



UFES – UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CT – CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ MENEGAZ LOZZER

**MICROABRASÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA
A BASE DE TUNGSTÊNIO EMPREGADOS EM COROAS DE
PERFURAÇÃO UTILIZADAS EM SONDAÇÃO MINERAL**

VITÓRIA
2008

ANDRÉ MENEGAZ LOZZER

**MICROABRASÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA
A BASE DE TUNGSTÊNIO EMPREGADOS EM COROAS DE
PERFURAÇÃO UTILIZADAS EM SONDAÇÃO MINERAL**

Dissertação apresentada com parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela da Universidade Federal do Espírito Santo, área de concentração: tribologia.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian

Co-orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

VITÓRIA

2008

ANDRÉ MENEGAZ LOZZER

**MICROABRASÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA
A BASE DE TUNGSTÊNIO EMPREGADOS EM COROAS DE
PERFURAÇÃO UTILIZADAS EM SONDAÇÃO MINERAL**

Dissertação apresentada com parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela da Universidade Federal do Espírito Santo, área de concentração: tribologia.

Entregue em 22 de Dezembro de 2005.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. Cherlio Scandian - Orientador
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo**

**Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello – Co-orientador
UFU – Universidade Federal de Uberlândia**

**Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo – Membro interno
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo**

**Prof. Dr. Roberto Martins de Souza – Membro externo
USP – Universidade de São Paulo**

**VITÓRIA
2008**

- i -

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz Alberto Lozzer e Marisa Rodrigues Menegaz,
Minhas irmãs, Melissa e Gisele Menegaz Lozzer,
Uma pessoa muito especial, Priscila Lopes Renon,
E demais familiares.

AGRADECIMENTOS

Os avanços seriam muito mais difíceis e cansativos se a cada geração as coisas tivessem que ser novamente descobertas. Isso impossibilitaria vivermos com maior conforto e em melhores condições.

Os responsáveis pelos enormes avanços não são as pessoas que após uma considerável experiência técnica e de vida se tornam grandes sábios, e sim aqueles que, além disso, se dedicam aos ensinamentos de qualidade, fazendo com que seu “know how” reduza a inércia dos iniciantes, sendo capazes de estimular e cativá-los.

Sem dúvida tenho uma enorme gratidão àqueles que, intuitivamente ou profissionalmente, desempenharam este papel no meu contínuo processo de formação.

Como reconheço que não só a academia é responsável pela formação de um indivíduo, agradeço, também, aos que me sobrecarregando de tarefas, levando-me ao máximo ou até além. E mais, os que reconheceram os trabalhos realizados com competência e qualidade e os que criticaram, de maneira construtiva, as tarefas mal feitas ainda têm minha admiração.

Em específico:

- Professores Dr. Cherlio Scandian e José Daniel Biasoli de Mello pelas competentes orientações e discussões técnico-científicas deste trabalho;
- Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo por toda colaboração;
- PPGEM pela oportunidade e motivação e secretária Maria José Soares do Santos pelo carinho e suporte;
- LTM pela excelente estrutura e secretária Eunice Helena Nogueira pelo suporte;
- Amigos e colegas do PPGEM e LTM pelas contribuições diretas e indiretas;
- GEOSOL – Geologia e Sondagens LTDA. pelo apoio financeiro e logístico;
- CAPES e PROCAD n.º 0335053 pelo apoio financeiro.

RESUMO

Na sondagem mineral testemunhada é importante que a coroa de perfuração seja criteriosamente desgastada permitindo que o corte seja realizado na litologia. Este trabalho objetiva uma avaliação do desgaste nas matrizes dos compósitos utilizados para a confecção das brocas de perfuração, formadas por um esqueleto de pós de tungstênio unidos por uma liga metálica infiltrante, utilizadas nessas coroas através do ensaio de microabrasão de esfera livre (tipo calowear) com lamas abrasivas de Fe_2O_3 , SiC e SiO_2 . Relacionar os resultados com a dureza do material, granulometria e composição dos pós metálicos, além de confrontar micromecanismos atuantes a fim de construir um mapa de desgaste específico. Foram efetuados, também, ensaio de dureza Vickers além de interferometria a laser e análise dos mecanismos de desgaste via microscopia eletrônica de varredura. Foi constatado que a dureza dos compósitos não é fator determinante para a resistência ao desgaste e evidenciado o caráter sistêmico dos processos de desgaste. Os mecanismos encontrados foram de deslizamento, indentações múltiplas, além da ocorrência de ambos simultaneamente, porém, separados.

ABSTRACT

It is important in rock core drilling for the diamond bit crown to be meticulously worn such that the cut is performed on the lithology. The objective of this work is to evaluate wear on composite matrix alloys used in perforation drill bits, produced from a tungsten powder skeleton held by an infiltrating metal alloy. Wear is evaluated through free ball micro-abrasion testing (Calowear), using abrasive slurry of Fe_2O_3 , SiC, and SiO_2 . This work presents the relation between material hardness, tungsten mean size and composition of the metal powder, besides confronting acting micromechanisms in order to construct a specific wear map. Were also performed Vickers hardness, laser interferometry, and scanning electronic microscopic analysis of the wear mechanisms. It was found that composites hardness is not a determinant factor for wear resistance, as well as became evident the systemic character of the wear processes. Were found mechanisms of sliding, multiple indentation, besides the simultaneous, though dissociate, occurrence of both.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. SONDAGEM MINERAL DIAMANTADA	3
2.1.1. Coroa impregnada de diamantes	4
2.1.2. Matriz impregnada	5
2.1.3. Matriz metálica	6
2.2. SINTERIZAÇÃO	7
2.2.1. Sinterização com infiltração livre.....	8
2.2.2. Tipos de matrizes metálicas	9
2.2.3. Desgaste das matrizes metálicas.....	12
2.3. MICROABRASÃO.....	12
3. MÉTODOS E EXPERIMENTOS	18
3.1. MATERIAIS ENSAIADOS.....	18
3.2. PREPARAÇÃO DA AMOSTRAS	19
3.3. DETERMINAÇÃO DA DUREZA.....	20
3.4. ENSAIOS DE MICROABRASÃO (TIPO CALOWEAR)	20
3.4.1. Medição da dimensão calota desgastada (b).....	21
3.4.2. Determinação da distância percorrida (S).....	23
3.4.3. Parâmetros do teste de microabrasão.....	24
3.4.4. Coleta do valor da força normal sobre o contato (N)	25
3.4.5. Determinação do regime permanente de desgaste	25
3.5. TOPOGRAFIA SUPERFIAL VIA INTERFEROMETRIA A LASER.....	26
3.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	27
3.7. CÁLCULO DE PERCENTUAL DE FASES	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	29
4.2. DUREZA	30

4.3.	TOPOGRAFIA SUPERFICIAL VIA INTERFEROMETRIA A LASER ...	31
4.3.1.	Calotas de desgaste.....	31
4.3.2.	Contra-corpo	32
4.4.	MICROABRASÃO	33
4.4.1.	Obtenção dos coeficientes de desgaste	33
4.4.2.	Lama abrasiva de SiC	36
4.4.1.	Lama abrasiva de Fe ₂ O ₃	40
4.4.1.	Lama abrasiva de SiO ₂	43
4.4.2.	Discussão geral sobre o desgaste das matrizes.....	47
4.4.3.	Mecanismo duplo de desgaste	48
4.4.4.	Severidade de desgastes para diversas lamas abrasivas.....	50
4.5.	RESULTADOS SUMARIZADOS	52
5.	CONCLUSÕES	54
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obtenção da amostra cilíndrica no processo de sondagem diamantada.....	4
Figura 2 - Elementos estruturais e funcionais de uma coroa impregnada de diamantes.	5
Figura 3 - Preenchimento dos poros durante o processo de infiltração	8
Figura 4 - Mecanismos de desgaste reais de uma broca de perfuração.....	13
Figura 5 - Esquema de funcionamento do equipamento de microabrasão tipo calowear.	14
Figura 6 - Esquema de formação do perfil esférico na amostra, vista frontal (a) e da aparência da calota desgastada, vista superior (b)	15
Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura característica para deslizamento (a) e rolamento de partículas (b).....	16
Figura 8 - Mecanismos de desgaste variando carga e concentração da lama abrasiva de diamante (a), SiC (b) e Al ₂ O ₃ (c) em ensaio de microabrasão.....	16
Figura 9 - Região de onde foram retiradas as amostras (a) e as amostras já devidamente tratadas para os ensaios (b)	19
Figura 10 - Esquema de lixamento para preparação das amostras	19
Figura 11 - Esquema do posicionamento das medições de dureza	20
Figura 12 - Detalhamento do equipamento de microabrasão tipo Calowear	21
Figura 13 - Micrômetro acoplado à luneta (a) e sistema de iluminação da luneta (b)	22
Figura 14 - Posições do micrômetro para medição da dimensão da calota de desgaste	22
Figura 15 - Transmissão de movimento do eixo para a esfera livre	23
Figura 16 - Representação gráfica do regime permanente.....	26
Figura 17 – Interferômetro a laser utilizado para análise topográfica superficial.....	27

Figura 18 - Microscopia eletrônica de varredura para caracterização da matriz "4"	29
Figura 19 - Dureza Vickers das matrizes.....	30
Figura 20 - Topografia superficial da região desgastada com um plano identificando a seção transversal de maior profundidade.	32
Figura 21 - Comparação do perfil da região de desgaste e um semi-esférico ideal.....	32
Figura 22 - Topografia superficial do contra-corpo antes (a) e depois (b) dos ensaios.....	33
Figura 23 - Representação gráfica e de rugosidade do contra-corpo limpo e após os ensaios.....	33
Figura 24 - Curvas do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4" com lama abrasiva de SiC.....	34
Figura 25 - Curvas do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4-SiC" com lama abrasiva de SiO ₂	34
Figura 26 - Curva, com desvio, do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4" com lama abrasiva de SiC.....	35
Figura 27 - Curva, com desvio, do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4-SiC" com lama abrasiva de SiO ₂	35
Figura 28 - Curvas de coeficientes de desgaste para os três abrasivos da matriz "4"	36
Figura 29 - Curvas de coeficientes de desgaste para os três abrasivos da matriz "4-SiC".	36
Figura 30 - Coeficientes de desgaste dimensionais com lama abrasiva de SiC.	37
Figura 31 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiC e dureza do compósito.	38
Figura 32 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiC e tamanho médio dos grãos de tungstênio.	38

Figura 33 - Micromecanismos de desgaste por indentações múltiplas gerados com lama abrasiva de SiC, MEV – Elétrons secundários – Matriz "4-Cu"	39
Figura 34 - Micromecanismos de desgaste por indentações múltiplas gerados com lama abrasiva de SiC, MEV – Elétrons secundários – Matriz "4-SiC"	40
Figura 35 - Coeficientes de desgaste dimensionais com lama abrasiva de Fe ₂ O ₃	41
Figura 36 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de Fe ₂ O ₃ e dureza do compósito.....	42
Figura 37 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de Fe ₂ O ₃ , MEV – Elétrons secundários – Matriz "4-SiC".	42
Figura 38 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de Fe ₂ O ₃ , MEV – Elétrons secundários – Matriz "4-Mo".	43
Figura 39 - Coeficientes de desgaste dimensionais com lama abrasiva de SiO ₂	44
Figura 40 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiO ₂ e dureza do compósito.	45
Figura 41 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiO ₂ e dureza do compósito de tamanho médio de pós de tungstênio 3,5 µm.	45
Figura 42 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de SiO ₂ , MEV – Elétrons secundários – Matriz "16".	46
Figura 43 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de SiO ₂ , MEV – Elétrons secundários – Matriz "4-Fe-SiC".	47
Figura 44 - Mecanismo duplo de desgaste provocado por lama abrasiva de Fe ₂ O ₃ na matriz "4-Cu".	49
Figura 45 - Mecanismo duplo de desgaste provocado por lama abrasiva de Fe ₂ O ₃ na matriz "16".	50

Figura 46 - Comparação do coeficiente de desgaste adimensional e a relação entre a dureza do abrasivo e do compósito.	51
Figura 47 - Dureza e coeficientes de desgaste para as matrizes ensaiadas com lamas abrasivas de SiC, SiO ₂ e Fe ₂ O ₃	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação e composição dos matrizes ensaiadas	18
Tabela 2 – Parâmetros operacionais dos ensaios de microabrasão.....	24
Tabela 3 - Relação entre os coeficientes de desgaste médios, dureza média dos abrasivos, relação H_a/H_c , mecanismos predominantes de desgaste e ordem de grandeza do coeficiente de desgaste dimensional.	52
Tabela 4 - Dados de dureza Vickers e coeficiente de desgaste adimensional para SiC, SiO ₂ e Fe ₂ O ₃	53
Tabela 5 – MEV, elétrons retroespalhado, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de SiC.....	65
Tabela 6 – MEV, elétrons secundário, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de SiC.....	66
Tabela 7 - MEV, elétrons secundário, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de SiO ₂	67
Tabela 8 - MEV, elétrons secundário, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de Fe ₂ O ₃	68

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\varnothing_{\text{esfera}}$ - Diâmetro da esfera livre (Calowear)
- Q - Relação entre o volume desgastado e a distância deslizado
- V - Volume desgastado calculado através de considerações e fórmulas - teórico (amostras)
- S - Distância deslizada pela esfera na amostra
- N - Força normal dinâmica sobre o contato
- b - Diâmetro da calota desgastada (amostras)
- H - Dureza da superfície do material (amostras)
- K - Coeficiente de desgaste adimensional
- R - Raio da esfera (calowear)
- R' - Raio da esfera no ponto de contato com o eixo
- $\varnothing_{\text{eixo}}$ - Diâmetro do eixo motor (calowear)
- S' - Distância percorrida pela esfera sob distância R'
- n_{esfera} - Rotação da esfera livre
- n_{eixo} - Rotação do eixo motor
- α - Ângulo de inclinação do suporte
- L - Distância entre os pontos de contato da esfera com o eixo
- S_a - Média aritmética do módulo das alturas dos picos e vales
- S_q - Média quadrática da rugosidade
- H_a - Dureza média do abrasivo
- H_c - Dureza média do compósito

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Na prospecção mineral, uma importante etapa é a sondagem mineral testemunhada. Para a realização desta etapa, empregam-se, normalmente, coroas diamantadas ou, também chamadas, brocas de perfuração. Essas coroas são fabricadas através do processo de sinterização com 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 tungstênio unidos por uma liga metálica infiltrante (neste caso, o latão), têm por objetivo dar sustentação aos diamantes e ao mesmo tempo ser desgastada, a fim de expor os mesmos durante a utilização da ferramenta. Contudo, este desgaste não pode ser muito elevado, pois, os diamantes são arrancados facilmente.

Visando a compreensão do desgaste abrasivo pelo qual as coroas são submetidas durante o trabalho, neste trabalho realizaram-se testes de microabrasão a fim de comparar qualitativamente dez tipos de matrizes metálicas para as coroas. A diferença reside, basicamente, no tamanho de pós de tungstênio e a quantidade relativa destes, além de algumas adições de pós com outras composições, alguns contendo abrasivos secundários.

Foi escolhida a técnica de microabrasão pela presença de mecanismo de desgaste em escala micrométrica no processo de desgaste real das coroas, por sua grande reprodutividade, facilidade e rapidez na obtenção de resultados

A partir dos ensaios de microabrasão realizados, além de classificar quantitativamente o desgaste, 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 do teste de microabrasão foram obtidos pela metodologia clássica, considerando a calota uma superfície esférica ideal. Tal perfil pode ser constatado com análise topográfica via interferometria a laser.

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.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SONDAGEM MINERAL DIAMANTADA

A sondagem com ferramentas diamantadas é um método de perfuração convencional rotativa por ação combinada, onde o trabalho se deve a ação de várias formas de ataque à rocha, onde as principais são: corte, esmagamento e abrasão. [1]

O objetivo da sondagem diamantada é extrair uma amostra cilíndrica da rocha, podendo ser empregada em qualquer rocha, desde a mais macia à extra-dura, como o quartzo puro com aproximadamente 1000 HV. [2]

Para a execução da sondagem uma broca de perfuração, ou simplesmente coroa, é acoplada à coluna de perfuração que por sua vez está conectada numa máquina perfuratriz, denominada sonda. A coluna de perfuração é composta de vários elementos tubulares que transmitem a rotação da sonda para a coroa, aplicam a força de avanço sobre a mesma e permitem a circulação do fluido de perfuração até a coroa.

O fluido de perfuração, água ou mistura com aditivos, é injetado dentro da coluna para promover o arrasto dos detritos da rocha gerados durante a perfuração, passando pela face da coroa através das saídas de água e retornando à superfície pelo espaço anelar entre a parede externa da haste e a parede do furo. Refrigerar a face da coroa e lubrificar os elementos da coluna são outras duas importantes funções do fluido de perfuração.

Enquanto a ferramenta gira e avança no furo, pela ação dos diamantes e remoção dos detritos, o testemunho entra no tubo, como visto no esquema simplificado da Figura 1.

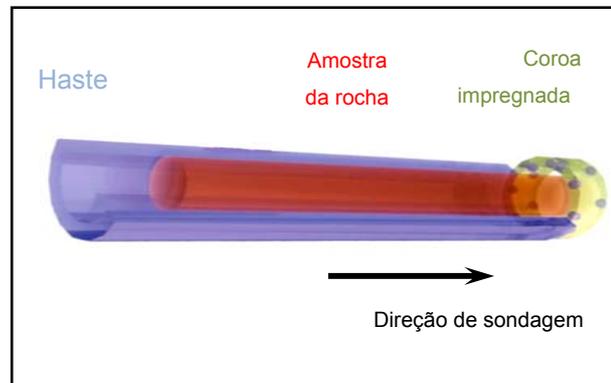


Figura 1 - Obtenção da amostra cilíndrica no processo de sondagem diamantada.

2.1.1. Coroa impregnada de diamantes

As coroas impregnadas de diamantes emergiram como o tipo de ferramenta mais comumente utilizado na indústria de exploração mineral. As vantagens de sua utilização em relação às coroas com outro tipo de mecanismo de corte incluem:

- Extrema faixa de aplicação
- Menos susceptíveis a danos durante o processo (geometria simples)
- Maior vida útil. [3]

Um dos elementos fundamentais do processo de perfuração é a ferramenta ou coroa impregnada de diamantes. A face de corte da coroa consiste de um composto formado por diamantes industriais distribuídos aleatoriamente dentro de uma matriz metálica. [4]

A Figura 2 detalha as principais partes da coroa impregnada, dotadas de vários elementos funcionais em sua estrutura, inicialmente dividida em duas partes: corpo de aço e corpo sinterizado.

