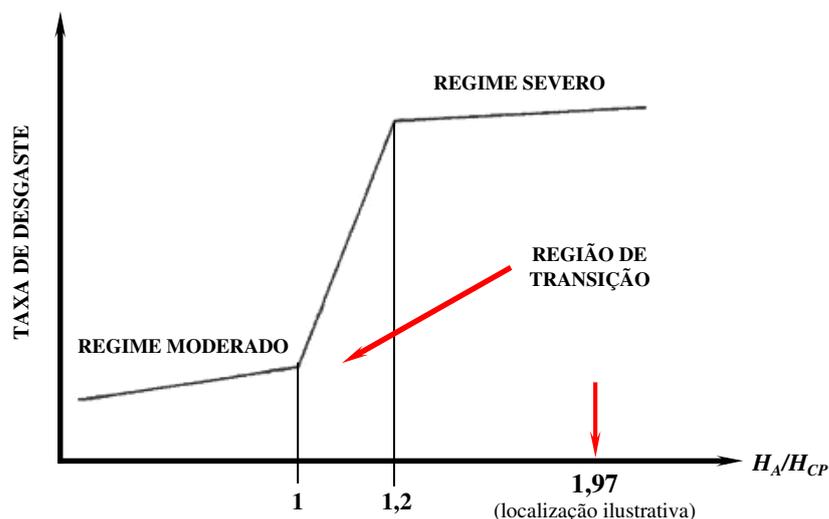


Figura 9. Relação esquemática entre a taxa de desgaste e a razão H_A/H_{CP} . Os pontos 1 e 1,2 limitam a região de transição entre os regimes de desgaste (Kruschov, 1957 *apud* Pintaúde, 2002).

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, observou-se que, independente da distância de deslizamento, não houve a fragmentação das partículas abrasivas. Entretanto, é completamente errado concluir, de forma generalizada, que 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.

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

Provavelmente, o carreto de silício “verde” apresente maior “facilidade” de fragmentação, em comparação ao SiC “preto”. Esta hipótese foi 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:

- 1) A análise de previsibilidade de atuação dos modos de desgaste abrasivo realizada com base nos trabalhos de Adachi e Hutchings (2003; 2005) não coincidiu com a prática. Uma possível explicação para este resultado, tenha sido as diferentes configurações mecânicas dos equipamentos utilizados;
- 2) 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;
- 3) Conforme predito na literatura (Adachi e Hutchings, 2005; Bose e Wood; 2005), quando o modo de desgaste abrasivo atuante é riscamento, obtêm-se resultados de reprodutibilidade relativamente baixa, quando comparados a resultados relacionados ao modo rolamento;
- 4) Os revestimentos de TiN não apresentaram capacidade suficiente para diminuir o volume de desgaste total das crateras. Ao invés disso, observou-se um ligeiro aumento em V ;
- 5) Para as condições de ensaio estabelecidas neste trabalho, não foi observada fragmentação das partículas abrasivas de carreto de silício preto, independente da distância de deslizamento.

5. AGRADECIMENTOS

Aos Técnicos Jovânio (EPUSP - Departamento de Engenharia Mecânica), Vinícius e Veríssimo (EPUSP - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) pela orientação na preparação das amostras de SiC para a obtenção das micrografias eletrônicas de varredura.

6. REFERÊNCIAS

- Adachi, K., Hutchings, I. M., 2003, "Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test", *Wear*, Vol. 255, pp. 23-29.
- Adachi, K., Hutchings, I. M., 2005, "Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness", *Wear*, Vol. 258, pp. 318-321.
- Allsopp, D.N., Trezona, R.I., Hutchings, I.M., 1998, "The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test", *Tribology Letters*, Vol. 5, pp. 259-264.
- Araújo Filho, O.O., 2006, "Estudo comparativo de aços rápidos AISI M3:2 produzidos por diferentes processos de fabricação", Tese de Doutorado, IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- Batista, J.C.A., Godoy, C., Matthews, A., 2002a, "Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex (single-layered) PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr-N coatings", *Tribology International*, Vol. 35, pp. 363-372.
- Batista, J.C.A., Godoy, C., Pintaúde, G., Sinatora, A., Matthews, A., 2003, "An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 174-175, pp. 891-898.
- Batista, J.C.A., Joseph, M.C., Godoy, C., Matthews, A., 2002b, "Micro-abrasion wear testing of PVD TiN coatings on untreated and plasma nitrated AISI H13 steel", *Wear*, Vol. 249, pp. 971-979.
- Batista, J.C.A., Matthews, A., Godoy, C., 2001, "Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 142-144, pp. 1137-1143.
- Bello, J.O., Wood, R.J.K., 2003, "Grooving micro-abrasion of polyamide 11 coated carbon steel tubulars for downhole application", *Wear*, Vol. 255, pp. 1157-1167.
- Bello, J.O., Wood, R.J.K., 2005, "Micro-abrasion of filled and unfilled polyamide 11 coatings", *Wear*, Vol. 258, pp. 294-302.
- Bose, K., Wood, R.J.K., 2005, "Optimum test conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings", *Wear*, Vol. 258, pp. 322-332.
- Ceschini, L., Palombarini, G., Sambogna, G., Firrao, D., Scavino, G., Ubertaini, G., 2006, "Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests", *Tribology International*, Vol. 39, pp. 748-755.
- Chen, H., Xu, C., Zhou, Q., Hutchings, I.M., Shipway, P.H., Liu, J., 2005, "Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings", *Wear*, Vol. 258, pp. 333-338.
- Cozza, R.C., 2006a, "Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- Cozza, R.C., 2006b, "Técnicas de aplicação e medição das forças normal e tangencial em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa", Monografia, Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- Cozza, R.C., 2007, "Adoção de técnicas de difração e imagem na caracterização de materiais e análise de resultados obtidos em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa", Monografia, Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- Cozza, R.C., de Mello, J.D.B., Tanaka, D.K., Souza, R.M., 2007, "Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests", *Wear*, Vol. 263, pp. 111-116.
- Cozza, R.C., Souza, R.M., Tanaka, D.K., 2005, "Wear mode transition during the micro-scale abrasion of WC-Co P20 and M2 tool steel", In: XVIII International Congress of Mechanical Engineering, Proceedings of COBEM 2005, Ouro Preto, MG.
- Cozza, R.C., Souza, R.M., Tanaka, D.K., 2006a, "Influência do desgaste da esfera na formação das calotas em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa", In: IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Anais do CONEM 2006, Recife, PE.
- Cozza, R.C., Tanaka, D.K., Souza, R.M., 2006b, "Micro-abrasive wear of DC and pulsed DC titanium nitride thin films with different levels of film residual stresses", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 4242-4246.
- Gee, M.G., Gant, A., Hutchings, I.M., Bethke, R., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., von Stebut, J., 2003, "Progress towards standardisation of ball cratering", *Wear*, Vol. 255, pp. 1-13.
- Gee, M.G., Gant, A.J., Hutchings, I.M., Kusano, Y., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., von Stebut, J., Hatto, P., Plint, G., 2005, "Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test", *Wear*, Vol. 259, pp. 27-35.
- Gee, M.G., Wicks, M.J., 2000, "Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133-134, pp. 376-382.
- Hutchings, I.M., 1992, "Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials". 7th edition. London: Edward Arnold.
- Kruschov, M.M., 1957, "Resistance of metals to wear by abrasion as related to hardness". In: Conference on Lubrication and Wear, pp. 655-659, London.

