

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO EM ENSAIOS DE MICROABRASÃO DE UMA SUPERLIGA DE COBALTO*

Flávio Parreiras Marques¹
Antônio César Bozzi²
Cherlio Scandian³
André Paulo Tschiptschin⁴

Resumo

A microabrasão é uma técnica para produzir desgaste abrasivo em escala micrométrica. Neste trabalho estudamos uma liga fundida de cobalto com composição química próxima à da superliga comercial Stellite 6 com composição eutética sendo a matriz constituída por uma solução sólida de cobalto, cromo e molibdênio que embebe uma grande quantidade carbonetos eutéticos de cromo. O objetivo deste estudo é avaliar a resistência ao desgaste bem como os micromecanismos dominantes através de ensaios de microabrasão. Foram usados três diferentes tipos de lama abrasiva, sílica, alumina e carbeto de silício com uma concentração de 0,1 g/cm³, carga de 0,3 N e uma distância deslizada de 48 metros. O menor coeficiente de desgaste foi obtido com sílica e o maior com carbeto de silício. O micromecanismo dominante foi o riscamento com riscos em toda superfície da amostra e presença de indentações apenas na matriz.

Palavras-chave: Microabrasão; Super liga; Cobalto.

ANALYSIS OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOR IN MICRO-ABRASION TEST OF COBALT SUPERALLOY

Abstract

Micro-abrasion is a technique to produce abrasive wear in micro-scale. In this study of the tribological behavior of cast cobalt alloy with similar chemical composition to Stellite 6 was analyzed. The alloy has a microstructure close to the eutectic composition with a matrix consisting of a solid solution of cobalt, chromium and molybdenum and a large amount of eutectic chromium carbides. The objective of this Micro-scale abrasion testing was carried out using three 0,1 g/cm³ slurries composed by SiO₂, Al₂O₃, and SiC particles, in suspension in distilled water. The applied load was 0.3 N, the rotational speed 20 rpm and the total sliding distance 48 m. The test carried out with SiO₂ showed the smallest wear rate. On the other hand, SiC showed the highest wear rate. The dominating wear micromechanism observed in all tests was two-body abrasion (grooving wear) with some indentations only in the matrix.

Keywords: Micro-scale abrasion; Superalloy; Cobalt.

¹ Engenheiro Mecânico, Doutorando em Eng. Metalúrgica, Poli, USP, Vitória, ES, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Doutor em Metalurgia, Professor Doutor, UFES, Vitória, ES, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Doutor em Metalurgia, Professor Doutor, UFES, Vitória, ES, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Doutor em Metalurgia, Professor Doutor, USP, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A microabrasão é uma técnica utilizada para produzir desgaste abrasivo em escala micrométrica. O teste de microabrasão vem sendo utilizado para avaliar a resistência ao desgaste, assim como estudar os micromecanismos operantes, tanto em materiais duros quanto em materiais macios [1]. Na microabrasão o entendimento dos mecanismos que levam ao desgaste dos materiais, assim como a influência das condições às quais o material está submetido é objetivo de estudo de muitos pesquisadores [1-3]. Estas condições, tais como tipo e concentração de abrasivo, carga aplicada e material, entre outros, compõem o tribosistema. Na literatura encontramos evidências de que a resistência ao desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, mas uma resposta específica do material em um determinado tribosistema [4]. Na microabrasão, o desgaste é produzido a partir da rotação de uma esfera de raio (R) sobre uma amostra fixa, tendo como meio entre elas uma lama contendo pequenas partículas abrasivas. A geometria da calota de desgaste formada sobre a amostra deverá ser a reprodução da geometria do contra-corpo esférico. Em materiais homogêneos e não revestidos, o volume de desgaste (V) pode ser calculado em função da distância total de deslizamento (S) e da força normal sobre o contato (N). Este modelo simples de desgaste abrasivo equivale à equação 1 de Archard para desgaste por deslizamento [1,5]

$$V = k \times S \times N \quad (1)$$

Onde: k é o 'coeficiente de desgaste' que possui a unidade $\text{mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$; a resistência ao desgaste abrasivo é o inverso de coeficiente definida como " k^{-1} ".

A utilidade do coeficiente de desgaste como medida da resposta do material ao desgaste abrasivo é, dessa forma, limitada a situações nas quais o volume de desgaste é diretamente proporcional à carga e à distância de deslizamento [1,5]

Em uma impressão de desgaste de geometria esférica feita sobre uma amostra inicialmente plana e não revestida, o volume de desgaste (V) pode ser calculado a partir das dimensões da cratera (dados pelo diâmetro de sua circunferência superficial " b ", ou profundidade " h ") de acordo com as equações 2 e 3:

$$V \approx \frac{\pi \times b^2}{64 \times R} \quad \text{para } b \ll R \quad (2)$$

$$V \approx \pi \times h^2 \times R \quad \text{para } h \ll R \quad (3)$$

Para a realização dos ensaios de microabrasão pode-se usar equipamentos com duas configurações, o de esfera livre, as vezes chamado de "calowear" e o de esfera fixa.