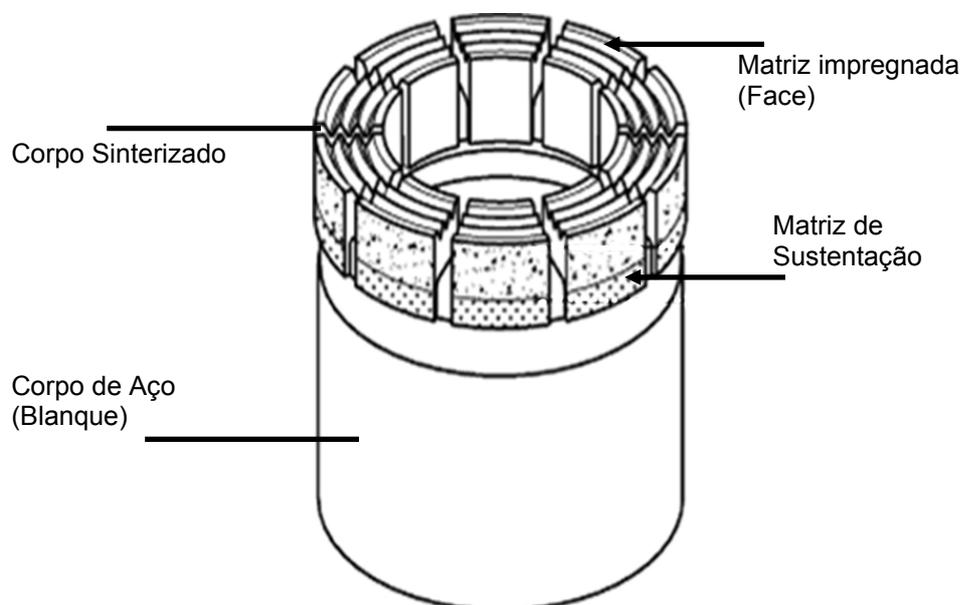


Figura 2 - Elementos estruturais e funcionais de uma coroa impregnada de diamantes.

As propriedades mecânicas da matriz; o tamanho e a quantidade dos diamantes podem ser variados de acordo com a rocha que deve ser perfurada. Seu mecanismo de funcionamento é baseado no desgaste equilibrado da matriz e dos diamantes, proporcionando uma exposição constante de diamantes durante a perfuração. [4]

A constituição, em peso, aproximada do corpo sinterizado das coroas é 1/3 pós de tungstênio, 1/3 de liga infiltrante e 1/3 diamantes. [2][5]

2.1.2. Matriz impregnada

A Matriz impregnada, também chamada de face de corte da coroa, é responsável pelo ataque à rocha. É composta pela mistura de diamantes e pós de

tungstênio, ferro, cobre, cobalto, níquel ou suas ligas, podendo conter abrasivos secundários como SiC ou WC. [2]

O metal ligante deve ser desgastado progressivamente de modo que novos diamantes, dispersos aleatoriamente na matriz, sejam continuamente expostos durante a vida da ferramenta, contudo este desgaste não pode ser muito rápido para evitar que os diamantes sejam arrancados facilmente. [2]

O mecanismo de funcionamento é tal que enquanto a ferramenta corta a rocha, a matriz é lentamente desgastada pela ação abrasiva da rocha e erosão acarretada pelo fluido de perfuração, fazendo com que novos diamantes sejam continuamente expostos durante a vida útil da ferramenta. Adicionalmente, a matriz deve fornecer suporte suficiente para evitar que o diamante seja embutido quando a carga aumenta durante o corte. Uma escolha incorreta da matriz metálica pode levar a uma ferramenta que desgaste excessivamente rápido ou simplesmente fique cega, parando de cortar. [2]

2.1.3. Matriz metálica

Matriz metálica é a denominação dada ao compósito à base de tungstênio e liga infiltrante. Uma combinação destes constituintes junto a modificações nos parâmetros do processo de fabricação alcança um produto com certas propriedades mecânicas, suscetíveis a determinados processos de desgaste e, conseqüentemente, uma faixa de campo de aplicação para ferramenta.

2.2. SINTERIZAÇÃO

A técnica de misturar diamantes a pós metálicos seguida da sinterização do compactado da mistura deu origem ao termo ferramentas “impregnadas de diamantes”.

Na fabricação dessas ferramentas os pós de diamante são misturados aos pós que formam a parte estrutural da ferramenta, neste caso os pós de tungstênio. Na seqüência, são compactados e inseridos no forno com pequenos bastões de liga material da liga infiltrante dispostos na parte superior. Após a fusão destes bastões o material percola por entre as porosidades do compactado alcançando o formato final da do componente.

O processo de sinterização pode ser dividido em 3 etapas:

- Mistura dos cristais de diamante e o pó metálico
- Compactação a frio da mistura;
- Sinterização para obtenção da forma final da ferramenta. [6]

A preparação da mistura é uma etapa de grande importância na fabricação de sinterizados, afetando diretamente a homogeneidade microestrutural e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas da peça final. Sinterizados com maior homogeneidade micro-estrutural geralmente apresentam melhores propriedades mecânicas que sinterizados com microestrutura heterogênea. [7]

Na fabricação de ferramentas impregnadas de diamantes os dois processos mais empregados são: prensagem simultânea ao aquecimento (“hot pressing”) e infiltração livre. [8] [9]

2.2.1. Sinterização com infiltração livre

O processo de sinterização com infiltração consiste num processo de infiltração com fase líquida onde o compactado verde ou a peça pré sinterizada é infiltrada por um metal ou liga metálica com ponto de fusão inferior. Um dos principais objetivos desse processo é a redução de porosidade e, conseqüentemente, a melhoria das propriedades mecânicas deste material, como a ductilidade, a resistência ao impacto e a resistência ao desgaste. [10]

O método mais usado consiste na colocação de pastilhas do metal infiltrante em contato com o esqueleto compactado ou pré-sinterizado, seguido de aquecimento acima do ponto de fusão do infiltrante e abaixo do ponto de fusão do esqueleto. Durante a infiltração, a liga metálica líquida penetra no esqueleto por capilaridade preenchendo parcial ou totalmente os poros, melhor representado na Figura 3. [10]

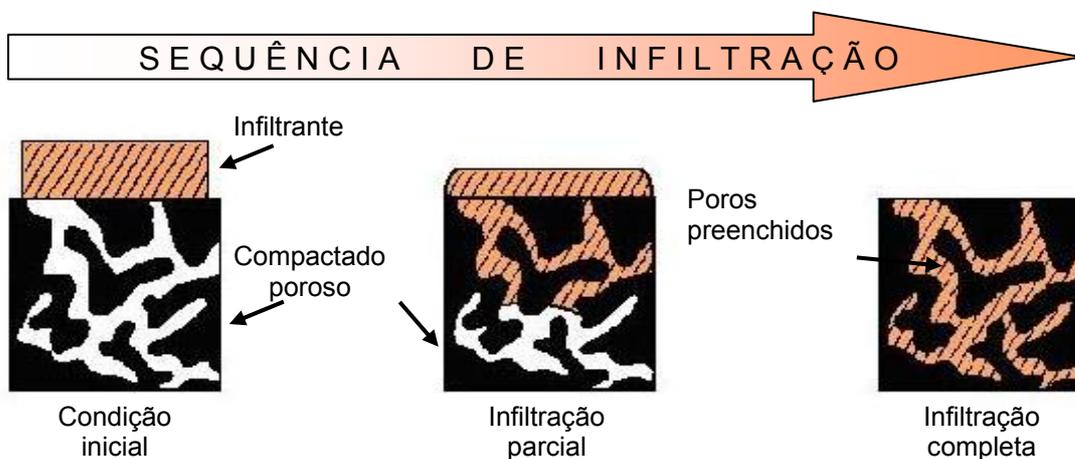


Figura 3 - Preenchimento dos poros durante o processo de infiltração [10]

A estrutura da coroa é consolidada durante a etapa de infiltração, quando um segmento tubular em aço é unido ao corpo sinterizado. O infiltrante líquido, atuando no contato entre o branco de aço e o pó da matriz de sustentação, forma uma espécie de brasagem, soldando-os. [8] [9]

2.2.2. Tipos de matrizes metálicas

As matrizes são baseadas em elementos como tungstênio, ferro, cobre, cobalto, níquel ou suas ligas. Aditivos como grafite, fósforo, titânio, molibdênio, estanho, cromo e nióbio e, também, abrasivos secundários como SiC, WC, SiO₂ podem ser adicionados na matriz. [11] [12]

Sua principal função é dar sustentação aos diamantes e o propósito da infiltração do pó de tungstênio é formar uma forte ligação entre o diamante e a matriz [13]

Em geral, esses compósitos apresentam baixa porosidade, variando numa faixa de 0,2 a 2%. Entretanto, níveis controlados de porosidade podem ser deixados no produto final para gerar alguma qualidade de corte livre, ou “auto-afiamento”. [14]

A densidade da matriz depende do percentual de tungstênio, do tipo de infiltrante. Ligas infiltrantes pesadas, como 60Cu-40Ag, resultam em matrizes com maiores densidades. Similar ao caso das ligas infiltrantes, abrasivos secundários pesados, com teores abaixo de 2% em volume, implicam em matrizes com maiores densidades. [11]

Para melhorar a densificação do compósito, pós com misturas de fases (pré-ligados) de cobre, cobalto e ferro são adicionados ao pó de tungstênio. Adições dos metais Co e Fe ativam a sinterização em ligas W-Cu-M (onde M é o Fe ou Co), devido à formação de uma fase (M₇W₆) de alta difusividade nos contornos de grão W-W. [15]

Características como composição química do pó metálico da matriz, distribuição granulométrica, fase da partícula, dentre outras, influenciam significativamente nas propriedades finais das ferramentas. [16]

Matrizes compostas por pós que apresentam grãos de tamanho e forma irregulares e uma ampla faixa de distribuição granulométrica provocam um efeito de entrelaçamento ou travamento dos grãos, tornando-as mais resistentes à erosão se comparadas às matrizes produzidas com pós de formato regular ou de mesma distribuição granulométrica. [17]

Devido à complexidade dos mecanismos de desgaste atuantes na perfuração de rochas, as composições das ferramentas são desenvolvidas empiricamente e guardadas em segredo pelos fabricantes. [12]

A presença de mecanismos de desgaste como abrasão, erosão e fadiga térmica sugere que outras propriedades, além de dureza, devem ser consideradas, tais como ductilidade, condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica. [18]

Compósitos de tungstênio e cobre possuem uma combinação única de alta densidade, ductilidade, condutividade térmica, resistência mecânica e tenacidade, enquadrando-se perfeitamente no perfil de propriedades citado no parágrafo anterior. [19]

É sabido que a ductilidade da matriz pode ter um efeito positivo na resistência ao desgaste do mesmo. Quanto maior a capacidade da liga infiltrante de manter as partículas de tungstênio unidas, maior será a quantidade de deformação plástica antes da remoção de debrís da matriz. [20]

A importância da condutividade térmica se encontra na dissipação do calor gerado durante a perfuração, o qual reduz a capacidade de retenção do diamante

bem como da resistência ao desgaste, principalmente quando nenhum líquido refrigerante for utilizado. [21]

Se uma liga transfere mais calor, ela aquecerá menos e suas propriedades mecânicas serão mais estáveis, o que, provavelmente, resultaria numa melhora, tanto na velocidade de avanço como da vida útil da ferramenta. [22]

Dependendo da temperatura de sinterização, da composição química da matriz e do tamanho e da distribuição das partículas, o diamante pode se degradar. Esta degradação começa por volta de 800 °C e a grafitização é a principal causa da degradação térmica dos produtos de diamante sinterizados. Isto vale tanto para sintéticos quanto para naturais. Reações superficiais severas podem afetar drasticamente as propriedades do cristal de diamante. Co, W, Ni e Fe são formadores de carbonetos e quando estes metais são usados como matrizes, a integridade dos cristais de diamante é afetada pela grafitização durante a sinterização. [23]

Entretanto, quando se usa cobre, estanho ou bronze a integridade não é afetada por causa da baixa afinidade química entre o diamante e estes metais. Os diamantes sintéticos começam a perder resistência a partir de 800 °C. Devido à presença de inclusões metálicas nos cristais, o declínio é relativamente rápido em temperaturas acima de 1000 °C. Isto indica que quanto maior o nível de inclusões metálicas, mais baixa é a temperatura e o tempo de degradação desses diamantes. Os fatores principais da redução da resistência de ligação matriz-diamante são difusão, porosidade e grafitização da superfície do diamante. [23]

O sistema Cu-Ag tem uma temperatura de infiltração menor que o Cu-Zn, com isto uma redução do problema de grafitização é esperada. De fato, as ligas Cu-Ag têm maior condutividade comparadas com outras ligas de cobre, principalmente latões de resistência mecânica equivalente. [24] [25]

O uso de partículas de abrasivo secundário na matriz tem se mostrado um método muito eficaz na melhoria da resistência ao desgaste de matrizes. Partículas duras como TiB_2 , TiC e TiN adicionadas no pó de titânio causaram um aumento significativo da resistência ao desgaste do compósito estudado. [26]

2.2.3. Desgaste das matrizes metálicas

O desgaste de ferramentas diamantadas para perfuração de rochas depende fortemente do comportamento em desgaste dos diamantes e da matriz metálica. [27]

Os principais mecanismos de desgaste apresentados nas ferramentas diamantadas, utilizadas em perfuração rotativa são: abrasão, erosão, fadiga e fadiga térmica. Estes mecanismos não acontecem isoladamente e, simultaneamente, podem elevar brutalmente o nível de desgaste do material. [18]

Sob ensaio padronizado de abrasão em matrizes duras e matrizes dúcteis constatou-se que mudanças no comportamento de desgaste dos compósitos estudados são relacionadas a processos competitivos de delaminação, microsulcamento e microtrincamento. O mecanismo de abrasão acontece em matrizes muito dúcteis e é acompanhado por estrias de fadiga. Microtrincamento, por outro lado, acontece em compósitos mais duros, onde há deformação plástica limitada, manifestada por micro sulcamentos curtos e finas lâminas de delaminação de pequeno comprimento. [11]

2.3. MICROABRASÃO

A microabrasão é uma técnica utilizada para produzir desgaste abrasivo em escala micrométrica. Recentemente vem sendo utilizada para avaliar a resistência

ao desgaste, assim como estudar mecanismos de desgaste, tanto de materiais duros quanto de materiais macios. [28]

Foi escolhida a técnica de microabrasão principalmente pela presença de mecanismo de desgaste em escala micrométrica no processo de desgaste real das coroas de perfuração, como mostrado na Figura 4 obtida por microscopia eletrônica de varredura. Em seguida, pela sua grande reprodutibilidade, facilidade e rapidez na obtenção de resultados.

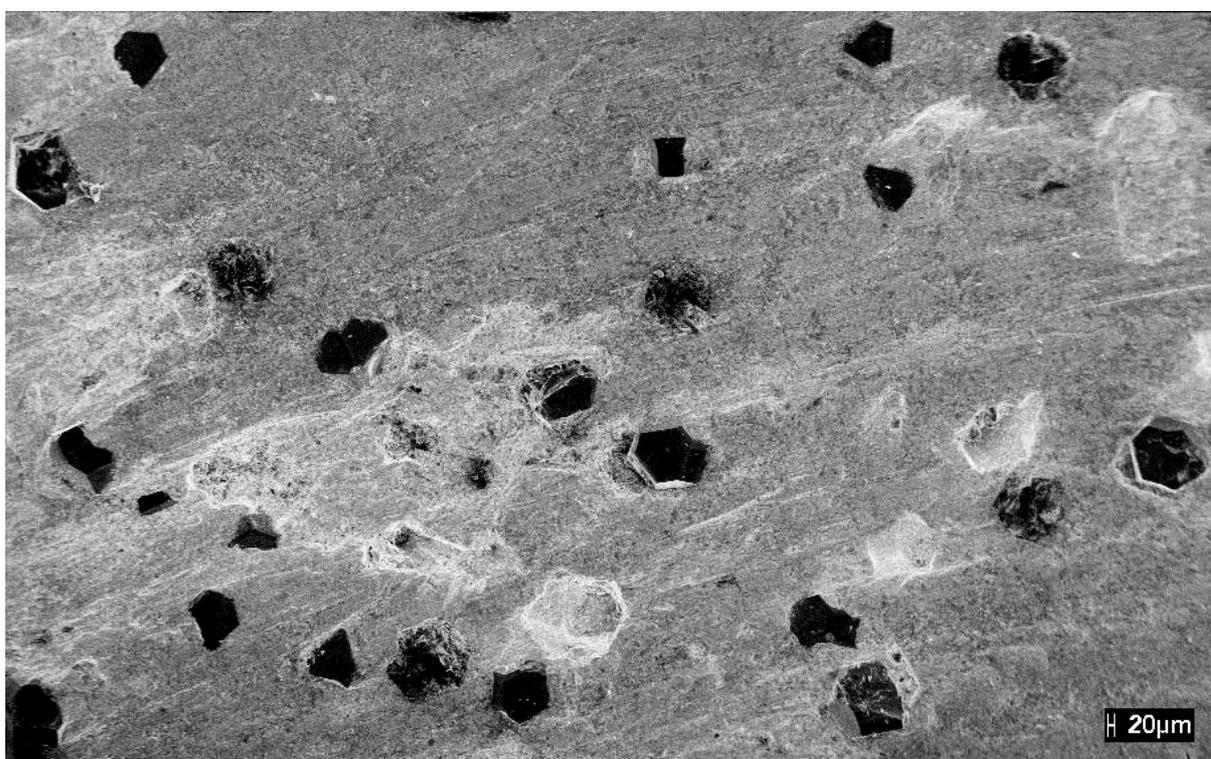


Figura 4 - Mecanismos de desgaste reais de uma broca de perfuração

A geometria da região de desgaste formada sobre o corpo é a reprodução da geometria do contra-corpo esférico durante todo o teste. Existem evidências experimentais que o desgaste da esfera é insignificante. A análise foi feita comparando-se a superfície, por interferometria a laser, da esfera em dois casos, quando nova e depois de usada. A análise comprovou que os perfis foram coincidentes. [28]

O desgaste é gerado pela rotação de uma esfera de raio “R” sobre um corpo de prova fixo, tendo como meio de contato entre elas uma lama contendo pequenas partículas abrasivas. Neste método a avaliação do desgaste é decorrente da variação da geometria da impressão formada, podendo ser aplicado em materiais revestidos ou não, e amostras com superfície planas ou cilíndricas. [29]. O esquema de funcionamento do equipamento de microabrasão tipo calowear pode ser visualizado na Figura 5.

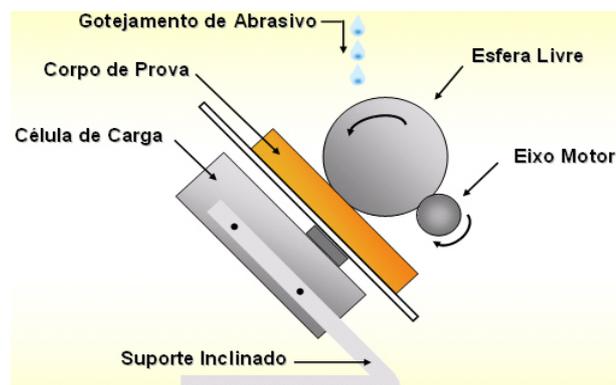


Figura 5 - Esquema de funcionamento do equipamento de microabrasão tipo calowear.