- Kusano, Y., Hutchings, I.M., 2005, "Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test". *Wear*, Vol. 258, pp. 313-317.
- Kusano, Y., Van Acker, K., Hutchings, I.M., 2004, "Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 183, pp. 312-327.
- Mergler, Y.J., Huis in 't Veld, H., 2003, "Micro-abrasive wear of semi-crystalline polymers". *Tribological Research and Design for Engineering Systems*, pp. 165-173.
- Pintaúde, G., 2002, "Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza", Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- Ramalho, A., 2005, "Micro-scale abrasive wear of coated surfaces-prediction models", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 197, pp. 358-366.
- Rutherford, K.L., Hutchings, I.M., 1996, "A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 79, pp. 231-239.
- Saint-Gobain Abrasivos, 2008, "<http://www.saint-gobain.com.br>", página acessada em 02/2008.
- Shipway, P.H., Howell, L., 2005, "Microscale abrasion-corrosion behaviour of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings", *Wear*, Vol. 258, pp. 303-312.
- Trezona, R.I., Allsopp, D.N. e Hutchings, I.M., 1999, "Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test", *Wear*, Vol. 225-229, pp. 205-214.
- Zeferino, R.R.F., Cozza, R.C., Souza, R.M., Tanaka, D.K., 2007a, "Efeito da pressão de contato em ensaios de micro-abrasão de WC-Co P20", In: VIII Encontro de Iniciação Científica do Laboratório de Fenômenos de Superfícies, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Zeferino, R.R.F., Cozza, R.C., Souza, R.M., Tanaka, D.K., 2007b, "Análise de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos sob força normal e pressão de contato constantes", In: XIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Anais do CREEM 2007, Uberlândia, MG.
- Zeferino, R.R.F., Cozza, R.C., Souza, R.M., Tanaka, D.K., 2007c, "Effect of the contact pressure on the wear mode transition in micro-abrasive wear tests of WC-Co P20". In: IXX International Congress of Mechanical Engineering, Proceedings of COBEM 2007, Brasília, DF.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

A STUDY ABOUT RESULTS REPRODUTIBILITY AND ABRASIVE PARTICLES FRAGMENTATION IN MICRO-ABRASIVE WEAR TESTING BY ROTATING BALL

Ronaldo Câmara Cozza, ronaldo.cozza@poli.usp.br¹
Leonardo Fernandes Muniz de Souza, leonardo@meltec.com.br²
Raony Rossetti da Fonseca Zeferino, raony.zeferino@poli.usp.br¹
Maurício David Martins das Neves, mdneves@ipen.br²
Roberto Martins de Souza, roberto.souza@poli.usp.br¹
Deniol Katsuki Tanaka, dktanaka@usp.br¹

¹Surface Phenomena Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Polytechnic School of the University of São Paulo. Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária - 05508-030 - São Paulo - SP

²Powder Metallurgy Laboratory, Materials Science and Technology Centre, Nuclear and Energetic Researches Institute. Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária - 05508-000 - São Paulo - SP

Abstract: *The micro-abrasive wear tests by rotating ball has been showed an important advice in abrasive wear researches. The contact between a specimen and a ball on rotating motion and abrasive particles supplied between these two elements make a crater on the specimen, and the abrasive wear behaviour is analysed. The purpose of this work is to study results reproductibility and silicon carbide (SiC) abrasive particles fragmentation. Tests were conducted with cemented AISI steel and high speed steel specimen, "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. It was observed that as the literature predicts (Adachi and Hutchings, 2005), grooving abrasion is related with lower results reproductibility. For the test conditions of this work, there wasn't abrasive particles fragmentation, independently of the sliding distance, what is justified, between others factors, by the low normal force applied.*

Keywords: *micro-abrasive wear, micro-abrasive wear testing, grooving abrasion, high speed steel, coating, titanium nitride, silicon carbide.*

8. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.