Trezona e Hutchings [5] utilizando um tribômetro com configuração de esfera fixa estudaram a influência dos parâmetros de ensaio sobre o mecanismo de desgaste resultante. Para isso eles realizaram ensaios usando uma esfera de aço martensítico com 25,40 mm de diâmetro e com uma dureza de 990 ± 40 HV, sobre amostras de aço ferramenta. Todas as amostras foram temperadas e revenidas com a dureza final de 775 ± 10 HV. Foram usados três abrasivos de natureza diferentes: SiC, Al_2O_3 e diamante. Estas partículas foram misturadas em água destilada, para formar suspensões em concentrações que variaram de 0,0001 até 1,0 g de abrasivo por centímetro cúbico de água. Foi também analisado o efeito da força normal, sendo

esta variada de 0,1 até 5,0 N. Estes autores concluíram em seus experimentos que a medida que se aumentavam as cargas e diminuíam as concentrações o mecanismo de desgaste predominante era o desgaste abrasivo a dois corpos. Este tipo de interação acontece quando uma quantidade significativa de partículas ficou engastada na superfície da esfera e agiu como indentador fixo, produzindo uma série de riscos finos e paralelos sobre a superfície. A correspondência do tamanho do risco com o tamanho do abrasivo indica que estes eram formados pela ação das partículas abrasivas e não devido a ação das asperezas da esfera [5]. No entanto nas condições com baixas cargas e altas concentrações de abrasivo, o mecanismo dominante é desgaste abrasivo a três corpos, nestas condições as partículas abrasivas não ficam engastadas na esfera e rolam entre as duas superfícies produzindo deformação generalizada na superfície da amostra sem apresentar nenhuma direção preferencial.

A figura 1 mostra o aspecto típico das duas superfícies desgastadas usando a mesma carga (0,25 N) e lamas abrasivas diferentes produzindo na figura 1a o mecanismo de desgaste abrasivo a dois corpos e na figura 1b o desgaste abrasivo a três corpos.

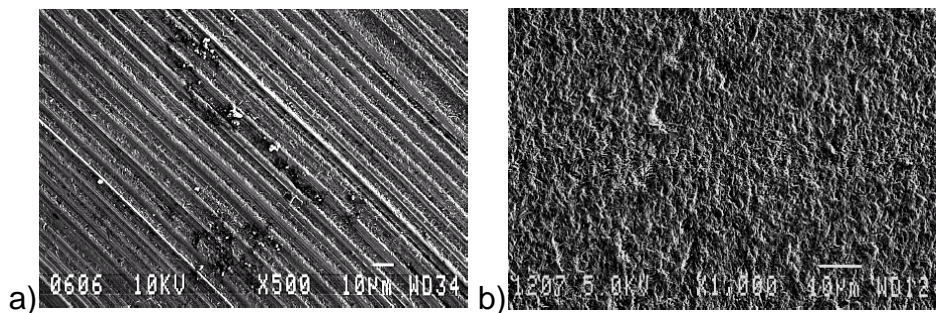


Figura 1 Amostra de aço ferramenta temperado e revenido, desgaste produzido por microabrasão. a) Desgaste por riscamento - Abrasivo: diamante (3 μm), carga 0,25 N e fração volumétrica de 0,0009 b) Desgaste por rolamento - Abrasivo SiC (4,25 μm), carga de 0,25 N e fração volumétrica de 0,237 [5].

A figura 1a mostra uma superfície desgastada quando se usa baixas concentrações de abrasivo. A força normal no ensaio foi de 0,25 N, e a fração volumétrica do abrasivo (Diamante) igual a 0,0009 (concentração 0,003 g/cm^3). A amostra apresentou riscos paralelos na mesma direção do movimento entre as superfícies

A figura 1b mostra a superfície desgastada quando se usa altas concentrações de abrasivo [5]. A força normal no ensaio foi de 0,25 N, e a fração volumétrica do abrasivo (SiC) igual a 0,237 (concentração 1,0 g/cm^3). Nesta condição a amostra apresentou uma grande quantidade de indentações causadas pelo rolamento dos abrasivos sobre a superfície. Esse tipo de interação física é característico do desgaste a três-corpos, que não permite diferenciar a direção do movimento sobre a superfície [5].

A carga e/ou concentração do abrasivo intermediária leva à formação, em algumas crateras de desgaste, de uma característica mista, onde se observa riscos na região central da cratera e indentações na região periférica da cratera [5].