Em materiais homogêneos e não revestidos, o volume desgastado (V) pode ser calculado em função da distância total deslizada (S) e da força normal sobre o contato (N). Este modelo simples de desgaste abrasivo equivale à equação de Archard para desgaste por deslizamento, mostrada na Equação 1. [28]

$$Q = \frac{V}{S} = \frac{K \cdot N}{H} \quad \text{Equação 1}$$

Nesta expressão, “Q” representa a relação entre o volume de material desgastado e a distância deslizada, “N” a força normal sobre o contato, “H” a dureza do material, e a constante “K” o coeficiente de desgaste adimensional. [28]

Deste modo, se considerarmos a relação $\frac{K}{H}$ igual a coeficiente de desgaste dimensional (k), temos a Equação 2:

$$V = k.S.N \Rightarrow k = \frac{V}{S.N}$$

Equação 2

Onde “k” representa o coeficiente de desgaste dimensional, cuja unidade é dada em $[m^3.(N.m)^{-1}]$. [30]

Além disso, também é possível determinar o volume de material desgastado (V) a partir do raio da esfera (R) e do diâmetro da calota desgastada (b), mostrados na Figura 6 através da Equação 3. [28] [30]

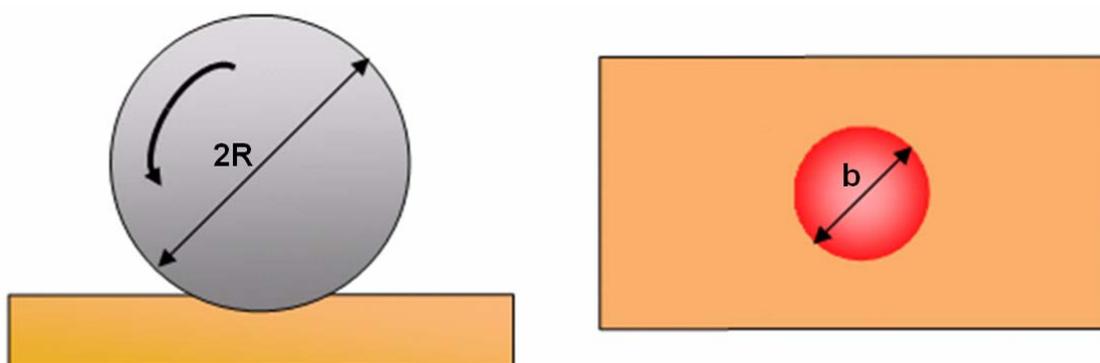


Figura 6 - Esquema de formação do perfil esférico na amostra, vista frontal (a) e da aparência da calota desgastada, vista superior (b)

$$V \approx \frac{\pi.b^4}{64.R}, \text{ para } b \ll R$$

Equação 3

O equipamento de microabrasão permite reproduzir diversos micromecanismos de desgaste a partir da variação de seus parâmetros de ensaios, a seguir segue a influência de alguns destes.

A utilização de cargas normais elevadas e/ou lama abrasiva com baixas concentrações de abrasivos, geralmente, provocam um mecanismo, predominantemente, de deslizamento de partículas. Na interface de contato há poucas partículas abrasivas, gerando altas pressões de contato e

consequentemente deslizamento das partículas, como na micrografia eletrônica de varredura característica representada na Figura 7 (a). Entretanto, em baixas cargas e/ou lama abrasiva com altas concentrações as partículas abrasivas não ficam engastadas e rolam entre as duas superfícies produzindo deformação localizada, caracterizando o desgaste por indentações múltiplas, como mostrada na Figura 7 (b). [30]

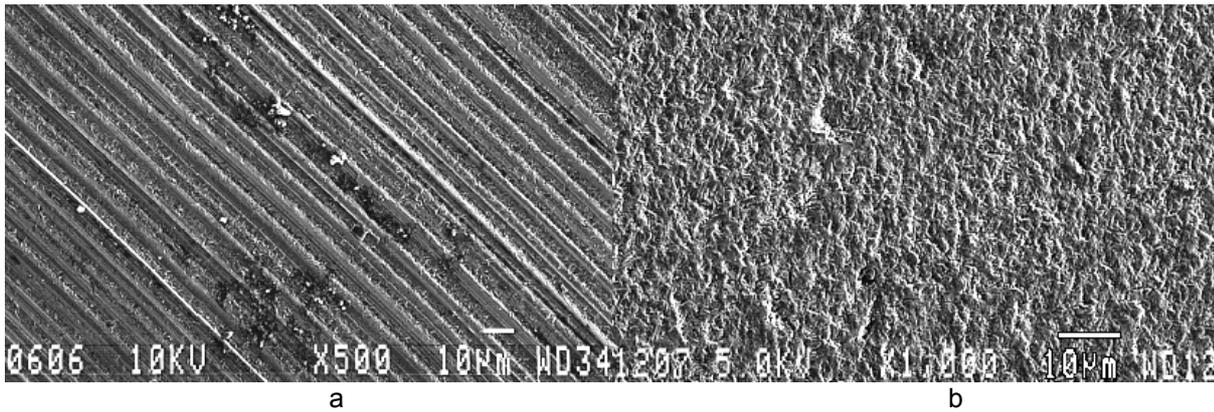


Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura característica para deslizamento (a) e rolamento de partículas (b). [30]

Para os casos de concentração de abrasivo (diamante (a), SiC(b) e Al_2O_3 (c)) e/ou cargas intermediárias o mecanismo resultante é uma configuração mista de deslizamento e rolamento de partículas. A Figura 8 mostra o mecanismo de desgaste predominante depende da força normal aplicada, da concentração das partículas abrasivas no meio e da natureza do abrasivo. [30]

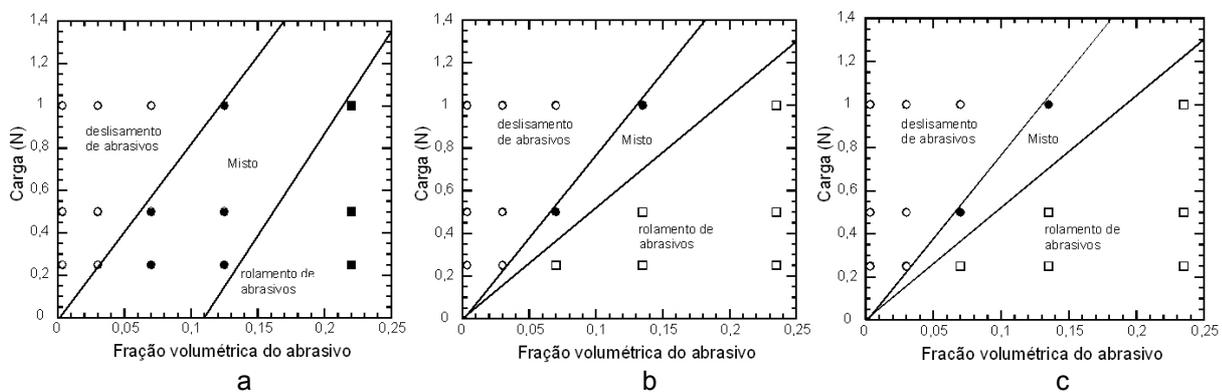


Figura 8 - Mecanismos de desgaste variando carga e concentração da lama abrasiva de diamante (a), SiC (b) e Al_2O_3 (c) em ensaio de microabrasão. [30]

A condição da superfície da esfera influencia a magnitude e a reprodutibilidade na medição do coeficiente de desgaste. Este efeito é explicado em termos do modo de arrasto das partículas abrasivas para a área de contato entre esfera e corpo de prova, que muda quando se usa uma esfera polida e quando se usa uma esfera rugosa. [31] [32]

CAPÍTULO III

3. MÉTODOS E EXPERIMENTOS

3.1. MATERIAIS ENSAIADOS

As matrizes analisadas neste trabalho são, em maioria, pós de tungstênio metálico sinterizados com infiltração por uma liga de baixo ponto de fusão e dureza. A diferença entre os materiais ensaiados reside, basicamente, no tamanho de pós de tungstênio e a quantidade relativa destes, algumas adições de pós com outras composições, além da presença de abrasivo secundário (SiC), em alguns casos. Por isso, foram identificadas segundo o tamanho médio dos pós metálicos de tungstênio (W) que os compõe e os respectivos pós de adição, o que pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Identificação e composição dos matrizes ensaiadas

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)

3.2. PREPARAÇÃO DA AMOSTRAS

Três amostras de cada matriz foram retiradas de uma coroa sinterizada sem diamantes com a seguinte liga infiltrante Cu-43Zn-1Sn (% em peso) em forno tipo mufla sob temperatura de aproximadamente 1050 °C. A Figura 9 mostra a região de onde foram retiradas as amostras (a) e as amostras já devidamente tratadas para os ensaios (b).

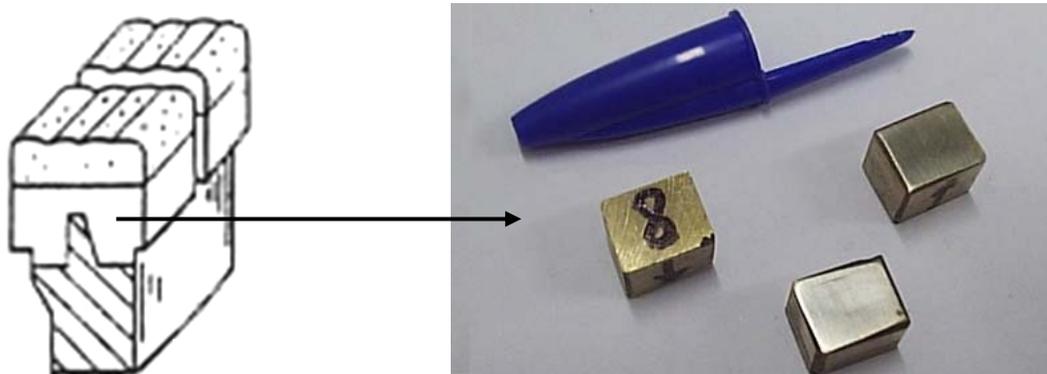


Figura 9 - Região de onde foram retiradas as amostras (a) e as amostras já devidamente tratadas para os ensaios (b)

As amostras foram preparadas manualmente com lixas d'água com granulometria inicial de 180, dentre outras, até alcançar 600. O esquema de lixamento pode ser visto com detalhes na Figura 10.

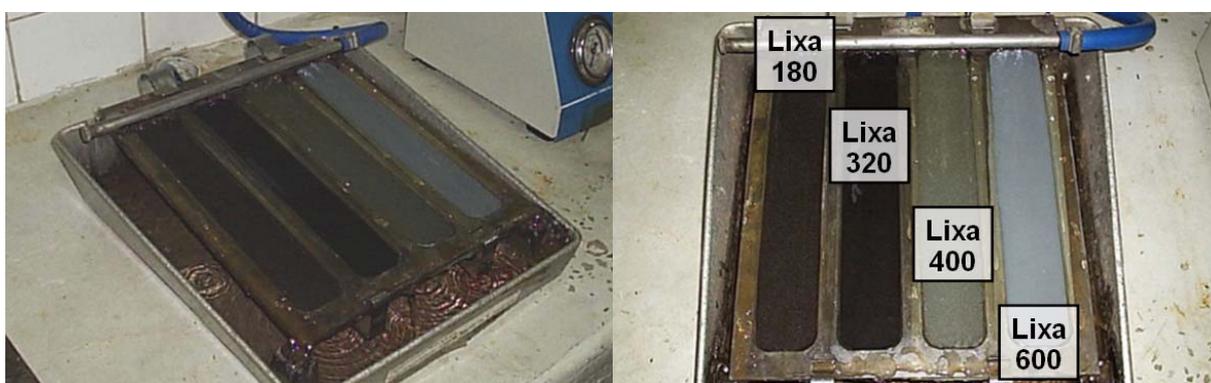


Figura 10 - Esquema de lixamento para preparação das amostras

3.3. DETERMINAÇÃO DA DUREZA

Os ensaios de dureza foram realizados num durômetro Vickers, fabricante WPM, modelo HPO10, com carga de 10 kgf, por 30 segundos.

O valor médio de dureza para cada tipo de matriz foi obtido a partir de 24 medições, onde para cada amostra foram tomadas oito medições. As medições foram efetuadas na direção radial das amostras em duas linhas imaginárias passantes pela matriz, as linhas L1 e L2, mostradas na Figura 11.



Figura 11 - Esquema do posicionamento das medições de dureza

3.4. ENSAIOS DE MICROABRASÃO (TIPO CALOWEAR)

Os ensaios de microabrasão foram realizados em um equipamento do tipo Calowear (configuração esfera livre). Nesse ensaio, a esfera é rotacionada por um eixo motor e rola 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, conforme o esquema de funcionamento apresentado na Figura 5.

O equipamento também possui um agitador magnético para misturar continuamente a lama abrasiva, para evitar sedimentação, uma luneta com fonte de iluminação para medição das dimensões da calota desgastada, além de controles de

velocidade e tempo, visores do contador de número de rotações realizadas e valor da força normal sobre o contato. O detalhamento do equipamento pode ser visto na Figura 12.

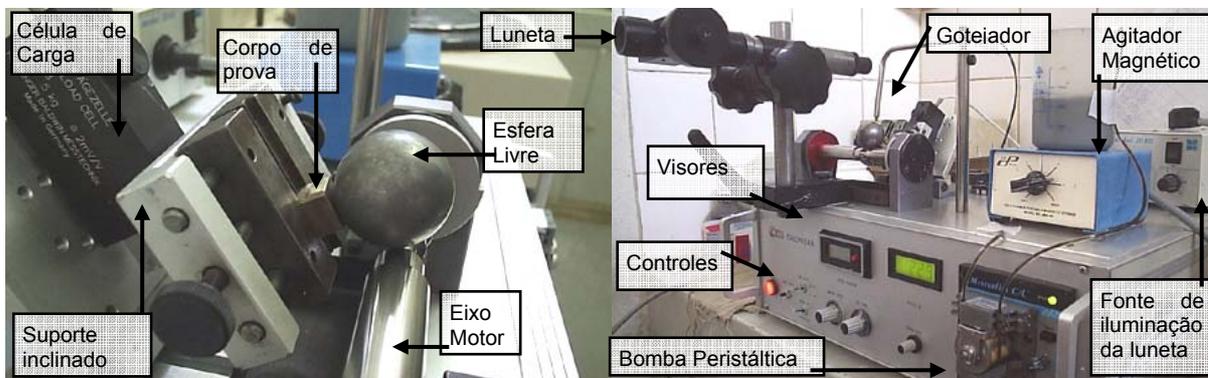


Figura 12 - Detalhamento do equipamento de microabrasão tipo Calowear

No ensaio de microabrasão admite-se que a região desgastada possui o mesmo perfil geométrico do contra-corpo, conforme mostrado no esquema da Figura 6, raio da esfera (R) (a – vista frontal) e da calota de desgaste (b) (b – vista lateral). Assim, é possível determinar o volume de material desgastado (V) através da Equação 3.

Deste modo, unindo a Equação 3 à Equação 2 encontra-se a Equação 4, para o coeficiente de desgaste dimensional (k) em função da geometria da calota desgastada (b), diâmetro da esfera livre ($\varnothing_{\text{esfera}}$), distância percorrida (S) e da força normal sobre o contato (N).

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

3.4.1. Medição da dimensão calota desgastada (b)

Com a luneta dispendo de um micrômetro acoplado é possível determinar a dimensão média da calota a partir de duas medidas: horizontal e vertical. Com isso é possível avaliar a circularidade da região desgastada e estimar seu volume.

A Figura 13 mostra a luneta que é utilizada para observação e coleta de dados. Ela possui um sistema de iluminação por fibra ótica e um suporte que permite que seja ajustado o foco para uma visualização nítida da região desgastada.

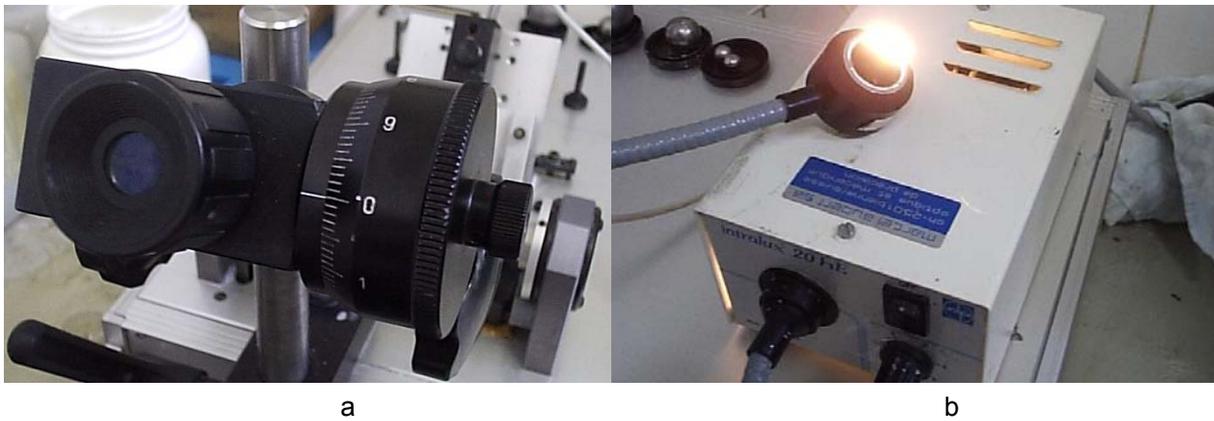


Figura 13 - Micrômetro acoplado à luneta (a) e sistema de iluminação da luneta (b)

O sistema óptico possui um aumento de duas vezes, assim, para obter a dimensão real da calota de desgaste, a média da dimensão horizontal (posição 4 subtraído da posição 1 da Figura 14) e vertical (posição 3 subtraído da posição 2 Figura 14) é multiplicada por dois, valores em micrometros.

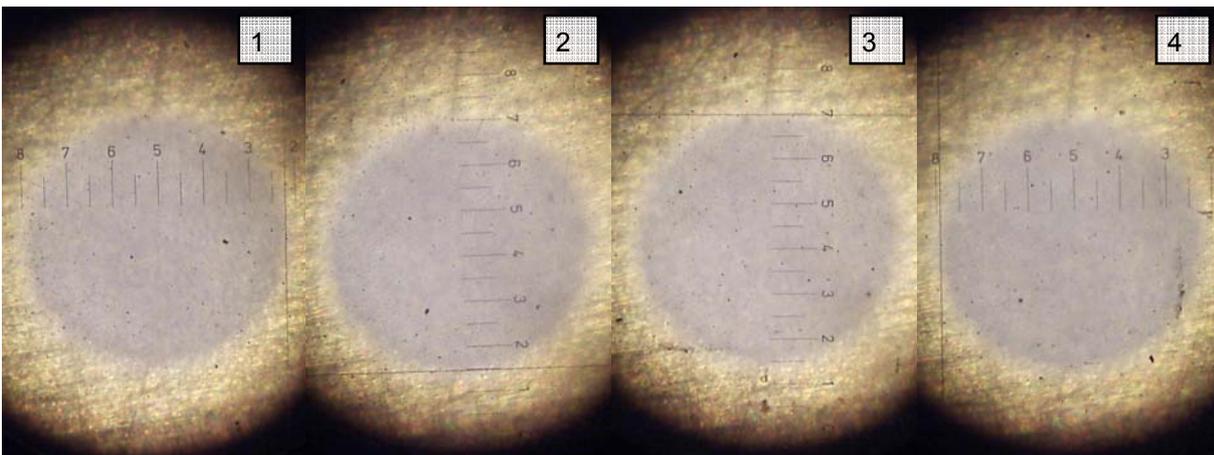


Figura 14 - Posições do micrômetro para medição da dimensão da calota de desgaste

3.4.2. Determinação da distância percorrida (S)

O equipamento de microabrasão tipo Calowear possui um contador de revoluções para o eixo motor, sendo assim é necessário determinar a distância percorrida pela esfera livre durante os ensaios a partir das dimensões do eixo e da esfera livre utilizada para os ensaios. A Figura 15 detalha a transmissão de movimento do eixo motor – esfera livre movida onde R' é o raio da esfera que está em contato com o eixo motor.

$$S = \varnothing_{\text{esfera}} \cdot \pi \cdot n_{\text{esfera}}$$

Equação 5

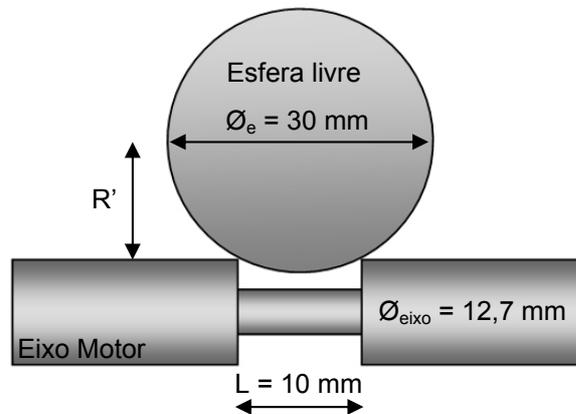


Figura 15 - Transmissão de movimento do eixo para a esfera livre

Considerando que não existe deslizamento entre o eixo motor e a esfera livre, podendo ser considerada a Equação 6.

$$S' = 2 \cdot R' \cdot \pi \cdot n_{\text{esfera}} = \varnothing_{\text{eixo}} \cdot \pi \cdot n_{\text{eixo}}$$

Equação 6

$$n_{\text{esfera}} = \varnothing_{\text{eixo}} \cdot n_{\text{eixo}} / (2 \cdot R')$$

Equação 7

$$\left(\frac{\varnothing_{\text{esfera}}}{2} \right)^2 = R'^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \rightarrow R' = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\varnothing_{\text{esfera}}^2 - L^2}$$

Equação 8

Assim, substituindo Equação 8 na Equação 7 e a resultante na Equação 5, obtém-se a Equação 9:

$$S = \frac{\Phi_{\text{esfera}} \cdot \Phi_{\text{eixo}} \cdot \pi \cdot n_{\text{eixo}}}{\sqrt{\Phi_{\text{esfera}}^2 - L^2}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$S \rightarrow$ Distância percorrida [mm]

$\emptyset_{\text{esfera}} = 30$ mm (diâmetro da esfera)

$\emptyset_{\text{eixo}} = 12,7$ mm (diâmetro do eixo)

$L = 10$ mm (distância entre os pontos de contato da esfera com o eixo)

Daí encontra-se a Equação 10.

$$S = 42,32 \cdot n_{\text{eixo}} \quad [\text{mm}] \quad \text{Equação 10}$$

3.4.3. Parâmetros do teste de microabrasão

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

Tabela 2 – Parâmetros operacionais dos ensaios de microabrasão

Velocidade Tangencial da Esfera	25 a 30 [mm / s]
Ângulo de inclinação do suporte	70 [°]
Força normal estática	0,22 ± 0,02 [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

3.4.4. Coleta do valor da força normal sobre o contato (N)

É necessário que o valor na força normal dinâmica sobre o contato seja registrada alguns instantes antes que seja feita a interrupção para mensurar a dimensão da calota desgastada, pois este valor é utilizado nos cálculos para a determinação do coeficiente de desgaste (Equação 4). Entretanto, para os pontos subseqüentes da mesma calota de desgaste, o valor a ser considerados nos cálculos é a média de todos os anteriores, vistos que esses também foram responsáveis pela formação da calota.

3.4.5. Determinação do regime permanente de desgaste

Um dos fatores que implicam na complexidade dos ensaios tribológicos é a determinação do regime permanente de desgaste, de onde é possível coletar dados confiáveis do comportamento do sistema.

Para o nosso caso de microabrasão em compósitos de matriz metálica à base de tungstênio, o regime permanente foi considerado o regime que o coeficiente de desgaste apresentou uma variação inferior a 7% ao longo dos ensaios. Todos os valores de coeficiente de desgaste utilizados neste trabalho pertencem ao regime permanente. A Figura 16 mostra uma representação gráfica de tal regime.

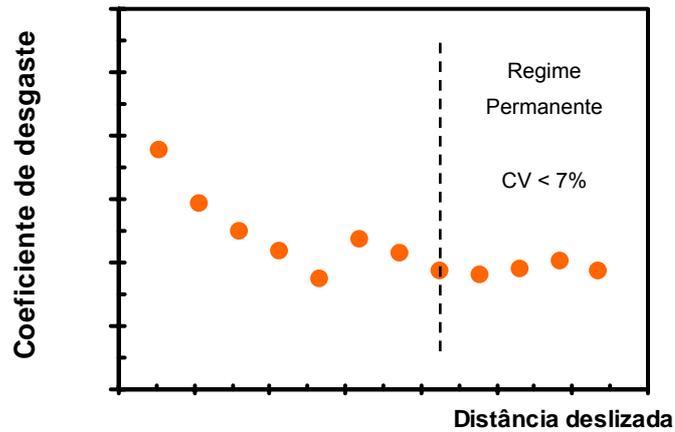


Figura 16 - Representação gráfica do regime permanente

3.5. TOPOGRAFIA SUPERFICIAL VIA INTERFEROMETRIA A LASER

A análise via interferometria a laser foi necessária para a comparação da geometria do contra-corpo (esfera livre) e a do corpo de prova (região desgastada) visto que todas as expressões foram fundamentadas, para cálculo do volume de material desgastado, no princípio que a calota desgastada tem a mesma forma geométrica de uma esfera ideal, considerada o contra-corpo.

A resolução utilizada foi de 50 pontos por milímetros na direção de rolamento do contra-corpo e 1000 pontos por milímetros na direção perpendicular à esta numa área de 4 mm² para uma calota de desgasta para cada material, para cada lama abrasiva utilizada.

O contra-corpo também foi analisado, com a mesma área e resolução, para verificação da qualidade superficial com sua superfície limpa com areia e detergente (antes dos ensaios) e após alguns ensaios (sem limpeza intermediária).

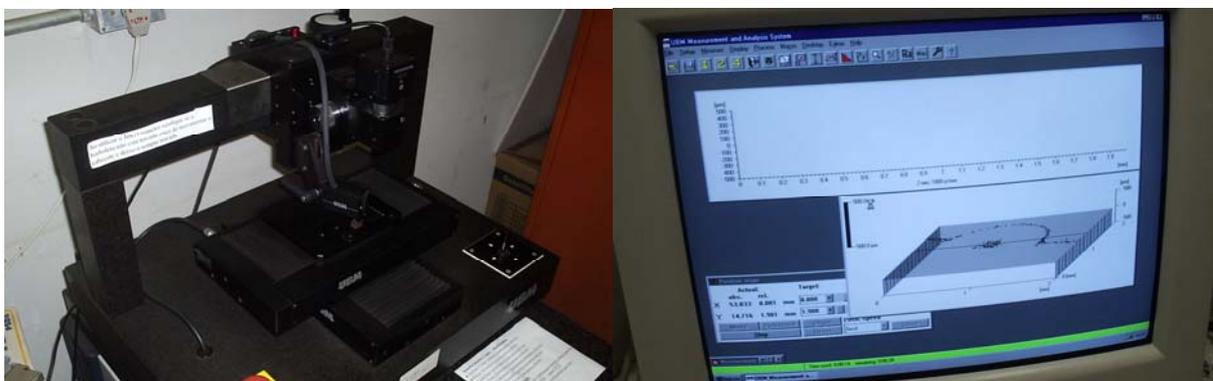


Figura 17 – Interferômetro a laser utilizado para análise topográfica superficial

A Figura 17 mostra o perfilômetro a laser, marca UBM, modelo MICROFOCUS EXPERT IV, utilizado para as análises no Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia. A análise também foi realizada através do programa DIGITAL SURF MOUNTAINS MAP UNIVERSAL[®], versão 3.1.9.

3.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As observações por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas num equipamento marca LEICA-OXFORD, modelo S440i, em parceria com a ArcelorMital Brasil (CST).

3.7. CÁLCULO DE PERCENTUAL DE FASES

Os percentuais de fases presentes de algumas matrizes foram calculadas com o auxílio de programa GSA – Granulômetro Semi-automático versão 1.0, desenvolvido na Universidade Federal do Espírito Santo no ano de 1999, que se baseia na norma para quantificar percentual de micro-constituente e tamanho de

grão. No programa, foi utilizada uma malha com 10 divisões nas direções horizontais e verticais.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material analisado neste trabalho é constituído de um esqueleto de pós de tungstênio metálico sinterizado com infiltração com uma liga de baixa dureza e ponto de fusão com a adição ou não de algumas misturas de pós metálicos de outras ligas e/ou SiC como abrasivo secundário. A Figura 18 apresenta uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da matriz “4” onde as regiões mais claras representam os pós de tungstênio e as regiões mais escuras a liga infiltrante.

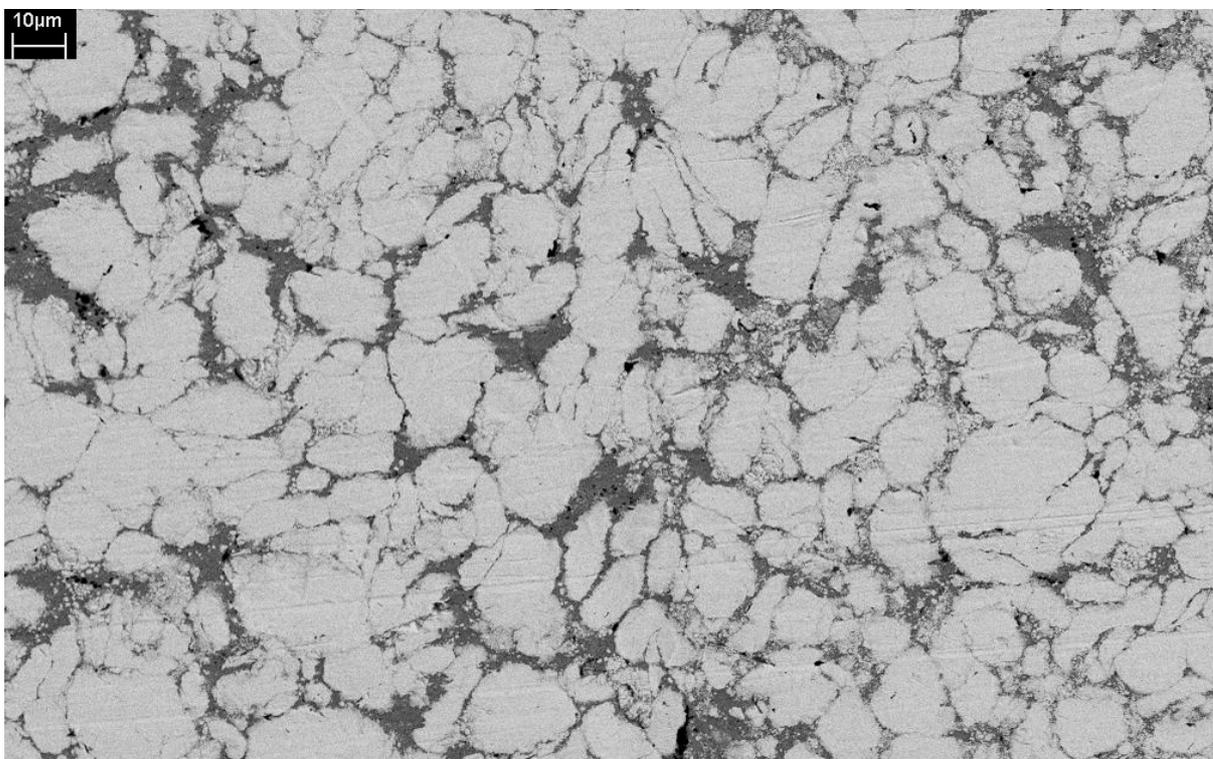


Figura 18 - Microscopia eletrônica de varredura para caracterização da matriz “4”.

4.2. DUREZA

Os valores encontrados para as durezas dos compósitos e discutidos acima são representados graficamente pela Figura 19.

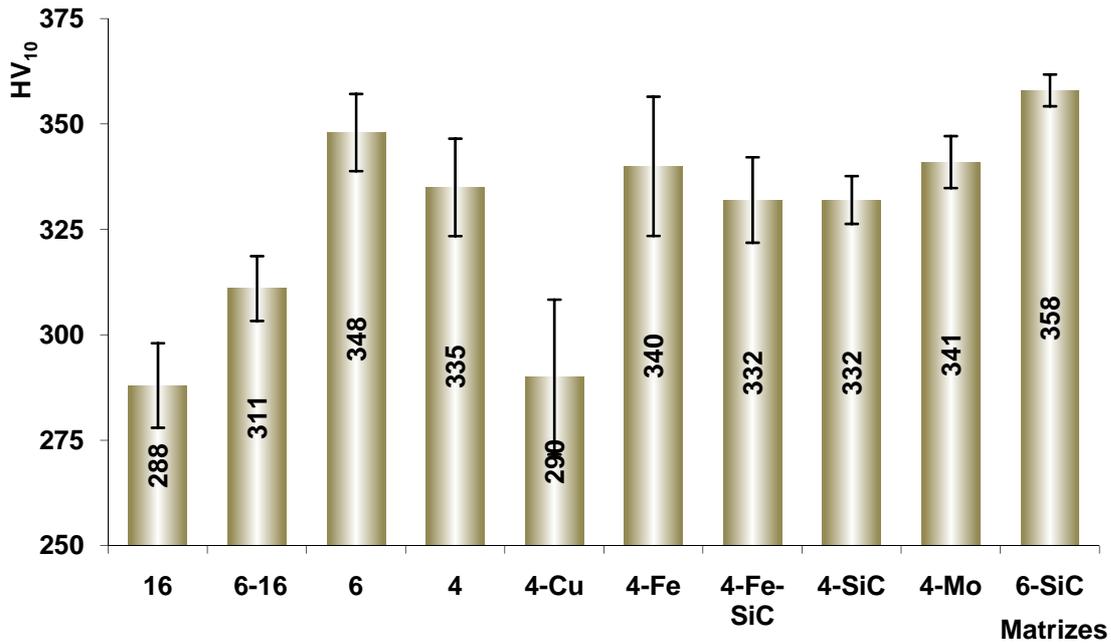


Figura 19 - Dureza Vickers das matrizes

As matrizes fabricadas a partir de pós de tungstênio de tamanho médio original de 16 μm (puro ou mistura) apresentaram os menores valores de dureza, na ordem de 300 HV_{10} , 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. Resultado também encontrado pelo fabricante dos pós. [33]

Além destas, a coroa com pós de tungstênio de tamanho médio original de 3,5 μm que foi adicionado pó a base de Cu ("4-Cu"), devido à presença de uma maior quantidade de material mais macio, o cobre, também atingiu valor de dureza na mesma faixa. Já as ligas contendo só tungstênio de menor tamanho ("4" e "6") e

aquelas com adição de Mo ou de Fe apresentaram resultados na ordem de 340 HV₁₀.

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. [33]

As adições de ligas a base de Fe e de Mo não alteram significativamente o valor de dureza em relação ao material que contém só tungstênio de tamanho médio original de 3,5 µm. A adição de SiC como abrasivo secundário, muito duro, não altera ou aumenta levemente a dureza global da matriz, a alteração é significativa numa escala pontual, como os ensaios de dureza foram realizados visando a dureza global (carga de 10 kgf.) estes resultados não foram influenciados.

4.3. TOPOGRAFIA SUPERFICIAL VIA INTERFEROMETRIA A LASER

4.3.1. Calotas de desgaste

Considerando que os valores de coeficientes de desgaste foram calculados a partir da aproximação do volume de material removido sob uma superfície semi-esférica ideal torna-se necessária a verificação de tal superfície nas calotas de desgaste.

A Figura 20 mostra a topografia superficial da região desgastada gerada via interferometria a laser representando a seção que gera o perfil mostrado na Figura 21.

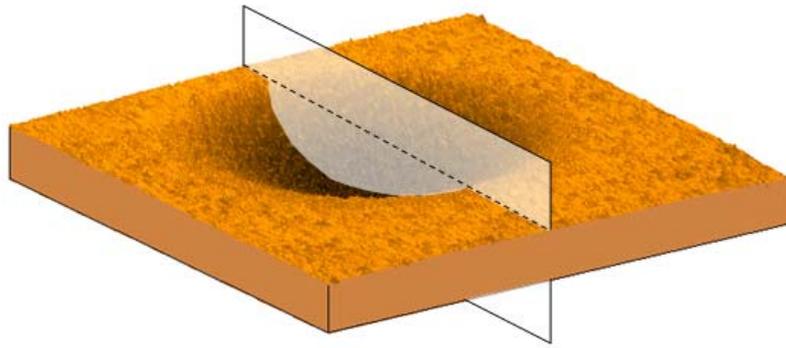


Figura 20 - Topografia superficial da região desgastada com um plano identificando a seção transversal de maior profundidade.

A Figura 21 ilustra que essa aproximação pode ser considerada, pois o perfil da região desgastada, neste trabalho algumas calotas foram analisadas para cada lama abrasiva utilizada, e todas estão de acordo com tal consideração. [28]

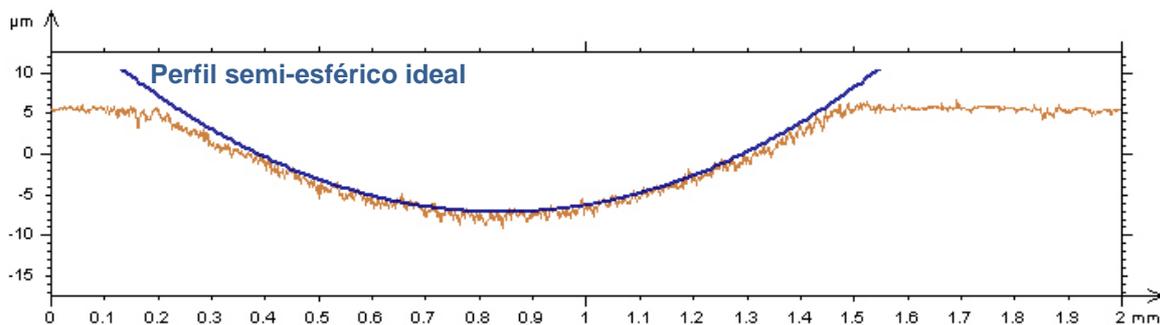


Figura 21 - Comparação do perfil da região de desgaste e um semi-esférico ideal

4.3.2. Contra-corpo

A topografia superficial do contra-corpo antes (limpa) e após dos ensaios estão representadas na Figura 22. No sistema tribológico em questão, a qualidade superficial do contra-corpo é estatisticamente igual para as duas situações que pode ser visualizada na Figura 23.

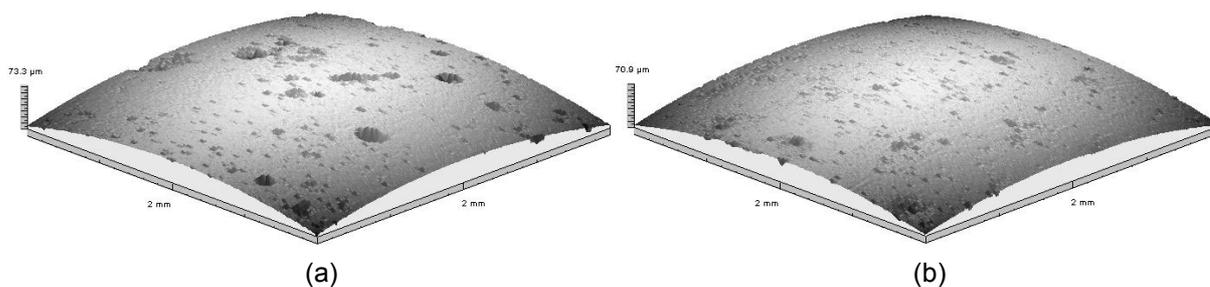


Figura 22 - Topografia superficial do contra-corpo antes (a) e depois (b) dos ensaios

O processo de limpeza com detergente e areia normal não alteram, expressivamente, os parâmetros de rugosidade superficial (S_a e S_q). Porém, não por isso os resultados alcançados com os ensaios de microabrasão realizados com limpeza do contra-corpo é semelhante ao sem limpeza. [32]

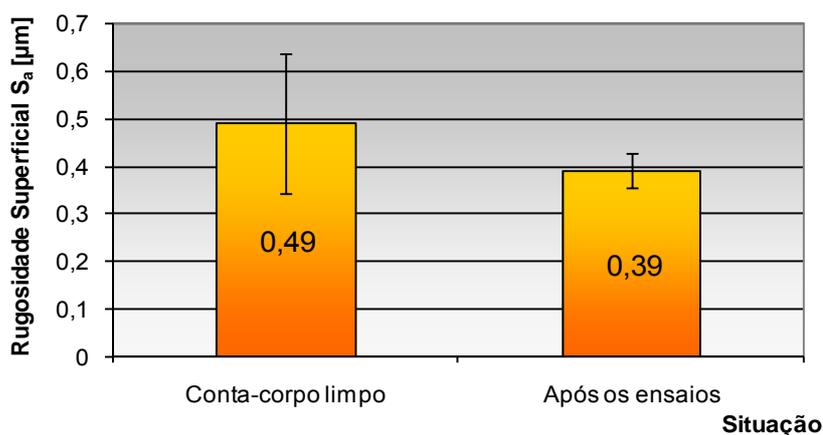


Figura 23 - Representação gráfica e de rugosidade do contra-corpo limpo e após os ensaios

4.4. MICROABRASÃO

4.4.1. Obtenção dos coeficientes de desgaste

O regime permanente foi considerado a partir da distancia percorrida onde os coeficientes de desgastes dimensionais apresentaram uma variação inferior a 7%. As Figura 24 e Figura 25 mostram três curvas realizadas para a lama abrasiva de

SiC e SiO₂ para as matriz "4" e "4-SiC", respectivamente. O coeficiente de desgaste final é a média dos três últimos pontos das três curvas, totalizando nove pontos.

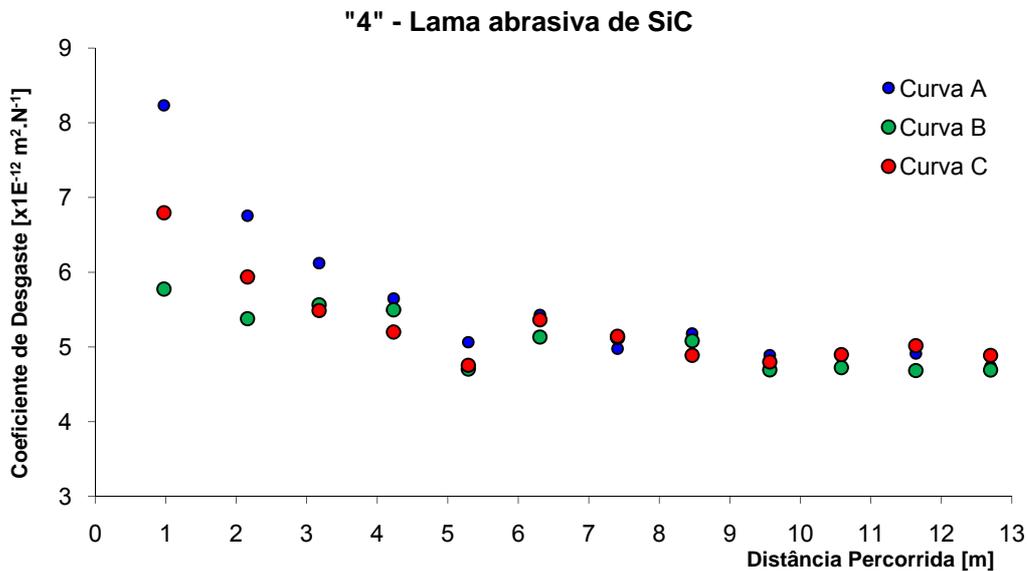


Figura 24 - Curvas do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4" com lama abrasiva de SiC.

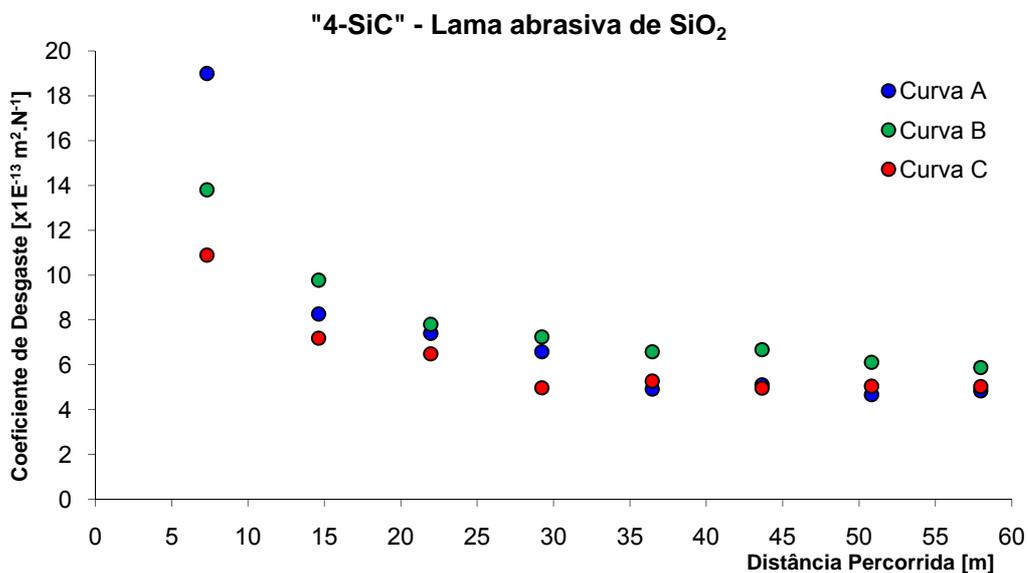


Figura 25 - Curvas do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4-SiC" com lama abrasiva de SiO₂.

A partir das curvas acima, derivam-se as Figura 26 e Figura 27, respectivamente, onde é traçada uma curva média do coeficiente de desgaste dimensional com seu respectivo desvio.

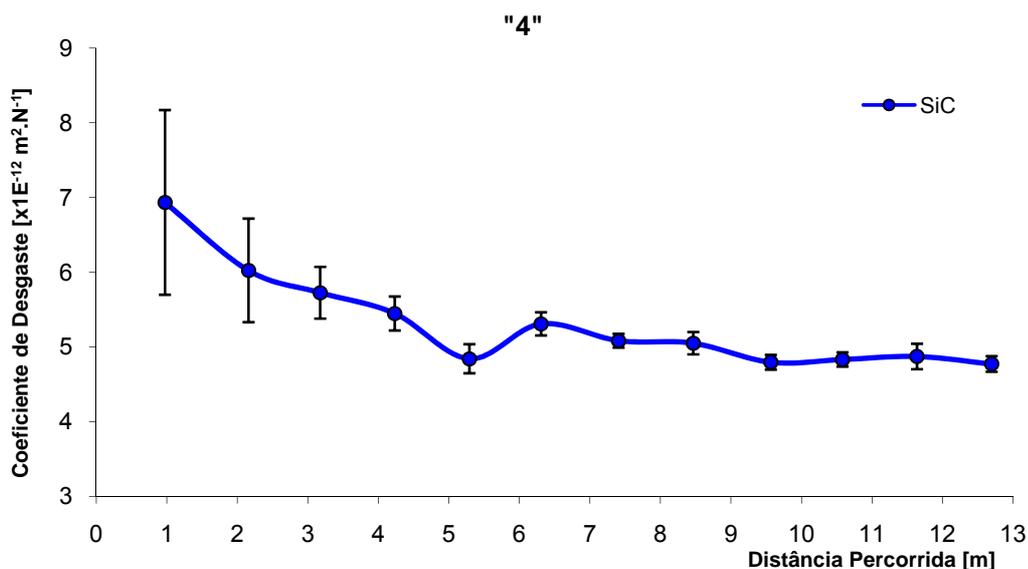


Figura 26 - Curva, com desvio, do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4" com lama abrasiva de SiC.

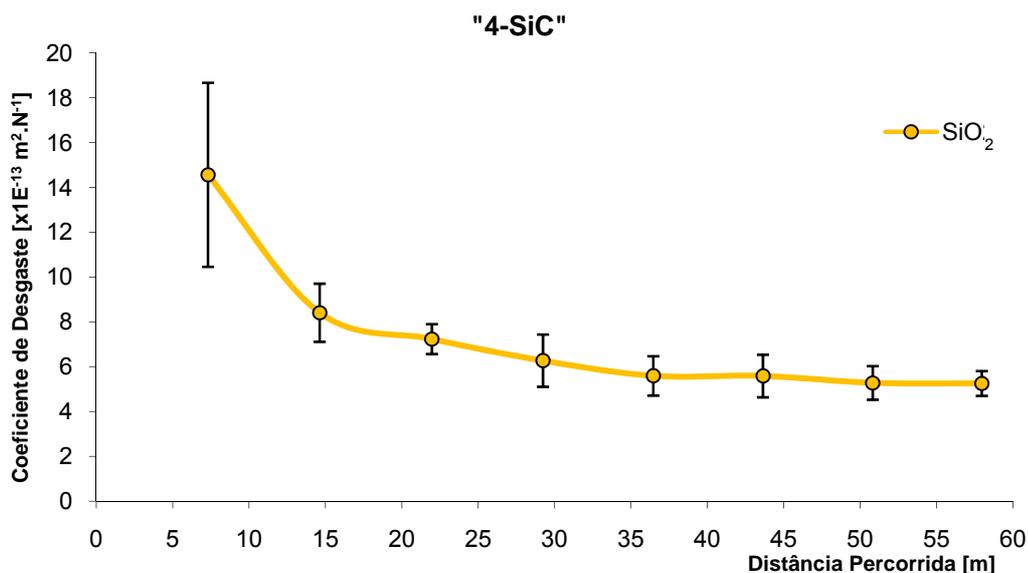


Figura 27 - Curva, com desvio, do coeficiente de desgaste ao longo da distancia percorrida para a matriz "4-SiC" com lama abrasiva de SiO₂.

As curvas de coeficientes de desgaste para os três abrasivos das matrizes "4" e "4-SiC" são mostradas de maneira agrupada nas Figura 28 e Figura 29, respectivamente. As curvas de todas as matrizes com todas as lamelas abrasivas são expostas de maneira semelhante em anexos.

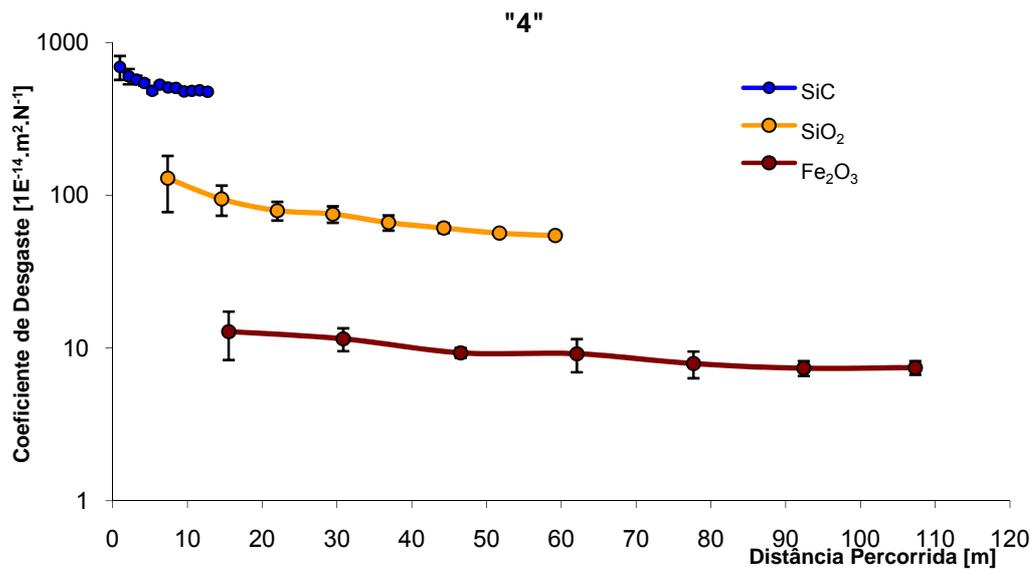


Figura 28 - Curvas de coeficientes de desgaste para os três abrasivos da matriz "4".

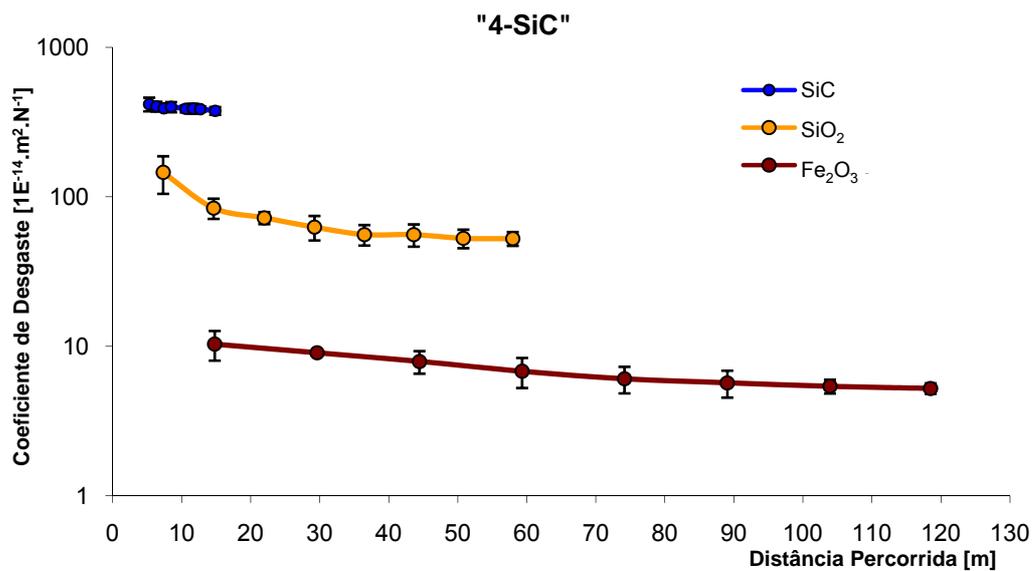


Figura 29 - Curvas de coeficientes de desgaste para os três abrasivos da matriz "4-SiC".

4.4.2. Lama abrasiva de SiC

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 $5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$, onde encontra-se a matriz mais macia. Um grupo onde o desgaste foi intermediário, $4,5 \cdot 10^{-12} < K < 5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$, onde estão os materiais

com dureza elevada ou intermediária. O terceiro e último grupo, com desgaste inferior, abaixo de $4,5 \times 10^{-12}$, como ilustrado na Figura 30.

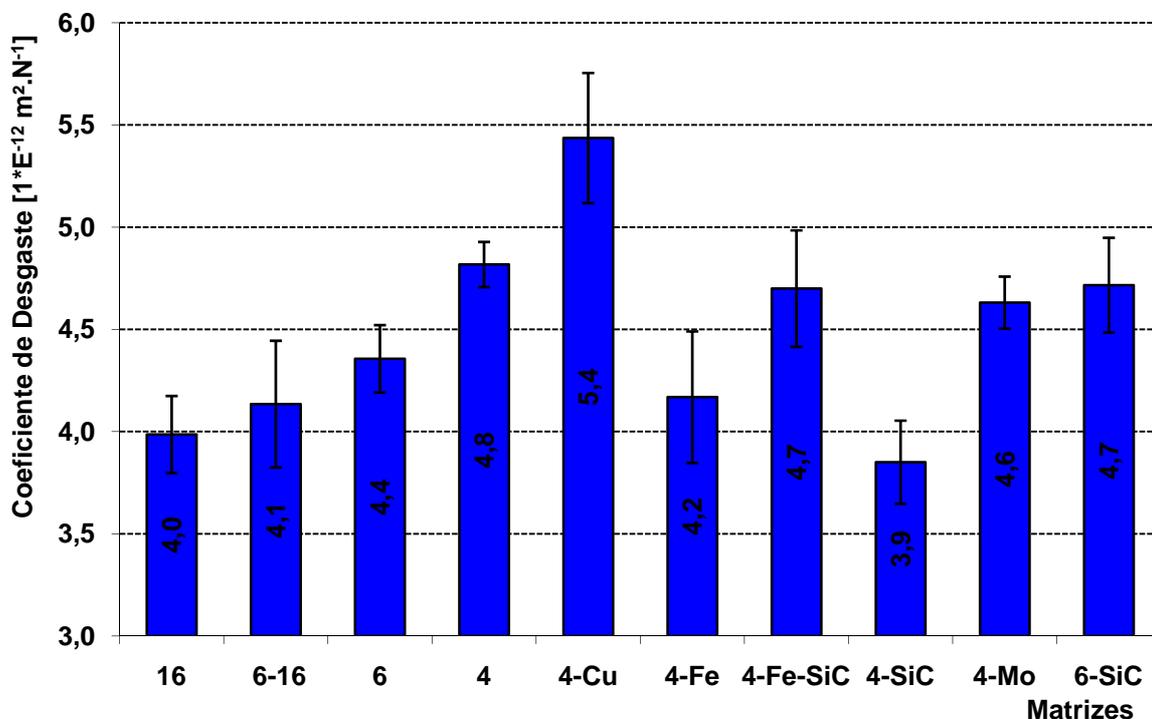


Figura 30 - Coeficientes de desgaste dimensionais com lama abrasiva de SiC.

Neste caso de microabrasão com lama de SiC as matrizes não apresentaram uma correlação entre o desgaste e a dureza do compósito. A Figura 31 mostra um baixíssimo coeficiente de correlação para uma tendência linear.

Já 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 32. 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.

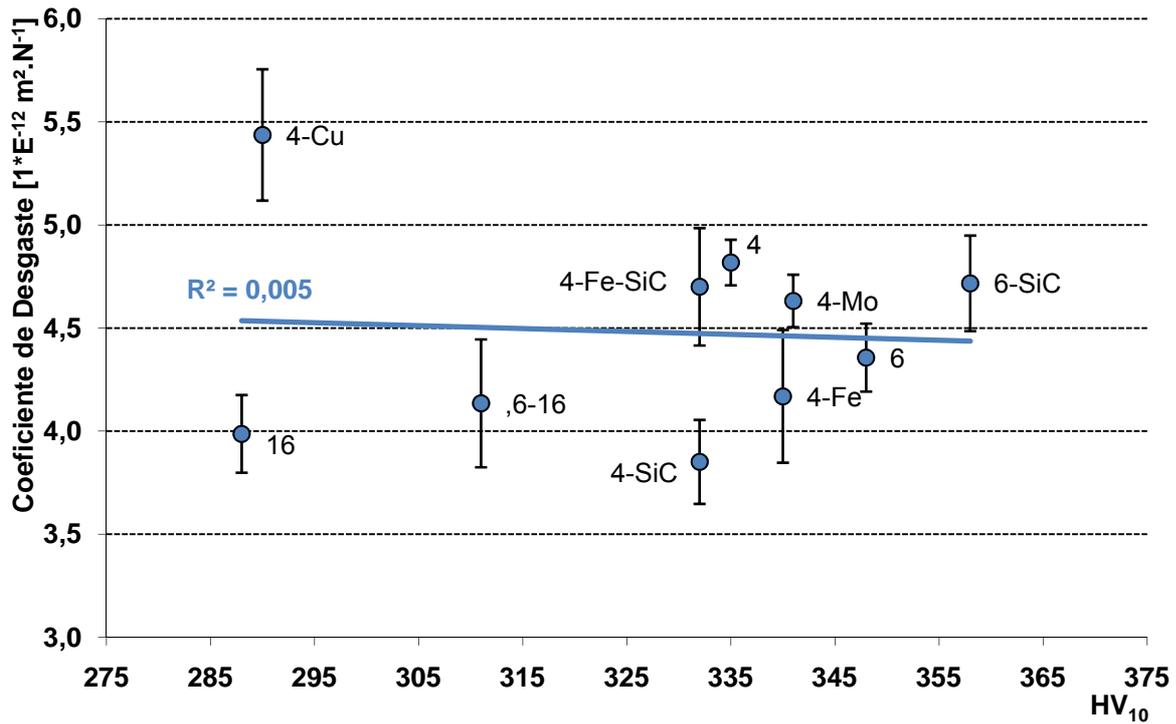


Figura 31 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiC e dureza do compósito.

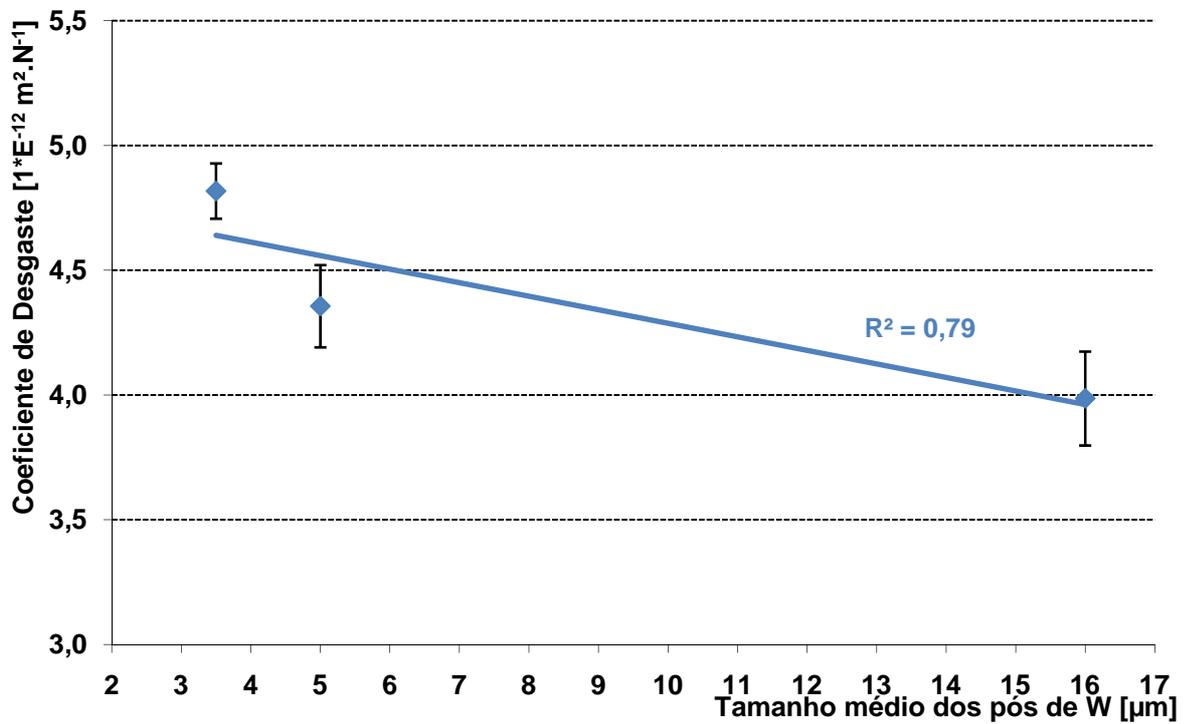


Figura 32 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiC e tamanho médio dos grãos de tungstênio.

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 a Figura 33 e Figura 34.

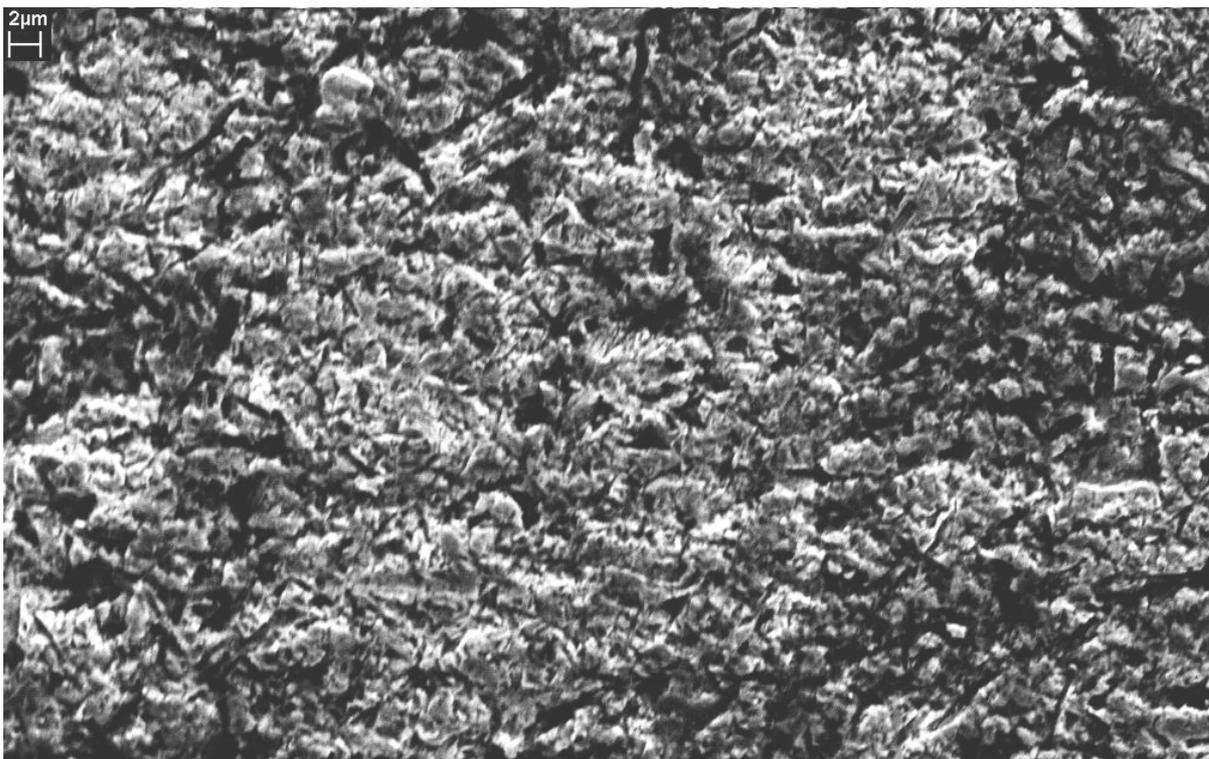


Figura 33 - Micromecanismos de desgaste por indentações múltiplas gerados com lama abrasiva de SiC, MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-Cu”



Figura 34 - Micromecanismos de desgaste por indentações múltiplas gerados com lama abrasiva de SiC, MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-SiC”

4.4.1. Lama abrasiva de Fe_2O_3

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 secundário 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 35.

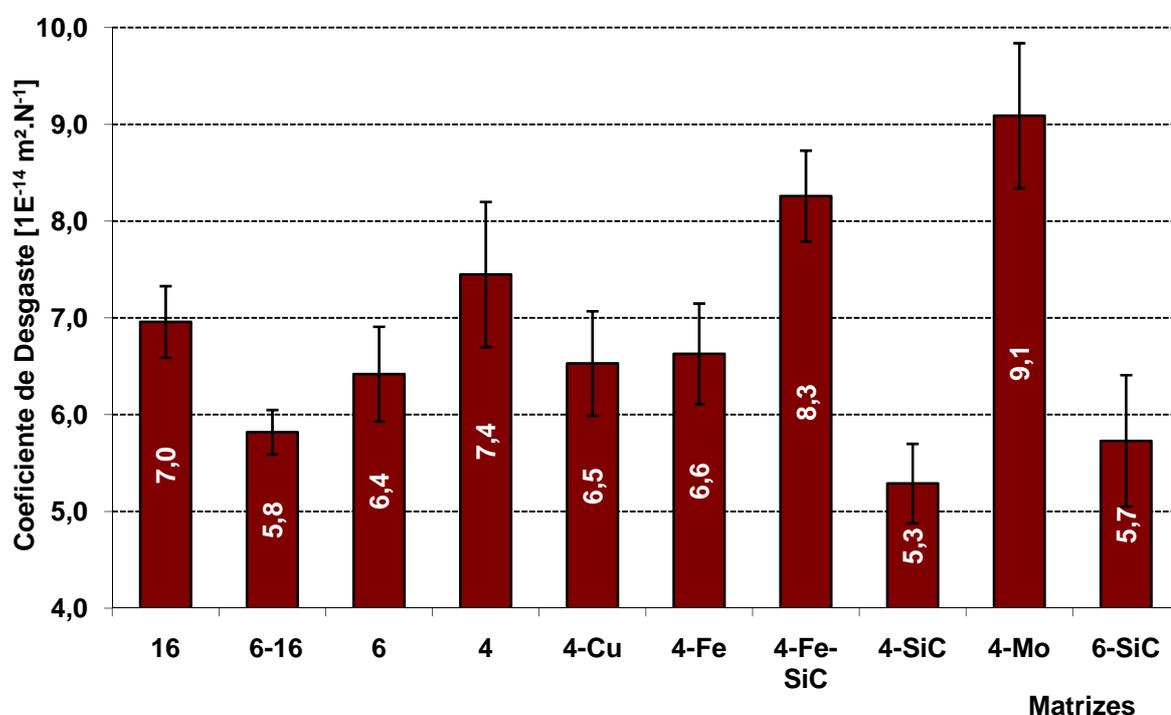


Figura 35 - Coeficientes de desgaste dimensionais com lama abrasiva de Fe_2O_3 .

Neste caso de microabrasão com lama de Fe_2O_3 as matrizes não apresentaram uma correlação entre o desgaste e a dureza do compósito. A Figura 36 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 37 e Figura 38.

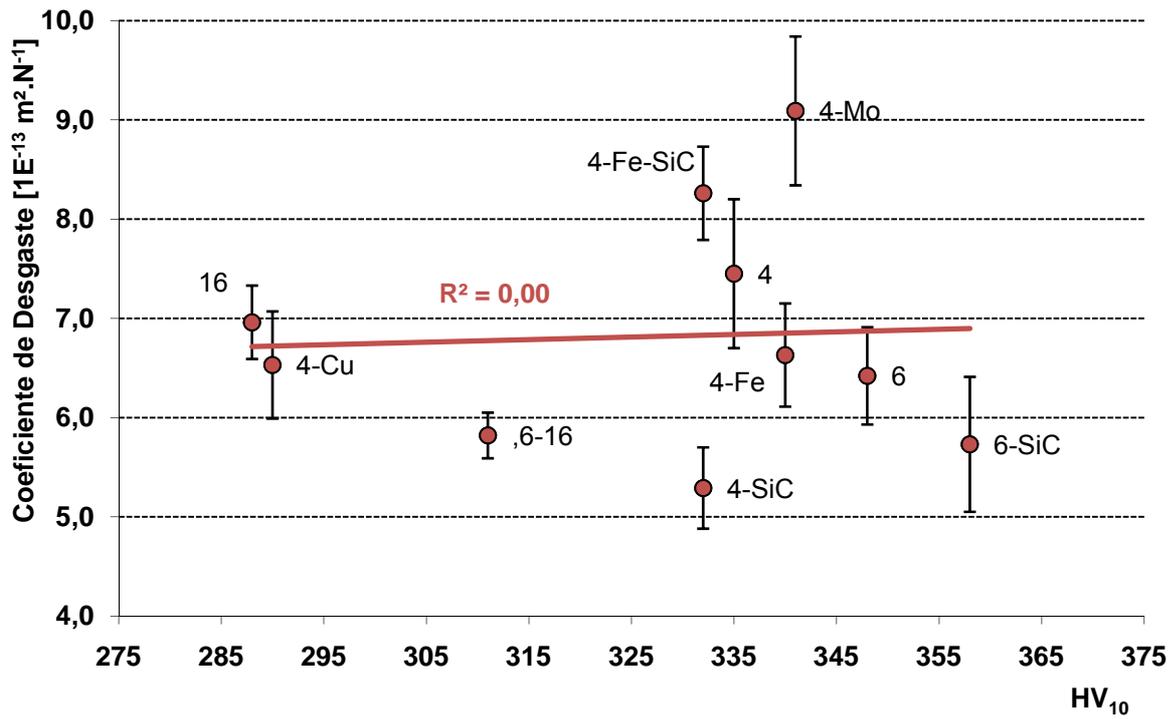


Figura 36 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de Fe_2O_3 e dureza do compósito.

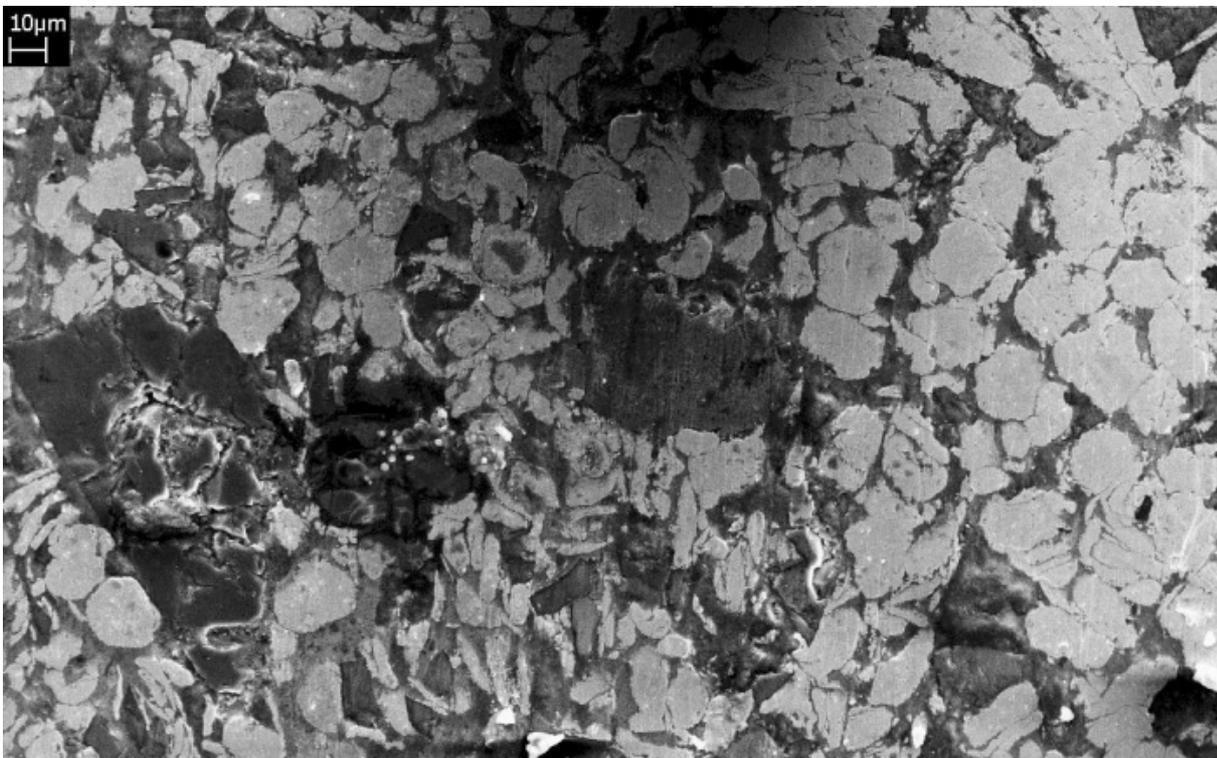


Figura 37 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de Fe_2O_3 , MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-SiC”.



Figura 38 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de Fe_2O_3 , MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-Mo”.

4.4.1. Lama abrasiva de SiO_2

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 como 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 39.

Para o caso com lama abrasiva de sílica também não foi observada correlação entre o desgaste e a dureza, mostrado pela Figura 40. Porém, se consideramos somente as matrizes com tamanho médio dos pós de tungstênio, é possível dizer que as matrizes com de maior dureza apresentaram menor desgaste, mostrado na Figura 41.

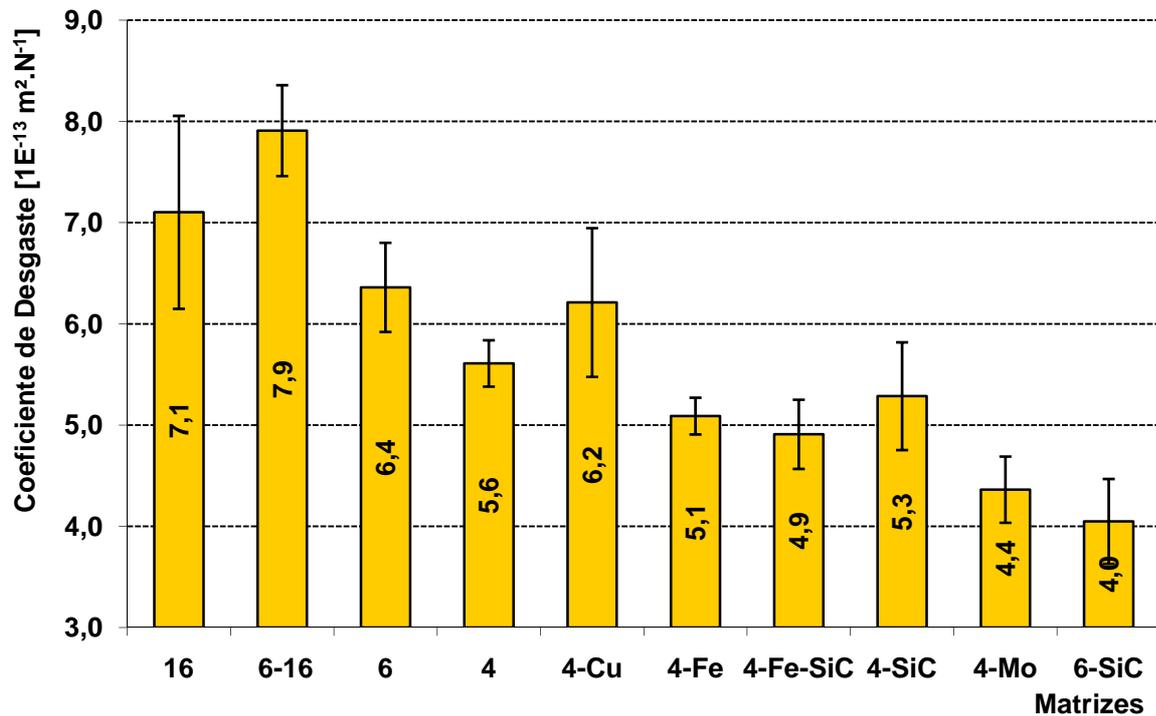


Figura 39 - Coeficientes de desgaste dimensionais com lama abrasiva de SiO₂.

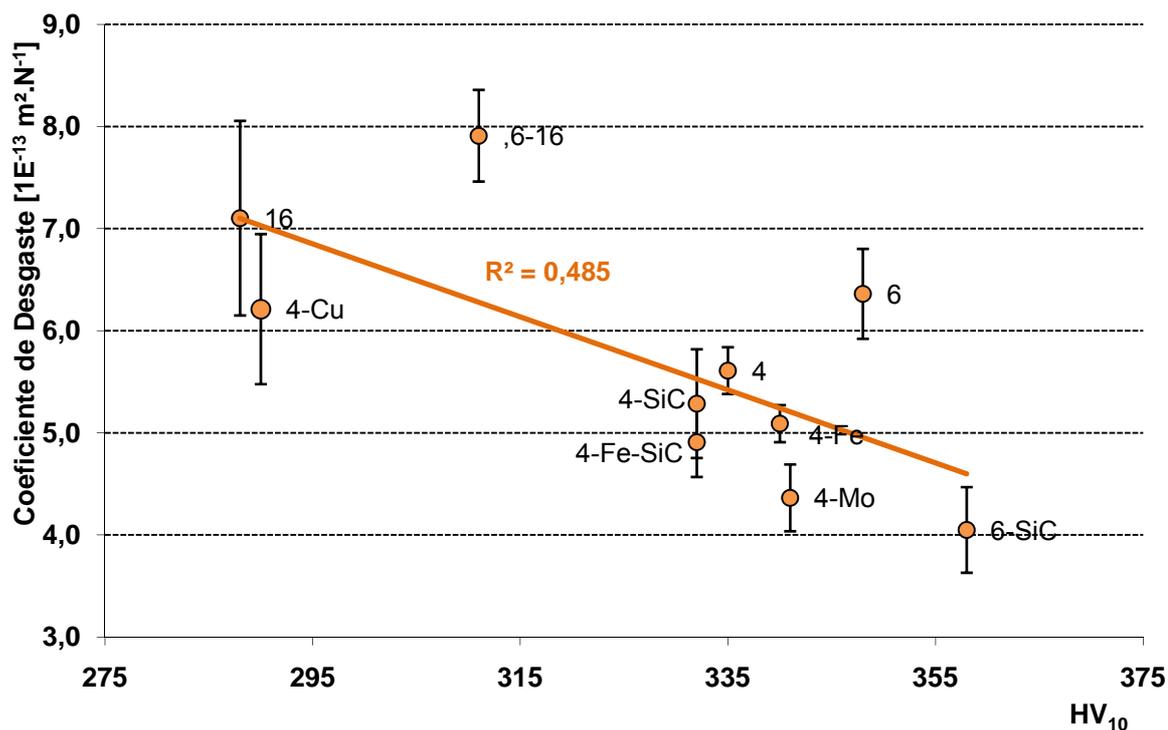


Figura 40 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiO₂ e dureza do compósito.

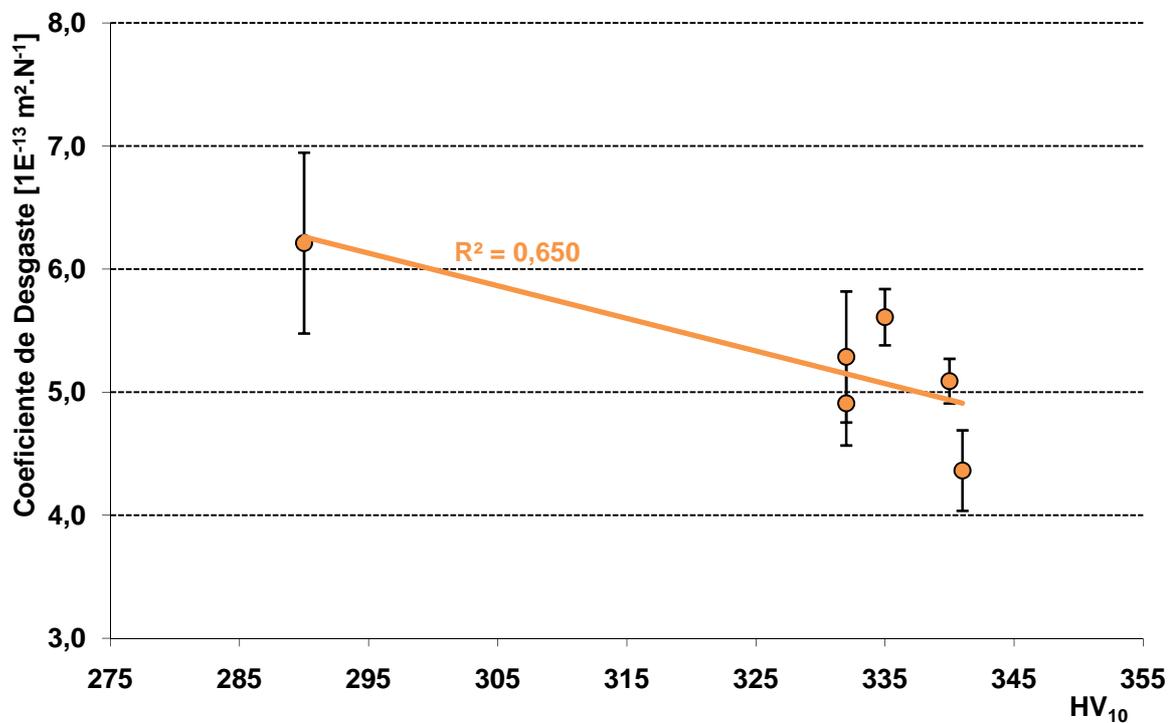


Figura 41 - Correlação do coeficiente de desgaste com lama abrasiva de SiO₂ e dureza do compósito de tamanho médio de pós de tungstênio 3,5 µm.

Comparando os micromecanismos de desgastes predominantes nas matrizes de maior desgaste (“16”) com os de uma de desgaste bem inferior (“4-Fe-Sic”), é visível que estes são riscamento, semelhante ao caso de hematita, como pode ser visto nas Figura 37 e Figura 42, com profundidades de corte muito próximas, porém, com riscos mais largos e mais espaçados entre si.

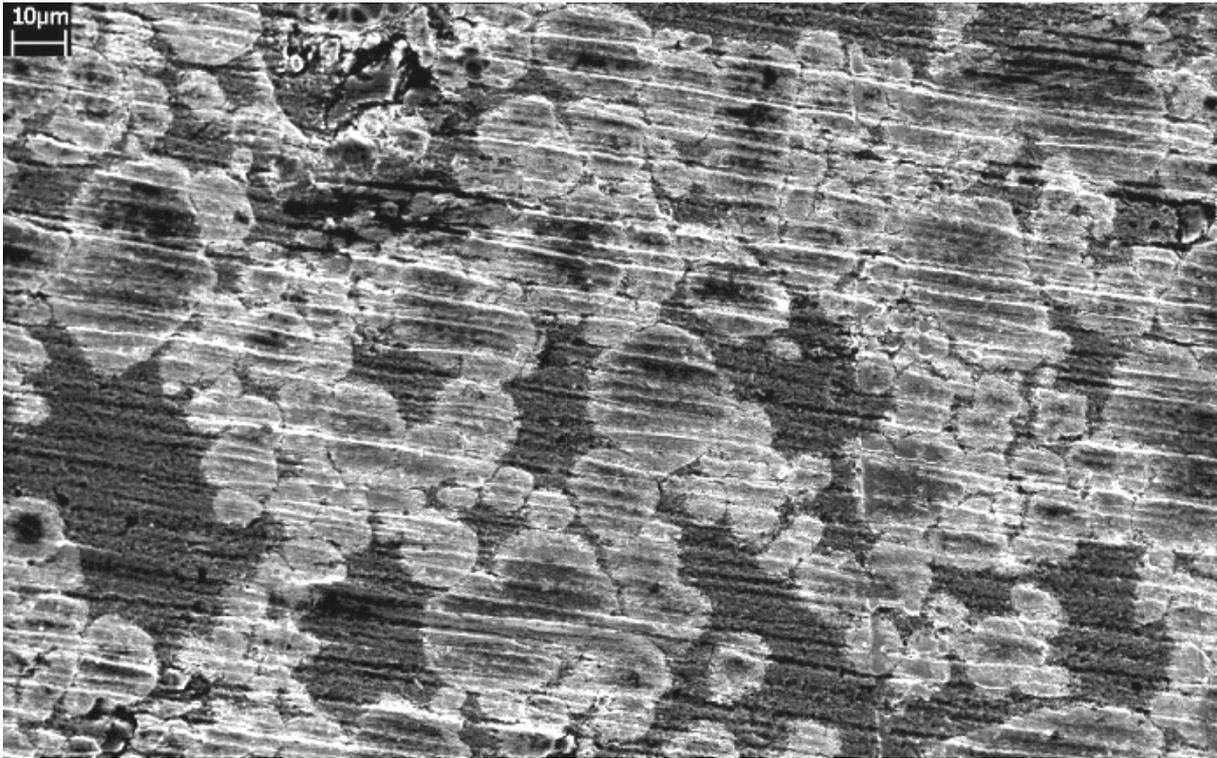


Figura 42 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de SiO_2 , MEV – Elétrons secundários – Matriz “16”.

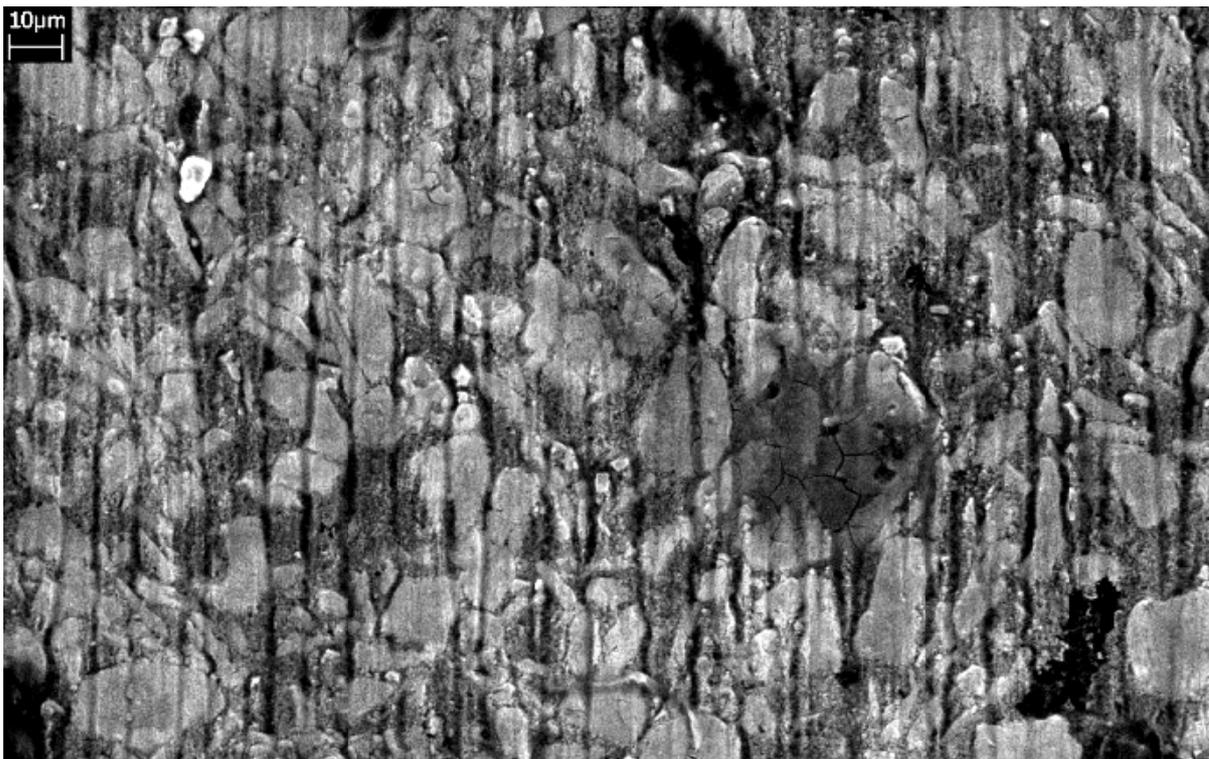


Figura 43 - Micromecanismos de desgaste por deslizamento gerados com lama abrasiva de SiO₂, MEV – Elétrons secundários – Matriz “4-Fe-SiC”.

4.4.2. Discussão geral sobre o desgaste das matrizes

Considerando apenas os materiais que contém somente pós de tungstênio e latão, o caso de lama abrasiva de SiC, há uma boa correlação entre a diminuição do coeficiente de desgaste dimensional e o aumento do tamanho médio do pó de tungstênio, assim como o decréscimo da dureza. Já para os demais abrasivos, não há esta correlação.

Semelhante ao caso com lama abrasiva de carbetto de silício tem-se o caso da hematita, onde aumentando a dureza do compósito aumenta-se, também, o coeficiente de desgaste, exceto para a matriz “16”. Para o caso com lama abrasiva de sílica, aumentando a dureza do compósito aumenta-se a resistência ao desgaste.

A adição da liga de Cu aos pós de 3,5 μm levou a um aumento da fração volumétrica de infiltrante (31%), sendo que a matriz “4-Cu” apresentou o maior desgaste para SiC, menor para Fe_2O_3 porém estatisticamente igual á liga sem adição para lama abrasiva de SiO_2 , comparando com a matriz “4”.

Para os casos com a presença de abrasivo secundário (SiC) dispersos na matriz, que não alteram o valor de dureza para a granulometria média de 3,5 μm de tungstênio, aumentam o desgaste quando junto à adição de Fe e o reduzem nos demais casos.

A adição de molibdênio, não alterou o valor de dureza da matriz, mas, o desgaste foi inferior para as lamas de SiC e SiO_2 , redução mais expressiva para a última, o que aconteceu de maneira inversa para a lama de Fe_2O_3 .

4.4.3. Mecanismo duplo de desgaste

Como discutido na seção 4.4 os micromecanismos de desgaste predominantes para as lamas 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 mecanismos de riscamento encontrados na literatura.

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 das Figura 44 e Figura 45.

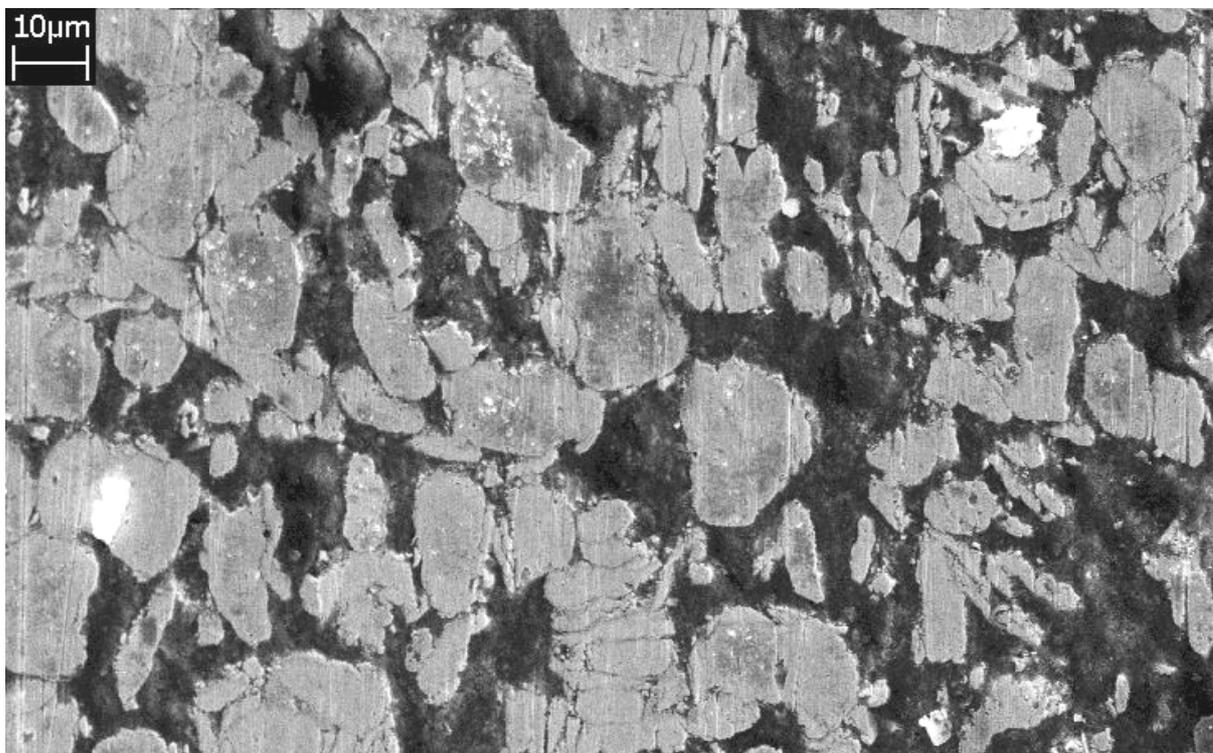


Figura 44 - Mecanismo duplo de desgaste provocado por lama abrasiva de Fe_2O_3 na matriz "4-Cu".

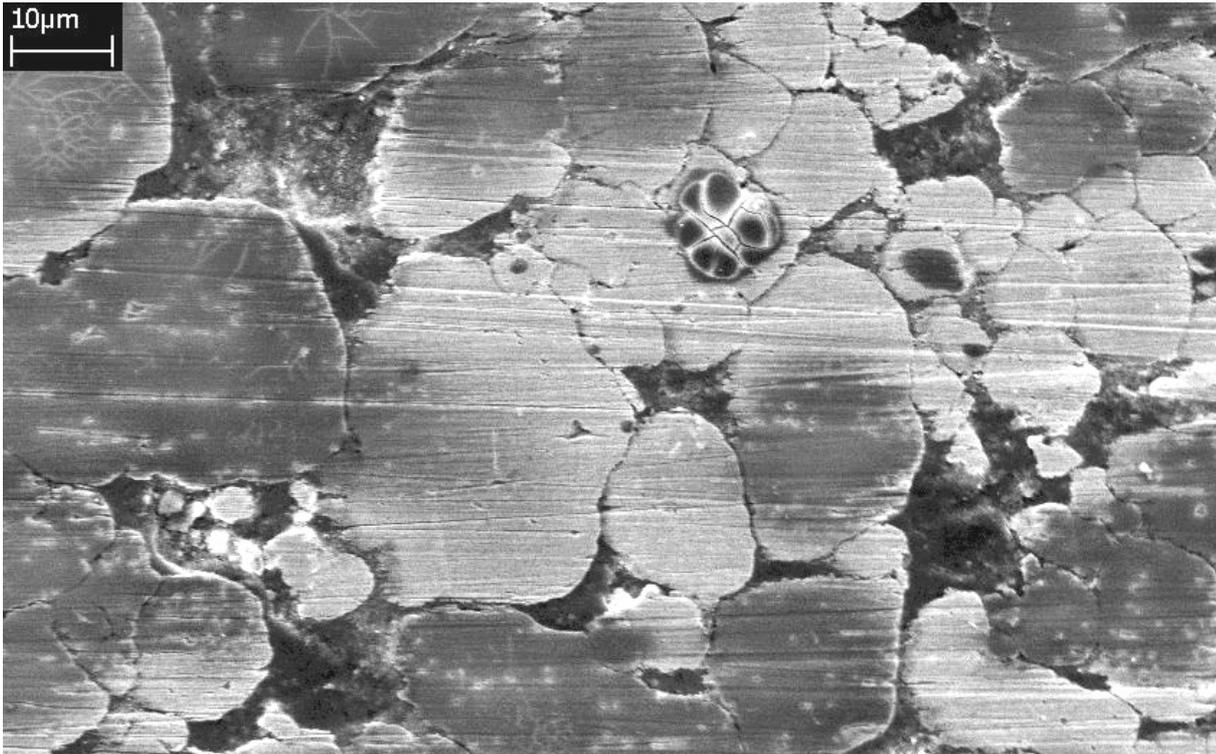


Figura 45 - Mecanismo duplo de desgaste provocado por lama abrasiva de Fe_2O_3 na matriz "16".

4.4.4. Severidade de desgastes para diversas lamas abrasivas

A severidade de desgaste pode ser considerada pela relação entre a dureza do abrasivo e a dureza do compósito, que é relacionado com o coeficiente de desgaste na Figura 46. Onde é representado que para relações H_a/H_c entre 2 e 4 o coeficiente de desgaste encontra-se próximo de $1 \cdot E^{-3}$ (escala logarítmica), 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. [34]

As durezas médias dos abrasivos SiC, SiO_2 e Fe_2O_3 são, respectivamente, 2600 [35], 1100 [36] e 1000 [37] HV.

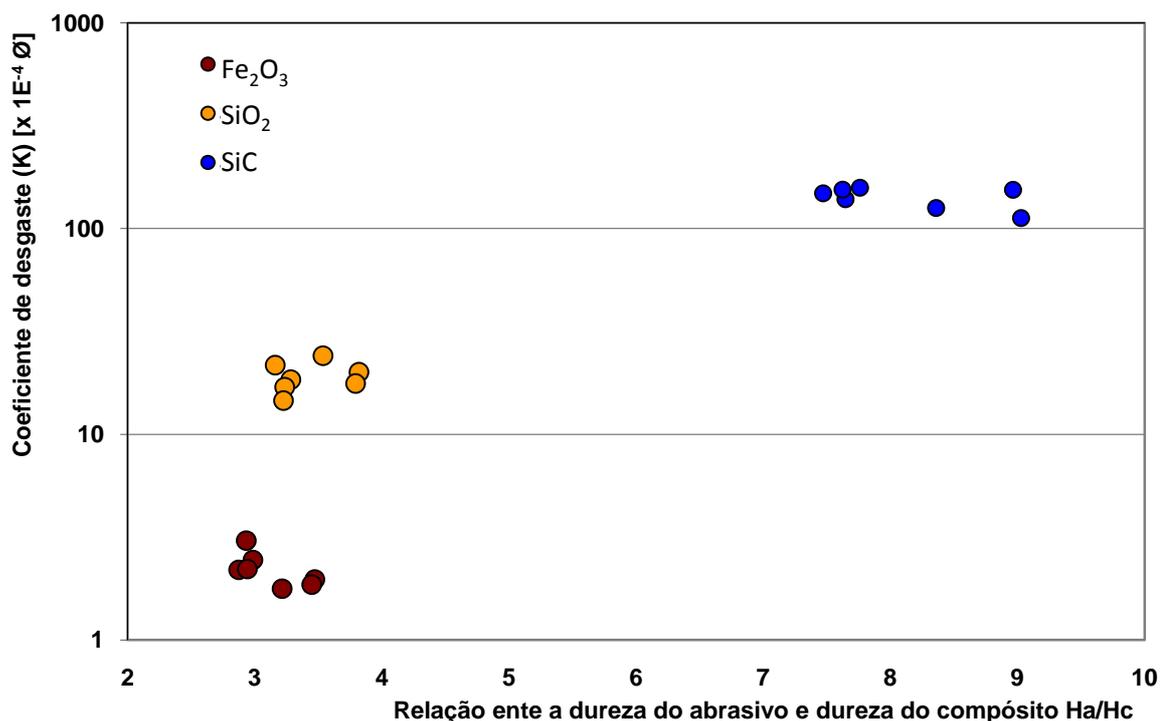
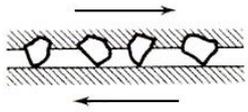
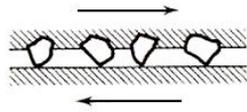
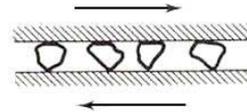


Figura 46 - Comparação do coeficiente de desgaste adimensional e a relação entre a dureza do abrasivo e do compósito.

Os coeficientes de desgaste médio para os três abrasivos, a dureza média dos abrasivos, relação H_a/H_c , mecanismos predominantes de desgaste e a ordem de grandeza dos coeficientes dimensionais são relacionados na Tabela 3. Nela, as situações que apresentaram menores coeficientes de desgaste, lama abrasiva de SiO_2 e Fe_2O_3 , estão correlacionadas 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. A Tabela 3 também mostra quantas vezes um dado sistema com determinada lama abrasiva foi mais severo que outro.

Analisando as situações em que ocorreram mecanismos de deslizamento de partículas, o caso com lama abrasiva de hematita provocou um desgaste inferior, provavelmente, devido às menores larguras e espaçamentos entre riscos provocados pelos grãos abrasivos, o que pode ser visto nas microscopias eletrônica de varredura (ver anexos), visto que as profundidades dos riscos (S_a e S_q) são semelhantes, aproximadamente, $0,4 \mu m$.

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

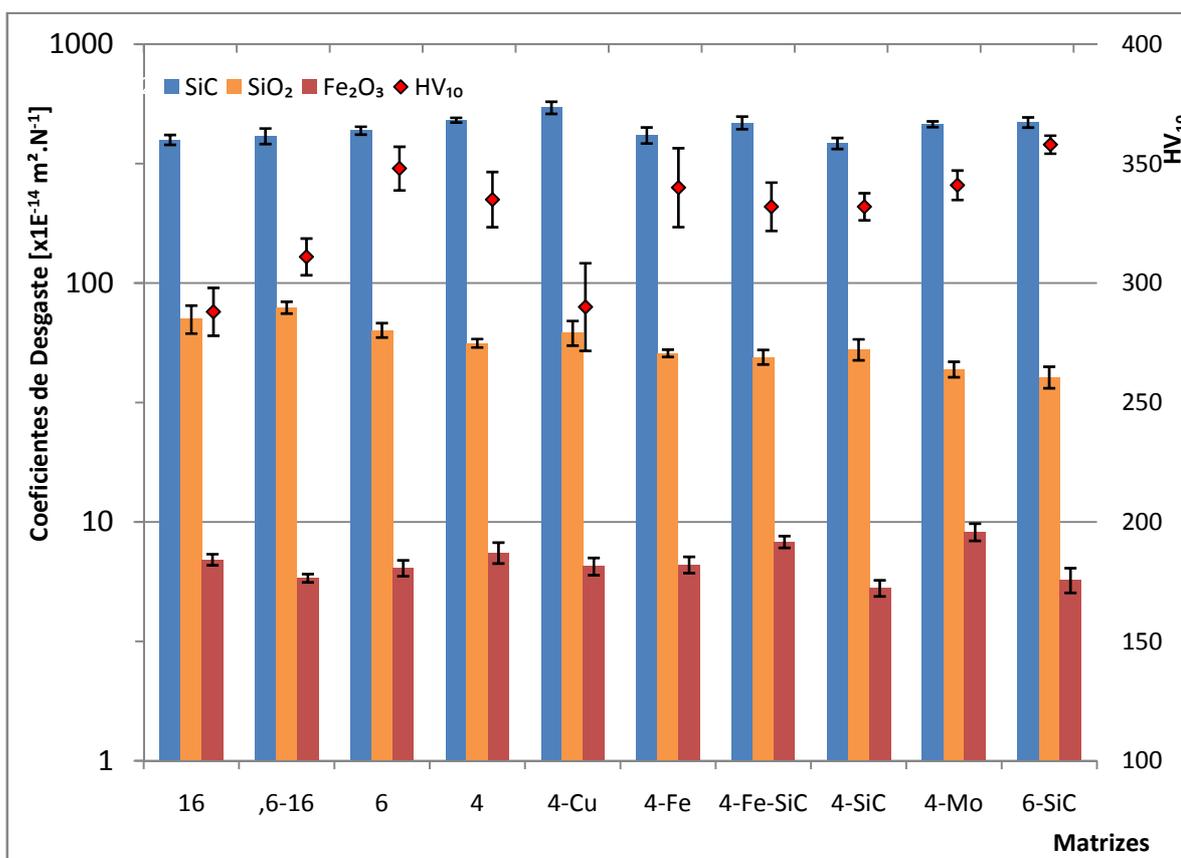
Lama abrasiva	Fe_2O_3	SiO_2	SiC
Dureza média do abrasivo	1000 HV	1100 HV	2600 HV
Relação H_a/H_c média	$3,1 \pm 8 \%$	$3,4 \pm 8 \%$	$8,0 \pm 8 \%$
Mecanismos predominantes de desgaste	 Deslizamento	 Deslizamento	 Indentações múltiplas
$\bar{K}_{Fe_2O_3} / \bar{K}_{...}$	1	0,12	0,02
$\bar{K}_{SiO_2}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

4.5. RESULTADOS SUMARIZADOS

Os resultados sumarizados obtidos neste trabalho, discutidos nas seções anteriores, são expostos em conjunto na Tabela 4 e na Figura 47. Nelas, o caráter sistêmico do desgaste fica bem evidente, visto que a classificação qualitativa das amostras é diferente para cada lama abrasiva utilizada.

Tabela 4 - Dados de dureza Vickers e coeficiente de desgaste adimensional para SiC, SiO₂ e Fe₂O₃

Materiais	Dureza		Coeficiente de Desgaste					
	HV ₁₀	CV %	Abrasivo - SiC		Abrasivo - SiO ₂		Abrasivo - Fe ₂ O ₃	
			K [m ² /N]	CV %	K [m ² /N]	CV %	K [m ² /N]	CV %
16	288	3,5%	3,99E ⁻¹²	4,7%	7,10E ⁻¹³	13,4%	6,96E ⁻¹⁴	5,3%
,6-16	311	2,5%	4,13E ⁻¹²	7,5%	7,91E ⁻¹³	5,7%	5,82E ⁻¹⁴	4,0%
6	348	2,6%	4,36E ⁻¹²	3,8%	6,36E ⁻¹³	6,9%	6,42E ⁻¹⁴	7,6%
4	335	3,5%	4,82E ⁻¹²	2,3%	5,61E ⁻¹³	4,1%	7,45E ⁻¹⁴	10,1%
4-Cu	290	6,3%	5,44E ⁻¹²	5,9%	6,21E ⁻¹³	11,8%	6,53E ⁻¹⁴	8,3%
4-Fe	340	4,9%	4,17E ⁻¹²	7,7%	5,09E ⁻¹³	3,6%	6,63E ⁻¹⁴	7,8%
4-Fe-SiC	332	3,1%	4,70E ⁻¹²	6,1%	4,91E ⁻¹³	7,0%	8,26E ⁻¹⁴	5,7%
4-SiC	332	1,7%	3,85E ⁻¹²	5,3%	5,29E ⁻¹³	10,1%	5,29E ⁻¹⁴	7,8%
4-Mo	341	1,8%	4,63E ⁻¹²	2,8%	4,36E ⁻¹³	7,5%	9,09E ⁻¹⁴	8,3%
6-SiC	358	1,1%	4,72E ⁻¹²	4,9%	4,05E ⁻¹³	10,4%	5,73E ⁻¹⁴	11,9%

Figura 47 - Dureza e coeficientes de desgaste para as matrizes ensaiadas com lamas abrasivas de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Desta dissertação de mestrado foram tiradas 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.

CAPÍTULO VI

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

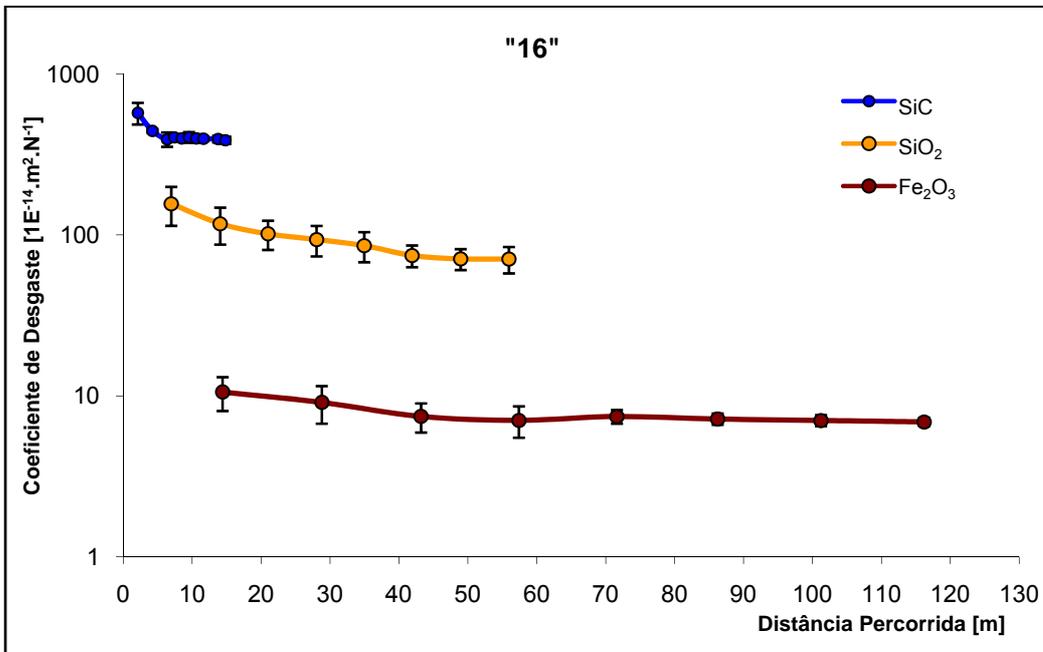
- [1] HUANG, S.L.; WANG, Z.W. - The Mechanics of Diamond Core Drilling of Rocks - **Int. J. Rock Mech. & Min.Sci.** v. 34. pp. 3-4, 1997.
- [2] DWAN, J. D. - Manufacture of Diamond Impregnated Metal Matrixes - **Materials Science and Technology**, v. 14, pp. 896-900, 1998.
- [3] DIMATEC INC. - **Diamond Drilling Tools & Precision Machining.** - Field Manual, 2001.
- [4] DWAN, J. D. - Manufacture of Diamond Impregnated Metal Matrixes. **Materials Science and Technology** - v. 14, pp. 896-900, 1998.
- [5] RANDALL, M. G. - **Sintering Theory and Practice.** - NY, John Wiley & Sons. 1996. 550p.
- [6] GERMAN, R. M. - **Powder Metallurgy Science.** - Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 1984. pp. 209-210.
- [7] GERMAN, R. M. - **Liquid Phase Sintering.** - Plenum Press, New York, 1985. pp. 160-162.
- [8] DWAN, J. D. - Production of Diamond Impregnated Cutting Tools. - **Powder Metallurgy**, v. 41, n. 2, pp. 84-86, 1998.
- [9] DWAN, J. D. - Diamond Impregnated Tool Manufacturing and Utilization of 'