

DESEMPENHO DE COMPÓSITOS A BASE DE TUNGSTÊNIO EM MICROABRASÃO COM LAMAS ABRASIVAS DE SiO₂, Fe₃O₂ e SiC¹

André Menegaz Lozzer²

José Daniel Biasoli de Mello³

Marcelo Camargo Severo de Macedo⁴

Cherlio Scandian⁵

Resumo

Este estudo visa realizar uma análise de desgaste abrasivo em matrizes de ligas sinterizadas de W utilizadas em coroas para sondagem mineral, através do ensaio de microabrasão. Dez tipos de materiais para coroas sinterizadas por infiltração e sem diamantes foram ensaiados. A granulometria do pó de W e a adição de pós metálicos com outra composição são os fatores de distinção. Foi medida a dureza Vickers das ligas com carga de 10 kgf. Os testes de microabrasão foram realizados com lama abrasiva (SiC, SiO₂, SiC e água). O coeficiente de desgaste dimensional foi calculado no regime permanente pela metodologia clássica baseada num perfil esférico ideal, conferido através de interferometria à laser. O comportamento em desgaste é relacionado com a dureza, o tamanho das partículas de W e adições. Os mecanismos de desgaste foram avaliados a partir de micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

Palavras-chave: Brocas de perfuração; Sinterizados; Microabrasão.

COMPOSITES OF TUNGSTEN PERFORMANCE AT MICRO SCALE ABRASION TEST WITH ABRASIVE SLURRYS OF SiO₂, Fe₃O₂ e SiC

Abstract

This work aims to analyze the abrasive wear of sintered tungsten alloys used on impregnated diamond bits for mining exploration by micro scale abrasion tests. Seven alloys produced by liquid phase sintering and without diamond were studied. The main differences effects of tungsten powder mean size and other alloy additions were evaluated. Vickers Hardness was measured with 10 kgf load. Micro scale abrasion tests were performed with abrasive slurrys (SiC, SiO₂, SiC and water). Dimensional wear coefficients were calculated on the steady state and assuming a spherical geometry, checked by laser interferometry. Dimensional wear coefficients were compared with hardness, the tungsten powder size and also alloy additions. Wear mechanisms were evaluated by scanning electron microscopy.

Key words: Impregnated diamond bits; Sintered materials; Micro abrasion.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Mestrando no PPGEM, UFES – ES, andremenegaz@yahoo.com.br

³ Professor Dr. LTM/FEM/UFU- MG, ltm-demello@ufu.br

⁴ Professor Dr. PPGEM/UFES - ES, mcamargo@npd.ufes.br

⁵ Professor Dr. PPGEM/UFES – ES, cherlios@npd.ufes.br

1 INTRODUÇÃO

Para a realização de sondagem mineral testemunhada, variação importante na prospecção mineral, emprega-se, normalmente, coroas diamantadas ou, também chamadas, brocas de perfuração. Essas coroas são fabricadas através do processo de sinterização por infiltração, constituindo-se basicamente de uma matriz metálica com dispersão de pequenos diamantes de forma aleatória. As matrizes metálicas, formadas por um esqueleto de pós de W unidos por uma liga metálica infiltrante (neste caso, o latão), têm por objetivo sustentar os diamantes e ao mesmo tempo ser criteriosamente desgastada, a fim de expor os mesmos durante a utilização da ferramenta. Caso este desgaste seja elevado os diamantes serão arrancados facilmente, resultando em diminuição de vida útil da ferramenta. A constituição, em peso, aproximada das coroas é $\frac{1}{3}$ pós de W, $\frac{1}{3}$ de liga infiltrante e $\frac{1}{3}$ diamantes.^(1,2)

A diferença entre elas reside, basicamente, no tamanho de pós de W e a quantidade relativa destes, além de algumas adições de pós com outras composições. Visando compreender o desgaste abrasivo pelo qual as coroas são submetidas durante a perfuração, este trabalho utiliza de testes de microabrasão para compará-las qualitativamente. A partir dos ensaios realizados, fez-se uma correlação entre o coeficiente de desgaste e algumas características das matrizes metálicas, tais como: dureza, composição e granulometria do pó.

Os resultados dos testes de microabrasão foram obtidos pela metodologia clássica, considerando a calota uma superfície esférica ideal.⁽³⁾

A avaliação das regiões desgastadas via microscópio eletrônico de varredura (MEV), permitiu fazer alguma inferência sobre os mecanismos de desgaste, onde foi observado, para cada lama abrasiva, basicamente, o mesmo comportamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram identificadas segundo o tamanho médio dos pós metálicos de tungstênio (W) que as compõe e os respectivos pós de adição, o que pode ser observado na Tabela 1. Todas as amostras foram sinterizadas sem diamantes com a seguinte liga infiltrante: Cu-43Zn-1Sn (% em peso). A sinterização foi realizada em forno tipo mufla na temperatura de aproximadamente 1.050°C.

Tabela 1 - Nomenclatura e constituição dos materiais utilizados

Material	Constituição
4	W (tamanho médio de 3,5 μm)
4-Cu	W (tamanho médio de 3,5 μm) + 60Cu-25Co-15Fe
4-Fe	W (tamanho médio de 3,5 μm) + 72Fe-25Co-3Cu
4-Fe-SiC	W (tamanho médio de 3,5 μm) + 72Fe-25Co-3Cu + SiC
4-Mo	W (tamanho médio de 3,5 μm) + Mo
4-SiC	W (tamanho médio de 3,5 μm) + SiC
6-16	W (tamanho médio de 6 μm) + W (tamanho médio de 16 μm)
6	W (tamanho médio de 6 μm)
6-SiC	W (tamanho médio de 6 μm) + SiC
16	W (tamanho médio de 16 μm)

As amostras foram preparadas manualmente com lixas d'água com granulometria inicial de 180, dentre outras, até alcançar 600.

Os ensaios de microabrasão foram realizados em um equipamento do tipo "esfera livre", onde esta é movida por um eixo motor e desliza sobre o corpo de prova fixo num suporte inclinado que, através de uma célula de carga, mede

continuamente a força normal sobre o contato durante todo o teste. A esfera é de aço inoxidável martensítico com um diâmetro de 30 mm e seu contato com o corpo de prova é feito em um meio abrasivo em fluxo contínuo. O equipamento também possui um misturador magnético para agitar continuamente a lama abrasiva sem possibilidade de contaminação e uma luneta de observação. O aspecto geral do equipamento é apresentado na Figura 1.

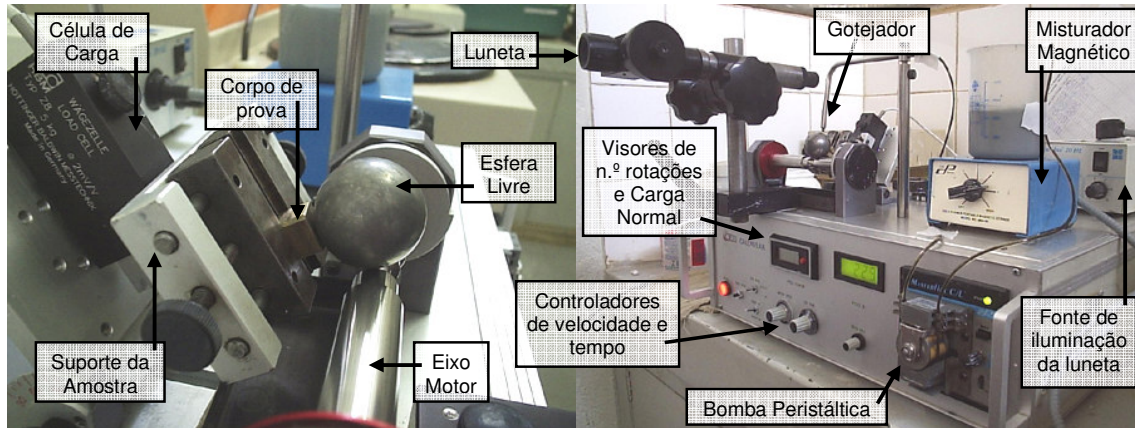


Figura 1 - Ilustração do equipamento de microabrasão (Calowear, LTM/UFU)

Os parâmetros adotados para a realização dos ensaios estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do teste de microabrasão

Rotação do eixo motor	150 a 180 [rpm]
Ângulo de inclinação do suporte	70 [°]
Força normal estática	0,22 ± 0,01 [N]
Abrasivos	- SiC com granulometria média < 5 µm - SiO ₂ com granulometria média < 5 µm - Fe ₂ O ₃ com granulometria média < 5 µm
Concentração do abrasivo	0,1 [mg/cm ³]
Gotejamento do abrasivo	1 gota a cada 3 segundos

No ensaio de microabrasão admite-se que a impressão da calota na amostra, ou seja, a região desgastada tenha o mesmo perfil geométrico do corpo responsável por sua impressão. Assim, é possível determinar o volume de material desgastado (V) a partir do diâmetro da esfera (\varnothing_e) e do diâmetro da calota desgastada (b) através da Equação 1.^(3,4)

$$V \approx \frac{\pi \cdot b^4}{32 \cdot \varnothing_e}, \text{ para } b \ll \varnothing_e \quad \text{Equação 1}$$

Na Figura 2, são mostrados, a título de ilustração, o esquema de funcionamento do dispositivo de teste empregado, uma imagem gerada por interferometria à laser da calota sobre a amostra e o diâmetro da mesma.

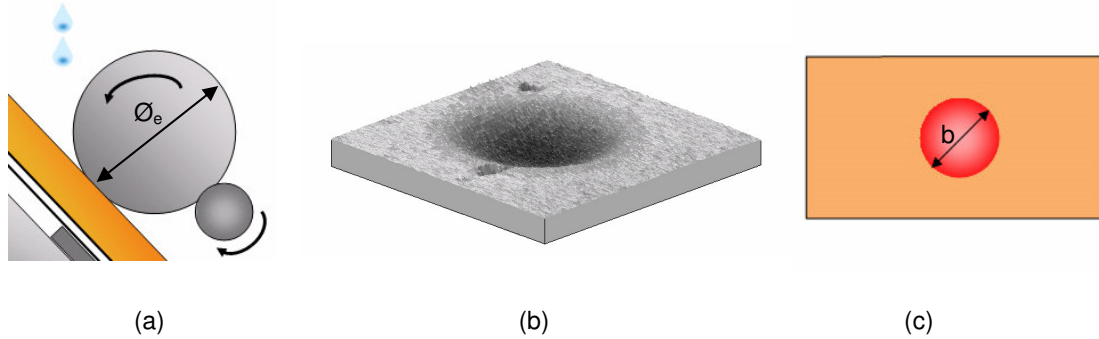


Figura 2 - Esquema de impressão (a), imagem (b) e dimensão da calota desgastada (c).