No trabalho de Trezona e Hutchings [5], os autores também discutem sobre a classificação da abrasão em dois e três corpos e apresentam uma nova classificação para o desgaste abrasivo em dois tipos: 'desgaste abrasivo por riscamento' e 'desgaste abrasivo por rolamento'. No desgaste abrasivo por riscamento, a partícula abrasiva adere ao contra-corpo e desliza sobre a superfície desgastada como uma aspereza dura, provocando riscos paralelos e na mesma

direção do movimento relativo entre as superfícies. No desgaste abrasivo por rolamento, a partícula abrasiva rola sobre a superfície provocando um alto nível de deformação plástica, identificado pelo mecanismo de indentação múltipla. Neste último tipo, a superfície apresenta pouca ou nenhuma evidência de direção [5].

Outra condição muito importante e que merece destaque é a superfície da esfera; a rugosidade da superfície da esfera influencia significativamente a repetitividade e reprodutibilidade na determinação do coeficiente de desgaste. Este efeito é explicado pelo modo como o abrasivo é conduzido pela esfera para dentro da calota desgastada, ficando evidenciado que uma superfície mais rugosa da esfera facilita o engaste do abrasivo que tende a produzir um desgaste por riscamento enquanto uma superfície menos rugosa ou polida dificulta a retenção do abrasivo e desta forma facilita o desgaste por rolamento [6-7].

Entre os materiais com elevada resistência ao desgaste estão as superligas; a resistência ao desgaste destas ligas é muito conhecida e bem reportada pela literatura. Todavia o desgaste causado por pequenas partículas abrasivas destas ligas ainda não foi muito estudado proporcionalmente ao dano causado por este tipo de desgaste. Existem superligas à base de cobalto, níquel e ferro-níquel projetadas para trabalhar tanto na temperatura ambiente como em temperaturas superiores a 540°C.

Para este trabalho utilizou-se uma liga fundida com composição química próxima à da liga comercial à base de cobalto, conhecida com Stellite 6, por ser reportada como uma liga com alta resistência ao desgaste. O cobalto puro possui estrutura hexagonal compacta (HC) na temperatura ambiente mas sofre transformação alotrópica a 422°C para uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). Por sua vez elementos de liga como ferro, manganês, níquel e carbono tendem a estabilizar a estrutura CFC e aumentar a energia de falha de empilhamento (EDE); por outro lado elementos como cromo, molibdênio, tungstênio e silício tendem a estabilizar a estrutura HC e diminuir a energia de falha de empilhamento (EDE) [8].

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência ao desgaste microabrasivo de uma liga de cobalto, e compreender os mecanismos de desgaste operantes para diferentes tipos de abrasivos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material fundido foi cortado para se obter amostras com as dimensões aproximadas de 20*25*10mm para os ensaios de microabrasão e caracterização. Todas as amostras foram lixadas em lixas # 200, #500, #800 e #1200 e logo após polidas com pasta de diamante de 6, 3 e 1 µm.

A composição do material foi obtida pelo processo de via úmida e será apresentado posteriormente.

A caracterização metalográfica da liga foi feita em microscópio ótico e eletrônico de varredura. As amostras foram atacadas com uma solução de 100 mL HCl e 5 mL H₂O₂ - 30% por 10 segundos.

Ensaio de dureza Vickers foram realizados nas amostras afim de se obter a dureza macro bem como a dureza da matriz e dos carbonetos. Para obter-se a dureza macro do material foi utilizado a carga de 10 Kgf e para a micro dureza da matriz e dos carbonetos foi utilizado a carga de 50 gf.

Os ensaios de desgaste por microabrasão foram realizados em um tribômetro marca Plint modelo Te 66, modelo de esfera fixa semelhante ao desenho esquemático da figura 2.

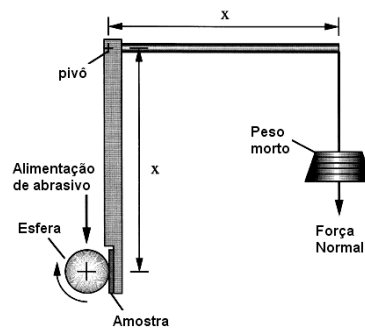


Figura 2: Esquema de um tribômetro do tipo esfera fixa. Desenho adaptado de Trezona [5].

Os abrasivos utilizados nos ensaios foram, sílica (SiO_2) com 80% das partículas variando de 1 a 5 μm , alumina (Al_2O_3) com tamanho médio de 5 μm , ambos fabricados pela “Sigma Aldrich” e carbeto de silício (SiC), com tamanho médio de 3,5 μm .

No ensaio de microabrasão foi utilizada uma esfera de aço martensítico AISI 52100, tendo sido sua superfície condicionada antes do início de cada teste. Para o condicionamento a esfera foi colocada dentro de um pequeno pote com água destilada e 20 gramas de Areia Normal Brasileira NBR-7214, o pote foi vigorosamente agitado durante 5 minutos, após esta operação a esfera foi lavada e colocada no ultrassom por 5 minutos imersa em álcool etílico. Desta forma, garantimos a limpeza completa da superfície da esfera, bem como padronizamos a rugosidade superficial a fim de garantir a mesma condição para cada ensaio.

Para evitar os efeitos hidrodinâmicos entre a esfera e a amostra, a velocidade angular foi fixada em 20 rpm. A carga aplicada durante o ensaio foi de 0,3 N para evitar a formação indesejada de “ridges” (finas bandas de material no interior da cratera que não sofreram abrasão e podem se formar em condições de baixa concentração e altas cargas [4]). A lama abrasiva foi preparada com água destilada na proporção de 0,1 g/cm^3 de suspensão. As frações volumétricas foram: 0,04 para SiO_2 , 0,03 para Al_2O_3 , 0,025 para SiC , respectivamente. A lama foi alimentada com uma taxa 25 gotas/min.

Foram realizados 03 ensaios para cada condição; cada ensaio foi conduzido até 600 revoluções da esfera que corresponde a uma distância deslizada de aproximadamente 48 metros. O ensaio era interrompido a cada 40 rotações (3,2 metros) para cálculo do coeficiente de desgaste e observação da evolução do mesmo até atingir o regime permanente. O alcance do regime permanente foi determinado quando o erro relativo entre as últimas quatro medições do coeficiente de desgaste foi menor que 7%. Em todos os ensaios esta condição foi atingida.

As medições do diâmetro da calota de desgaste, durante o teste, foram feitas em um microscópio ótico acoplado ao equipamento. Posteriormente, as análises das calotas e dos mecanismos de desgaste foram realizados nos microscópio ótico e eletrônico de varredura e em um perfilômetro marca Taylor Robson modelo Talysurf CLI 1000.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do Material e dos Abrasivos

A figura 3 mostra a morfologia e forma dos abrasivos. Observa-se que a sílica tem o menor tamanho médio e formas arredondadas enquanto a alumina possui o maior tamanho médio e aresta mais pronunciadas. O carbeto de silício embora tenha um

tamanho intermediário é o abrasivo que possui arestas mais pronunciadas e cortantes.

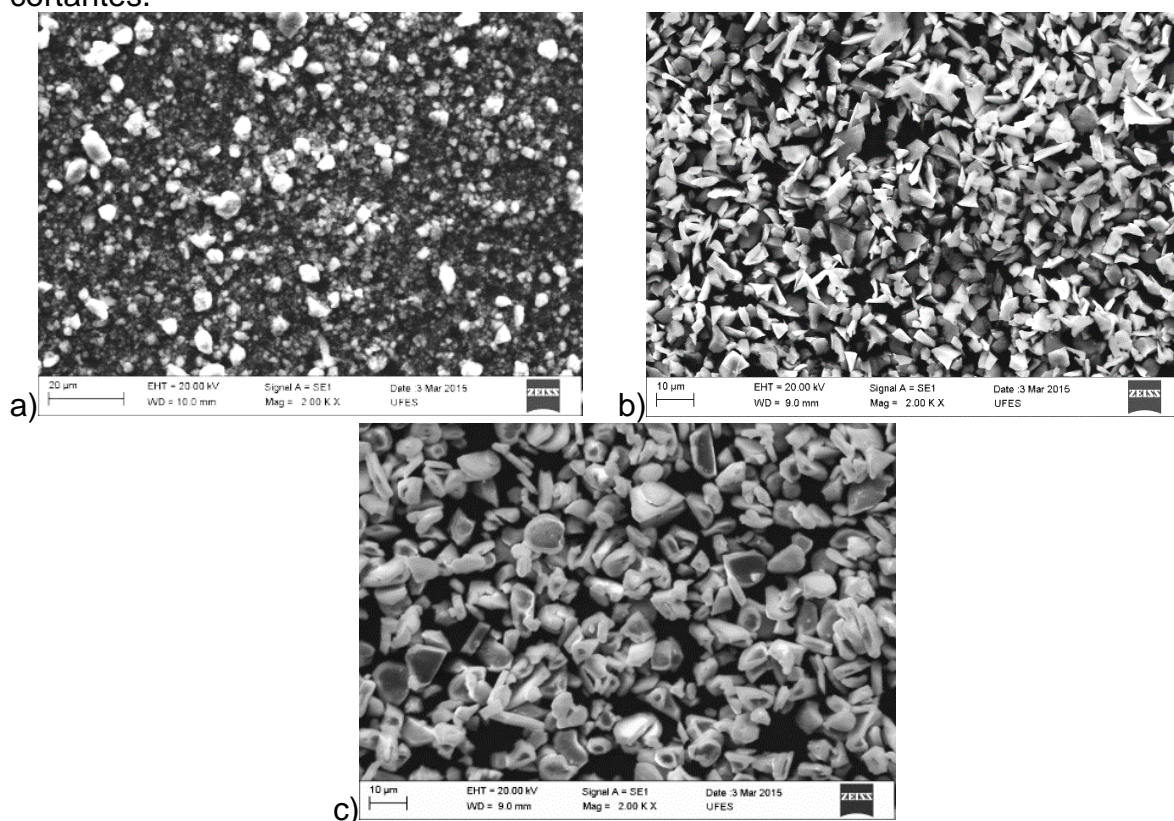


Figura 3 Micrografia mostrando a morfologia e granulometria dos abrasivos. MEV – Imagens de elétrons secundários. a) SiO₂, b) SiC e c) Al₂O₃.

A composição química da liga fundida, semelhante à da liga comercial Stellite 6, é apresentada na Tabela 1. Nota-se que o teor de carbono é maior que o da liga comercial (1,2% em peso) e o teor de cromo menor (29% em peso).

A liga apresenta uma microestrutura próxima à da composição eutética e tem uma matriz constituída por uma solução sólida de cobalto, cromo e molibdênio além de uma grande quantidade carbonetos eutéticos de cromo, como se vê na figura 4.

Tabela 1 Composição química da liga de cobalto fundida e da liga Stellite 6 (% em peso).

	Co	C	Cr	W	Fe	Mo	Si
Liga fundida	64,16	2,29	24,24	4,2	0,65	0,02	1,25
Stellite 6	Balanço	0,9-1,4	27-32	4-6	-	-	-

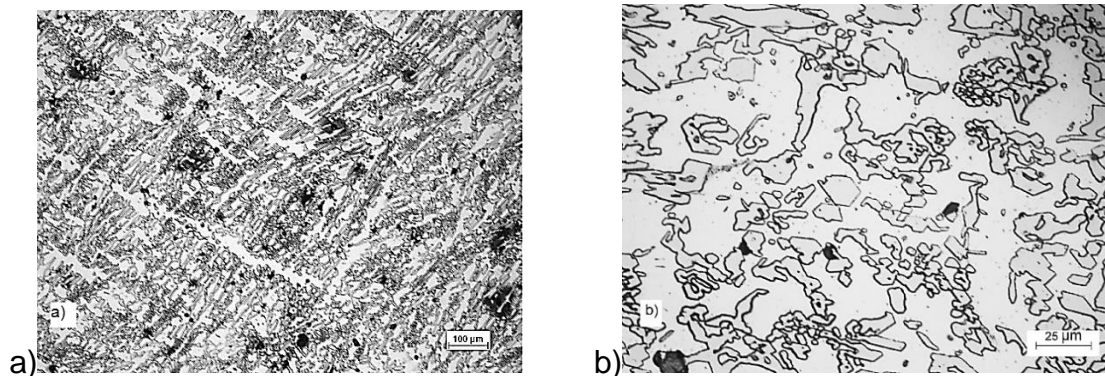


Figura 4 – Micrografia ótica da amostra fundida. a) Micrografia destacando a grande fração volumétrica de carbonetos, b) Zoon na região central da figura “4a”.

Nota-se grande presença de carbonetos, maior que o esperado para o Stellite 6. Tal aumento na fração volumétrica destes carbonetos é devido à maior concentração de carbono presente na amostra que é de 2,3 % em peso, quando comparado com a composição do Stellite 6 que é de 1,2% em peso.

A tabela 2 mostra a dureza Vickers do material. Destaca-se a grande diferença de microdureza da matriz e dos carbonetos.

Tabela 2. Tabela de durezas Vickers.

Liga fundida	Dureza HV	Desvio Padrão	Carga
Dureza macro	452	5	10 Kgf
Dureza Carbonetos	1220	20	50 gf
Dureza matriz	342	4	50 gf

3.2 Volume Removido e Determinação do Coeficiente de Desgaste.

O volume de desgaste de todos os ensaios foi proporcional à distância deslizada como se vê na figura 5. O fato de as três curvas apresentarem uma boa linearidade indica que a equação de Archard usada para calcular o coeficiente de desgaste é válida para as três curvas. Na figura 5 foi plotado no eixo “x” o produto da distância deslizada pela carga normal (0,3 N) e no eixo “y” o volume desgastado em mm^3 ; portanto a inclinação da reta é o próprio coeficiente de desgaste. O menor coeficiente de desgaste foi encontrado quando utilizou-se o abrasivo sílica, seguido pela alumina e por último pelo carbeto de silício. Sabe-se que a dureza destes abrasivos segue a mesma sequência sendo a sílica o que apresenta a menor dureza e o carbeto de silício o que apresenta a maior dureza.

Embora existam poucos trabalhos que relacionem estes materiais com microabrasão, Sun [9] estudando uma liga CoCrMo usada para bioimplantes e com algumas condições semelhantes ao nosso tribossistema, conclui que o coeficiente de desgaste decresce quando os abrasivos são menores e mais macios o que está de acordo com os resultados obtidos neste estudo.

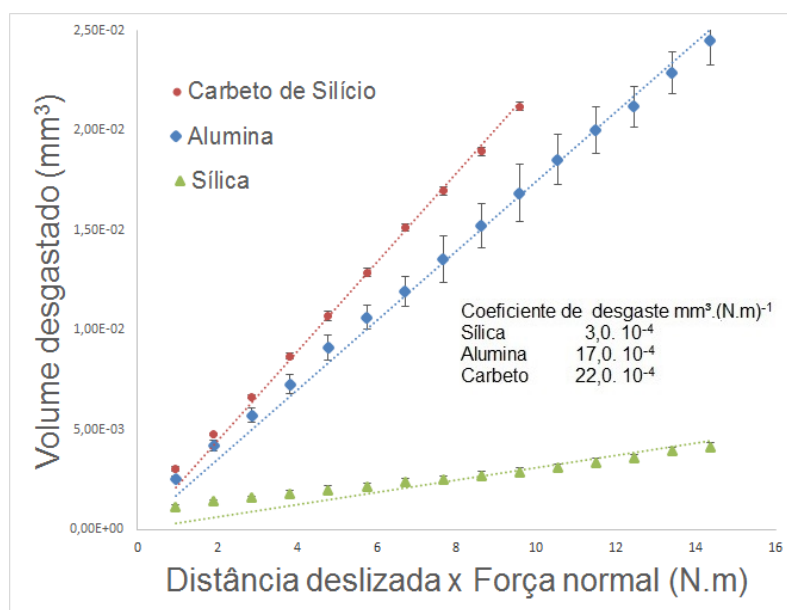


Figura 5 Gráfico do comportamento em desgaste da Superliga.

3.3 Mecanismos de Desgaste

Em todos os ensaios o mecanismo de desgaste dominante foi o riscamento. Observa-se na figura 6 que as calotas reproduzem a forma circular do contra corpo bem como o perfil de desgaste do centro da calota na direção perpendicular ao deslizamento mostrando que a rugosidade dentro das calotas é maior quando se usou a alumina que possui o maior tamanho, já a calota desgastada pelo carbeto de silício que possui arestas mais pronunciadas e cortantes produziu uma superfície desgastada com menor rugosidade.

As imagens da figura 7, obtidas com maiores aumentos, mostram que na matriz das amostras o mecanismo de desgaste predominante é o riscamento, embora estas regiões apresentaram além do riscamento, muitas indentações. Nos carbonetos fica nítido que existe pouca ou nenhuma indentação.

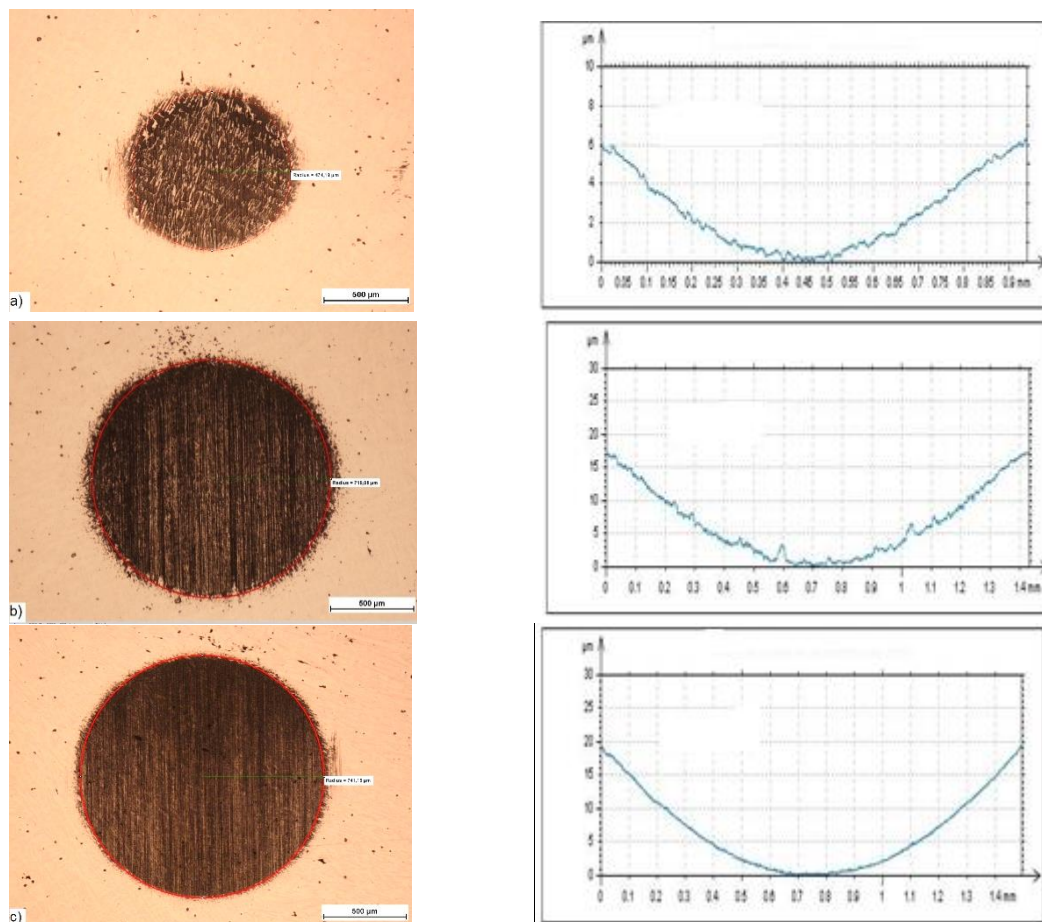


Figura 6 Micrografia ótica da superfície desgastada após o ensaio e do perfil na linha média da calota. a) desgaste com SiO₂, b) desgaste com Al₂O₃ c) desgaste com SiC.

Na amostra desgastada com sílica nota-se que em alguns casos o abrasivo, que é pequeno, mais arredondado e que possui menor dureza entre os demais abrasivos usados, não consegue penetrar no carboneto e muda de direção como se vê em destaque na figura 7 a). Sun [10] em sua pesquisa com CoCrMo usando carbeto de silício e alumina como abrasivos e com fração volumétrica de 0,03 encontrou mecanismos de desgaste com predominância de riscamento, classificado em seu estudo como “grooving”. Tais mecanismos são semelhantes ao encontrado neste

estudo com frações volumétricas de 0,03 para alumina e 0,025 para o carbeto de silício.

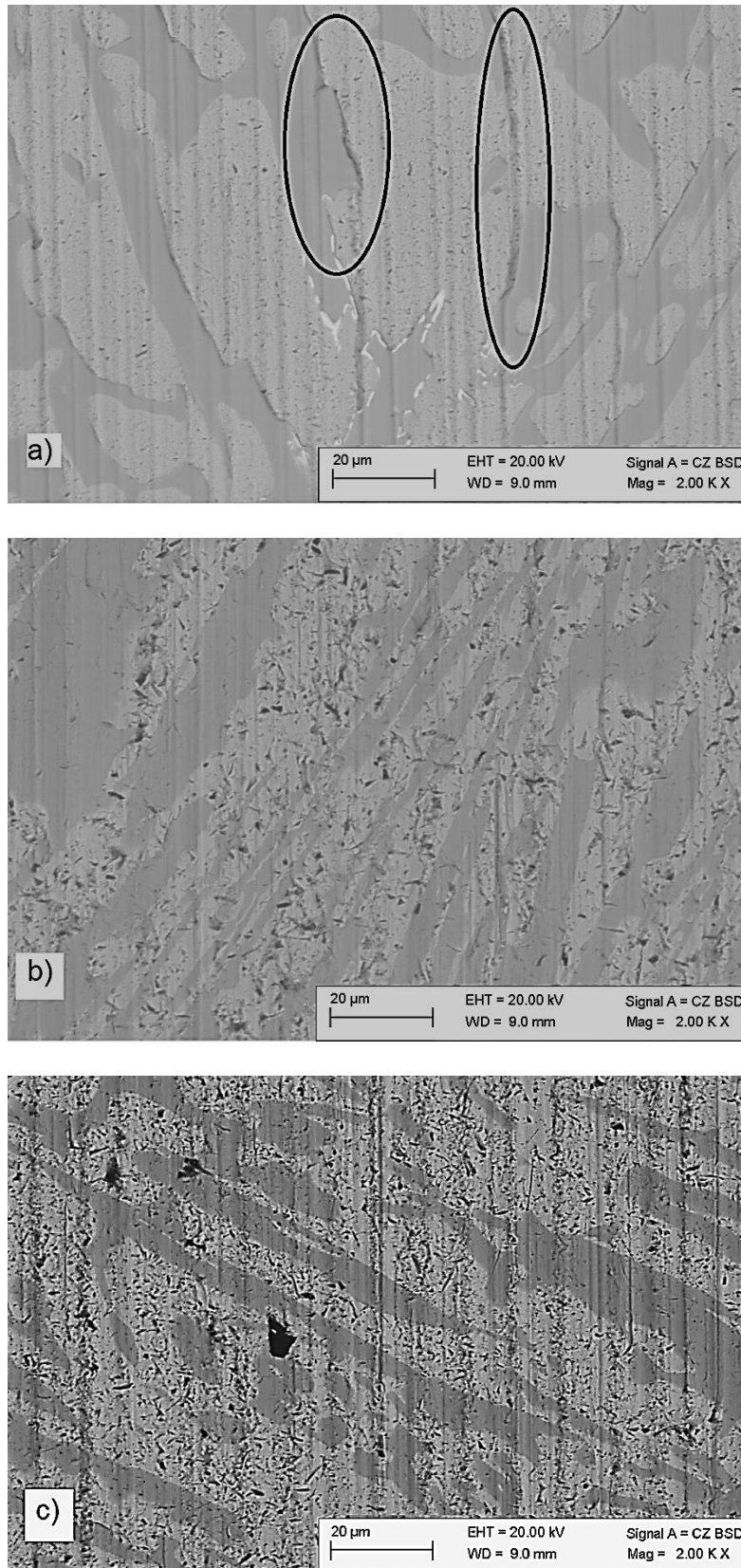


Figura 7 Micrografia da superfície desgastada da amostra. MEV – Imagens de elétrons retroespalhados. a) desgaste com sílica, b) desgaste com alumina, c) desgaste com carbeto de silício.

4 CONCLUSÕES

A equação de Archard se aplica muito bem às condições deste teste visto o bom ajuste de um gráfico linear aos resultados de variação de “Volume” versus “Distância.Força”.

O cálculo do volume desgastado, utilizando a fórmula apresentada, se mostrou válido, tendo em vista a boa formação das calotas, confirmada na perfilometria.

O volume removido e o coeficiente de desgaste para a alumina e o carbeto de silício foram respectivamente 6 e 7 vezes maiores, quando comparado com a sílica.

O coeficiente de desgaste foi diretamente proporcional à dureza do abrasivo usado, sendo que a amostra desgastada com sílica apresentou o menor coeficiente de desgaste e a amostra desgastada com carbeto de silício foi a que apresentou o maior coeficiente de desgaste.

O mecanismo de desgaste da amostra de Stellite 6 foi predominantemente por riscamento, indiferente do abrasivo usado, embora seja nítida a mudança no padrão de desgaste da matriz para o carboneto.

A matriz apresentou indentações além dos riscos, já os carbonetos apresentaram pouca ou nenhuma indentação.

A amostra desgastada pela sílica apresentou mudança na direção dos riscos quando estes se deparavam com os carbonetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes pelo apoio e as Instituições USP, UFES e IFES que disponibilizaram seus equipamentos e apoio técnico para conclusão deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Rutherford , KI, Hutchings IM. - Theory and application of a micro-Scale abrasive wear test. - Journal of Testing and Evaluation, march, 1997;JTEVA, A. 2, v. 25: 250-260.
- 2 Adachi K, Hutchings IM. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion teste to conditions and material hardness. Wear. 2005; 258: 318-321.
- 3 Marques F, Silva WM, Pardal J.M, Tavares SSM, Scandian C. - Influence of heats treatments on the micro-abrasion wear resistance of a superduplex stainless steel. – Wear. 2011; 271: 1288-1294
- 4 Shipway PH, Hodge CJB. – Microabrasion of glass – the critical role of ridge formation. – Wear. 2000; 237: 90:97.
- 5 Trezona R.I.; Allsopp DN, Hutchings IM. – Transitions between two-body abrasive wear: influence of test conditions in the micro-scale abrasive wear test. – Wear. 1999; 225-229: 205-214
- 6 Allsopp DN, Trezona RI, Hutching IM. The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test.- Tribology letters. 1998; 5: 259-264.
- 7 Gant AJ, Gee MG. A review of micro-scale abrasion testing – Jounal of physics. 2011; 44.
- 8 Sims CT, Hagel WC. The superalloys. John Wiley e Sons. 1972: 145-174
- 9 Sun D, Wharton JA, Wood RJK. Micro-abrasion-corrosion of cast CoCrMo Effects of micro and sub-micron sized abrasives. – Wear. 2009: 267: 52-60.
- 10 Sun D, Wharton JA, Wood RJK. Micro-abrasion mechanism of cast CoCrMo in simulated body fluids.