Este modelo simples de desgaste abrasivo equivale à equação de Archard para desgaste por deslizamento:⁽³⁾

$$Q = \frac{V}{S} = \frac{K \cdot N}{H} \quad \text{Equação 2}$$

A partir da Equação 2, considera-se a relação $\frac{K}{H}$ igual a k , levando, assim:

$$k = \frac{V}{S \cdot N} \quad \text{Equação 3}$$

Onde k representa o coeficiente de desgaste dimensional, cuja unidade é dada em $\text{m}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$, V é o volume de material desgastado, S é a distância deslizada e N a força normal sobre o contato.

Deste modo, unindo as Equação 1 e 3, temos uma expressão para o coeficiente de desgaste dimensional (k) em função do diâmetro da calota desgastada (b), do diâmetro da esfera livre (\varnothing_e) e das variáveis de ensaio: distância deslizada (S) e força normal sobre o contato (N), que é ilustrada na Equação 4.

$$k \approx \frac{\pi \cdot b^4}{32 \cdot \varnothing_e \cdot S \cdot N}, \text{ para } b \ll \varnothing_e \quad \text{Equação 4}$$

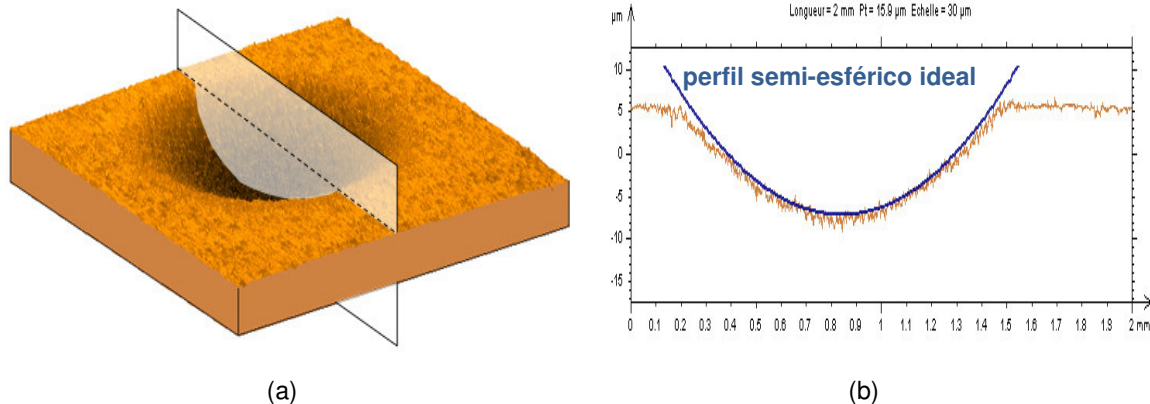
Para cada uma das sete amostras, chegou-se a um valor para o coeficiente de desgaste dimensional a partir dos valores dos três últimos pontos de cada ensaio contidos no regime permanente, resultando, assim, nove valores por amostra, utilizados para os cálculos da média e do desvio padrão. O regime permanente foi considerado o ponto a partir do qual todas as amostras apresentaram variação inferior a 7% para o coeficiente de desgaste ao longo do tempo.

As observações por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas num equipamento marca LEICA-OXFORD, modelo S440i, da Cia. Siderúrgica de Tubarão (CST).

Os ensaios de dureza foram realizados em durômetro Vickers (WPM) com carga de 10 kgf, por 30 segundos, em vários pontos da superfície das amostras que representasse a dureza da coroa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar os cálculos baseados no perfil semi-esférico ideal da calota, tal perfil foi constatado com análise do perfil de maior profundidade, ilustrado pela Figura 3 (b), retirado da topográfica superficial da região desgastada, Figura 3 (a).



(a) (b)
Figura 3 – Topografia superficial de uma calota (a) e Perfil de maior profundidade (b).

Os resultados de dureza obtidos estão claramente relacionados com o tamanho da partícula de tungstênio e com o pó de liga adicionado, em geral, menor o tamanho maior é a dureza, possivelmente, devido ao processo de fabricação dos pós, atomização, e quanto menor for a partícula tem-se uma maior taxa de resfriamento, resultando em menores dendritas, que conferem maior dureza.⁽⁵⁾ Resultados também encontrados pelos fabricantes dos pós. Representados graficamente pela Figura 4.

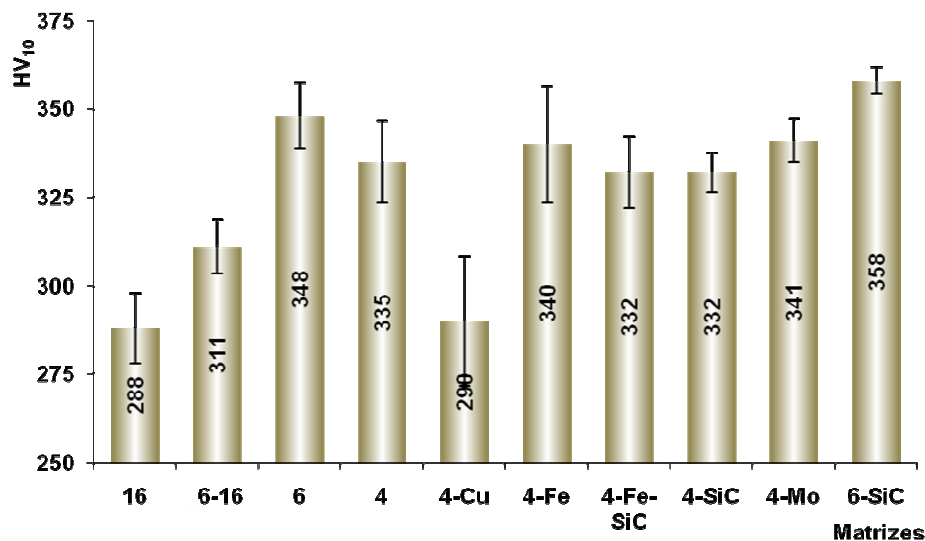


Figura 4 - Dureza Vickers, 10 kgf, das matrizes

Além destas, aquela que foi adicionado pó a base de Cu (“4-Cu”), devido à presença de uma maior quantidade de material mais macio, o cobre, apresentou baixo valor de dureza.

A Figura 5 expõe, como exemplo, três curvas separadas (a) e uma média equivalente (b) de coeficientes de desgaste dimensionais em micro abrasão realizada com lama abrasiva de SiC para as matriz “4” ao longo da distância deslizada.

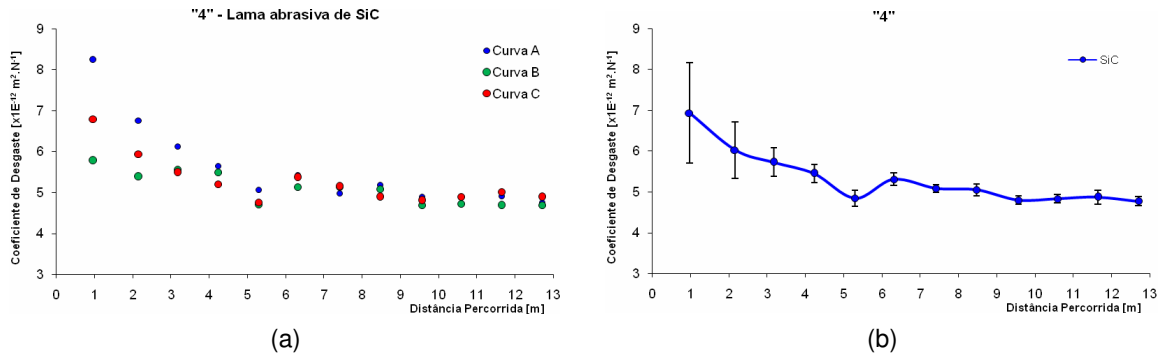


Figura 5 - Curvas separadas (a) e uma média equivalente (b) de k realizadas para a lama abrasiva de SiC para a matriz “4”.

O desempenho das matrizes sob desgaste abrasivo com lama de SiC diferencia três grupos, aqueles com desgaste mais elevado, coeficiente de desgaste, K , acima de $5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, onde encontra-se a matriz mais macia. Um grupo onde o desgaste foi intermediário, $4,5 \cdot 10^{-12} < K < 5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, onde estão os materiais com dureza elevada ou intermediária. O terceiro e último grupo, com desgaste inferior, abaixo de $4,5 \cdot 10^{-12}$, como ilustrado na Figura 6 (a). Para os casos das matrizes menos complexas, aquelas compostas apenas de pós de tungstênio (sem adições) e liga infiltrante é possível correlacionar o desgaste com o tamanho médio dos pós de tungstênio, onde, para um maior pó tem-se um menor desgaste, ilustrado na Figura 6 (b). Como, neste caso, as matrizes com tamanho médio de tungstênio maiores apresentam menores durezas, também há uma correlação, porém menor, entre o desgaste e dureza.

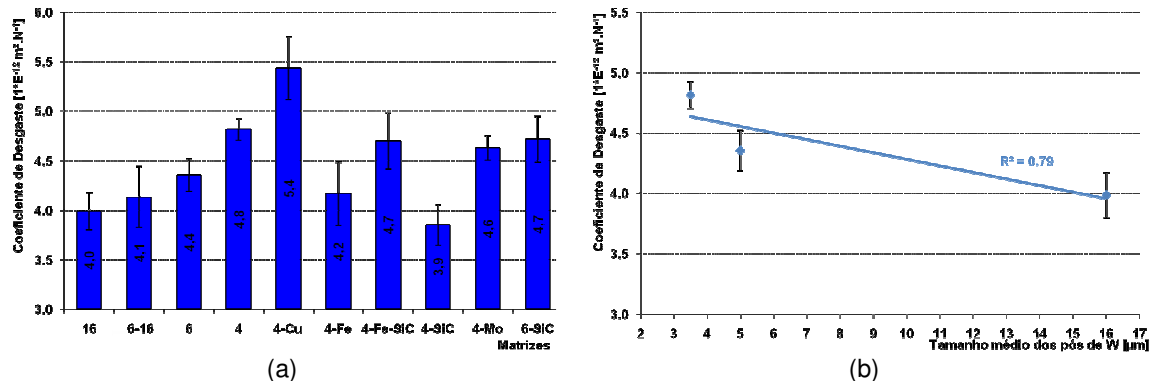


Figura 6 - Coeficientes de desgaste dimensionais (a) e Correlação com dureza para as matrizes menos complexas (b) com lama abrasiva de SiC.

De modo geral, os micromecanismos predominantes de desgaste atuantes nas matrizes submetidas ao desgaste com lama abrasiva com carbeto de silício são indentações múltiplas, vistas nas matrizes que apresentaram o menor (“4-SiC”) e maior (“4-Cu”) coeficiente de desgaste. Porém, as marcas de indentações e deformação plástica na matriz com maior coeficiente de desgaste, mais macia, são

visivelmente de proporções maiores, como mostram as Figura 7 (a) e (b), respectivamente.

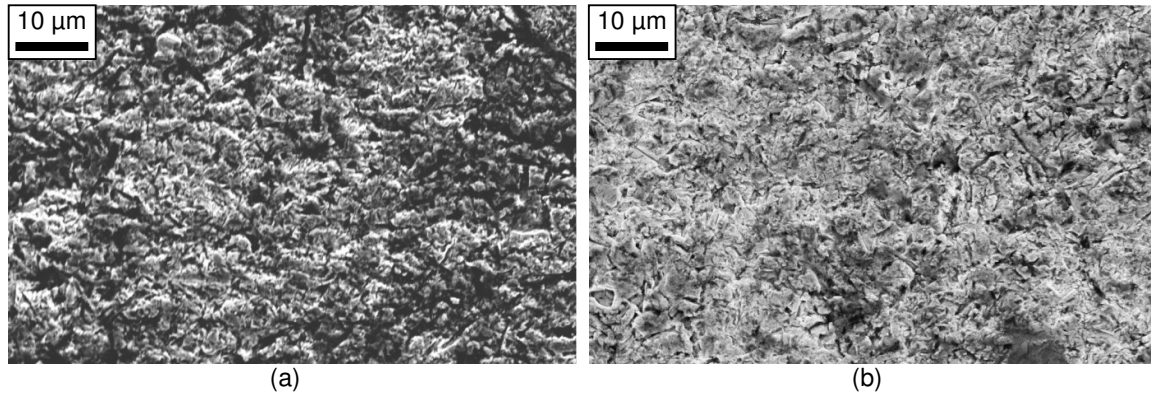


Figura 7 - Micromecanismos de desgaste por indentações múltiplas gerados com lama abrasiva de SiC, MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-Cu” (a) e “4-SiC” (b).

A análise qualitativa do desempenho das matrizes em lama abrasiva de Fe_2O_3 foi mais evidente comparada com a lama abrasiva de SiC, isto, provavelmente, devido à menor dureza do abrasivo. Com isso, a relação entre o maior e menor coeficiente de desgaste é maior, 1,7 contra 1,4 com lama abrasiva de SiC.

Contudo, essa classificação para a lama abrasiva de Fe_2O_3 é diferente. Neste caso, não mais a matriz mais macia apresentou maior desgaste, e sim uma de dureza intermediária, “4-Mo”, que apresenta mais riscos. Já o caso que apresentou menor desgaste, apesar do abrasivo ser mais macio, foi a matriz contendo abrasivos secundários de SiC (“4-SiC”), que possivelmente, não influenciou nos resultados com lama de SiC por já possuir tal elemento, muito duro, no tribosistema. Na lama abrasiva de Fe_2O_3 , esse abrasivo secundário é fraturado com sucessivos esforços e também age retirando material na interface. Os resultados com lama abrasiva de Fe_2O_3 são ilustrados na Figura 8 (a).

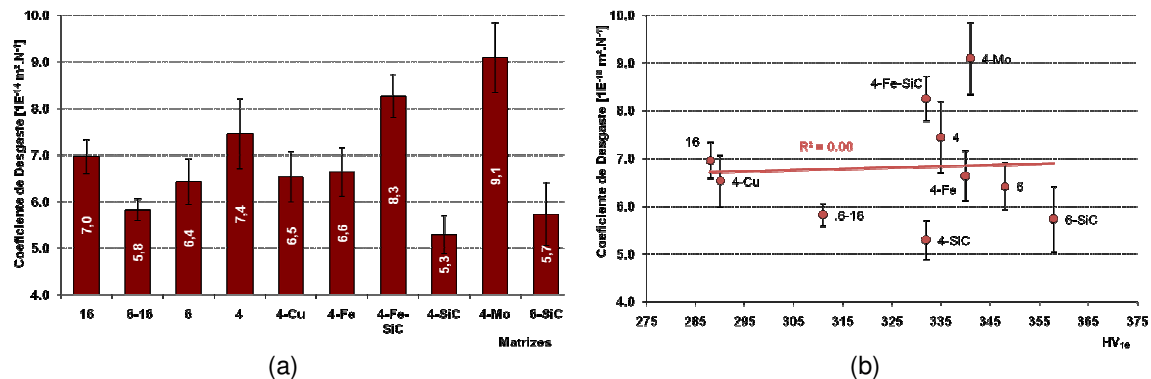


Figura 8 - Coeficientes de desgaste dimensionais (a) e correlação com dureza para as matrizes menos complexas (b) com lama abrasiva de Fe_2O_3 .

Neste caso de microabrasão com lama de Fe_2O_3 as matrizes não apresentaram uma correlação entre o desgaste e a dureza do composto. A Figura 8 (b) mostra coeficiente de correlação nulo para uma tendência linear.

O mecanismo predominante de desgaste com lama abrasiva de Fe_2O_3 é riscamento, porém existem algumas ocorrências de fratura frágil em alguns elementos duros nas matrizes. É visível, também, que as matrizes que apresentaram

maior desgaste possuem quantidade de risco maior, por exemplo, a matriz “4-Mo” comparada com “4-SiC”, mais resistente a esse desgaste, nas Figura 9 (a) e (b).

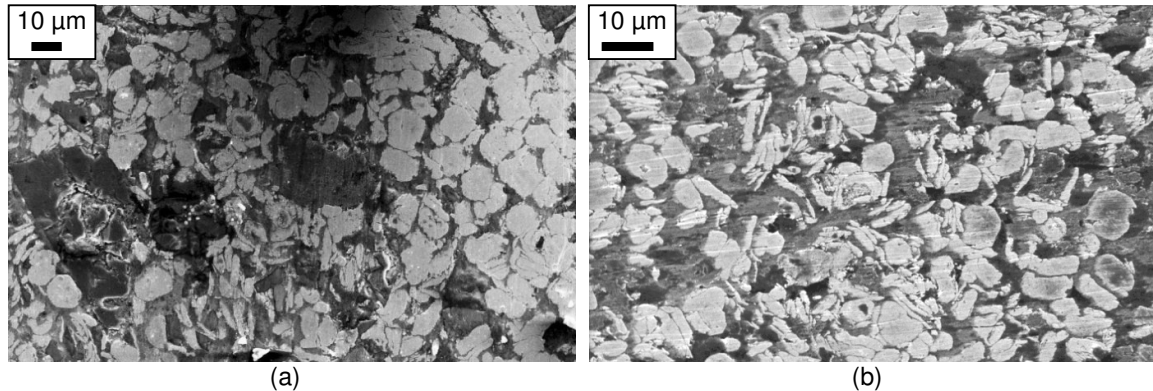


Figura 9 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de Fe_2O_3 , MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-SiC” (a) e “4-Mo” (b).

A lama abrasiva de SiO_2 foi a que diferenciou mais as matrizes em seu processo de desgaste, neste caso, a relação entre o maior e menor valor de coeficiente de desgaste é aproximadamente 2. Possivelmente, por este ser um abrasivo mais macio.

Ao contrário da resposta com os outros abrasivos, a tendência neste caso foi para uma maior resistência ao processo de desgaste para os materiais que apresentam maiores valores de dureza. Analisando os casos extremos, a matriz que apresentou menor desgaste foi a mais dura, “6-SiC”, e aquelas que desgastaram mais são as matrizes mais macias, “16”, “6-16” e “4-Cu”. Os coeficientes de desgaste são mostrados na Figura 10 (a). Considerando somente as matrizes com tamanho médio dos pós de tungstênio, é possível dizer que as matrizes de maior dureza apresentaram menor desgaste, mostrado na Figura 10 (b).

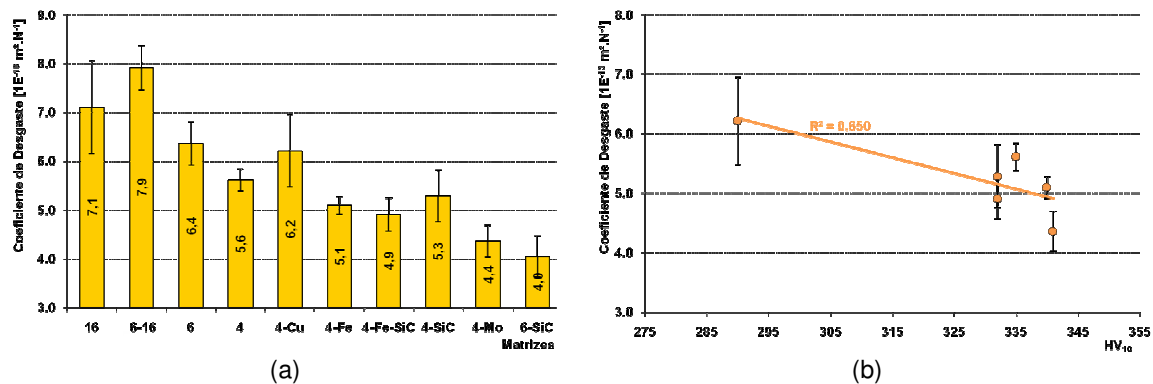


Figura 10 - Coeficientes de desgaste dimensionais (a) e correlação com dureza para as matrizes menos complexas (b) com lama abrasiva de SiO_2 .

Comparando o micromecanismo de desgaste predominante nas matrizes de maior desgaste (“16”) com o de uma de desgaste bem inferior (“4-Fe-SiC”), é visível que estes são riscamentos, semelhante ao caso de hematita, como pode ser visto nas Figura 9 e 11, com profundidades de corte muito próximas, verificadas por interferometria a laser, porém, com riscos mais largos e mais espaçados entre si.

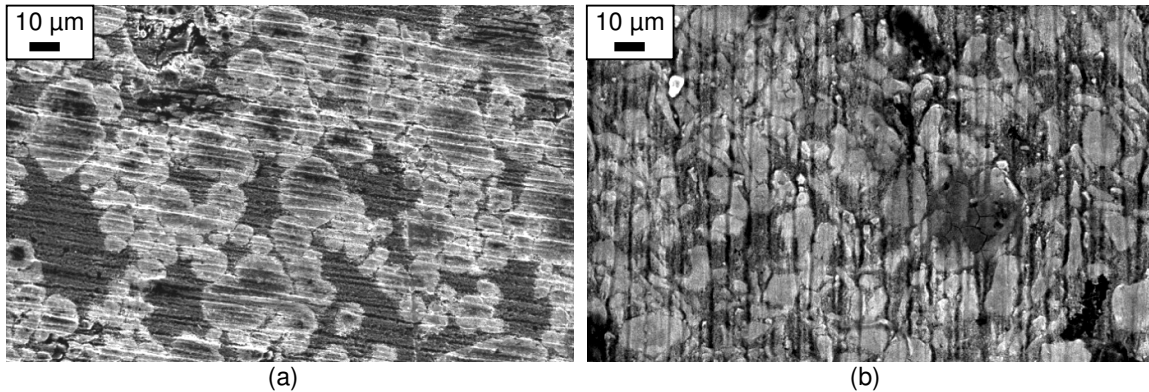


Figura 11 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de SiO_2 , MEV – Elétrons secundários – Matriz "16" (a) e "4-Fe-SiC" (b).

Os micromecanismos de desgaste predominantes para as lambras abrasivas de SiO_2 , Fe_2O_3 e SiC são, respectivamente, deslizamento de partículas e indentações múltiplas. Porém, o desgaste provocado pela lama abrasiva de Fe_2O_3 apresenta uma situação interessante, que o difere, em parte, dos demais mecanismos.

Pela própria constituição das matrizes, que contêm duas fases bem diferentes, uma dura formada pelo esqueleto de tungstênio e outra muito macia formada pelas ligas infiltrantes, é possível encontrar, no mesmo material, submetidos ao mesmo processo de desgaste, micromecanismos de deslizamento de partículas na fase muito dura e indentações múltiplas na fase mais macia sem que ocorra sobreposição desses mecanismos em cada fase.

As partículas abrasivas, quando presentes na interface contra-corpo/fase dura apresentam um comportamento de engaste no contra-corpo e provoca riscando na matriz, ao encontrar a matriz mais macia, que oferece menor resistência à penetração, as partículas indentam com maior facilidade provocando uma rotação, que posteriormente provocarão outras indentações, caracterizando o micromecanismo de indentações múltiplas. Este comportamento é mostrado nas microscopias eletrônicas da Figura 12.

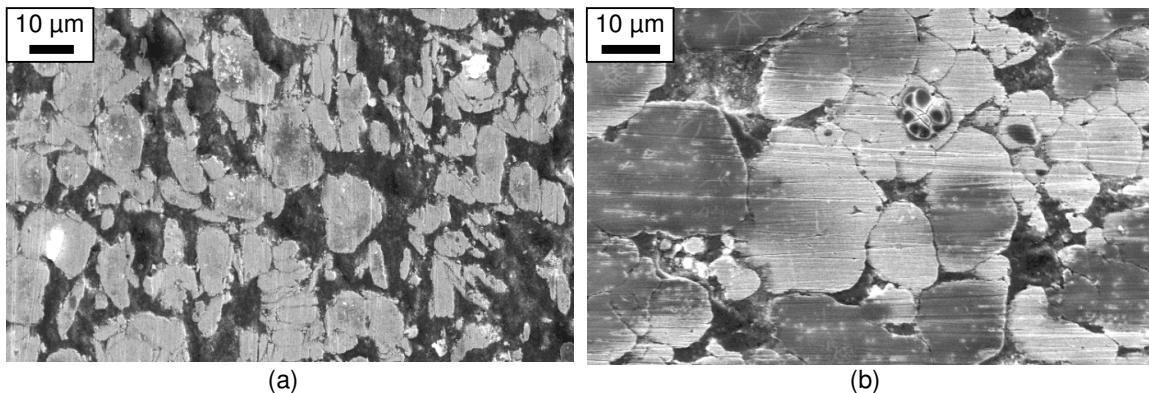


Figura 12 - Mecanismo duplo de desgaste provocado por lama abrasiva de Fe_2O_3 na matriz "4-Cu" (a) e "16" (b).

A severidade de desgaste pode ser considerada pela relação entre a dureza do abrasivo e a dureza do compósito, que é relacionada com o coeficiente de desgaste na Figura 13. Onde é representado coeficiente de desgaste encontra-se próximo de $1 \cdot E^{-3}$ (escala logarítmica) para relações H_a/H_c entre 2 e 4, já para relações maiores, ente 6 e 9, o coeficiente fica próximo de $1 \cdot E^{-2}$. Em ambos os

casos o desgaste é considerado severo, pois apresentam relação H_a/H_c superior à 1,5.⁽⁶⁾

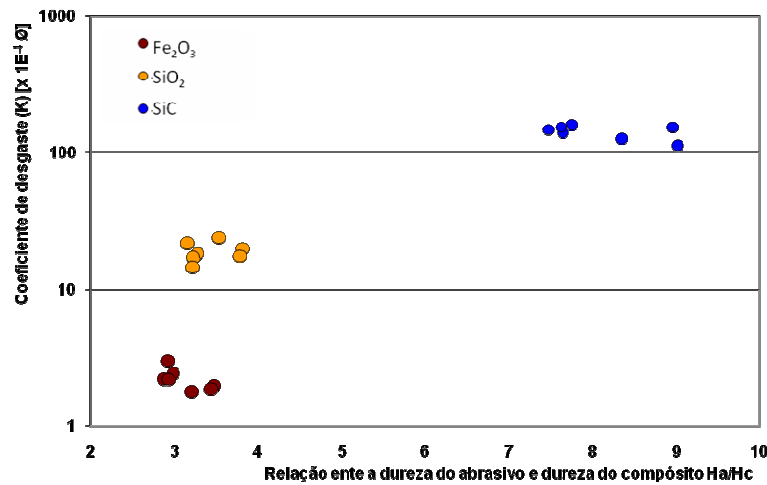
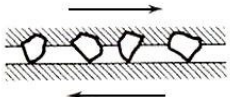
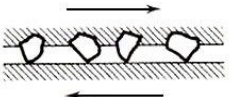
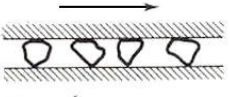


Figura 13 - Comparação do coeficiente de desgaste adimensional e a relação entre a dureza do abrasivo e do compósito.

A Tabela 3 correlaciona as situações que apresentaram menores coeficientes de desgaste, lama abrasiva de SiO_2 e Fe_2O_3 , com os micromecanismos de desgaste predominantes de riscamentos e relações H_a/H_c aproximadamente 3, enquanto para esta relação próxima de 7, os micromecanismos de desgaste predominantes associados são múltiplas indentações e os coeficientes de desgaste são, em média, uma ordem de grandeza maior. Ela também mostra quantas vezes um dado sistema com determinada lama abrasiva foi mais severo que outro.

Tabela 3 - Relação entre os k , dureza média dos abrasivos, relação H_a/H_c , mecanismos predominantes de desgaste e ordem de grandeza do coeficiente de desgaste dimensional

Lama abrasiva	Fe_2O_3	SiO_2	SiC
Dureza média do abrasivo	1000 HV	1100 HV	2600 HV
Relação H_a/H_c média	$3,1 \pm 8 \%$	$3,4 \pm 8 \%$	$8,0 \pm 8 \%$
Mecanismos predominantes de desgaste	 Deslizamento	 Deslizamento	 Indentações múltiplas
$K_{Fe_2O_3} / \bar{K}_{...}$	1	0,12	0,02
$K_{SiO_2} / \bar{K}_{...}$	8	1	0,13
$K_{SiC} / \bar{K}_{...}$	66	8	1

4 CONCLUSÕES

Deste trabalho tiram-se as seguintes conclusões:

- a dureza dos compósitos analisados que formam a matriz das coroas de perfuração não foi fator determinante para a resistência ao desgaste abrasivo em escala micrométrica, mesmo sabendo que para as combinações de lama abrasiva de SiC e as matrizes “4” existe uma leve tendência;
- mais uma vez fica evidenciado o caráter sistêmico dos processos de desgaste, visto que a classificação alcançada das matrizes para as três lamas abrasivas são diferentes;
- os mecanismos de desgaste predominantes observados para lamas abrasivas de SiC foi indentações múltiplas e deslizamento de partículas para SiO₂ e Fe₂O₃;
- foi observada a presença de mecanismos duplos de desgaste para a lama abrasiva de hematita, onde as partículas encontradas na interface provocam simultaneamente deslizamento na presença de uma fase macia do corpo e indentações múltiplas quando a fase é dura, perfeitamente isoladas;
- as lamas abrasivas utilizadas provocaram severidades de desgaste com variações de, aproximadamente, três ordens de grandeza para o coeficiente de desgaste;
- mais uma vez a técnica de microabrasão se mostrou de extrema utilidade, rápida e de alta repetitividade, capaz de reproduzir parte do processo de deterioração superficial real das coroas de perfuração, objeto de pesquisa deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 DWAN, J. D. - **Manufacture of Diamond Impregnated Metal Matrixes** - Materials Science and Technology, v. 14, pp. 896-900, 1998.
- 2 RANDALL, M. G. - Sintering Theory and Practice. - NY, John Wiley & Sons. 1996. 550p.
- 3 RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS I. M. - **Theory and Application of a Micro-Scale Abrasive Wear Test**. - Journal of Testing and Evaluation, A. 2, v. 25, pp. 250-260, march, 1997.
- 4 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, pp. 205-214, 1999.
- 5 UPADHYAYA, G. S.; SRIKANTH, V. - **Effect of Tungsten Particle Size on Sinterized Properties of Heavy Alloys** - POWDER TECHNOLOGY - v. 39, pp. 61-67, 1984.
- 6 ZUM GAHR, K.H. – **Microstructure and Wear of Materials** – Elsevier, pp. 94, 1987.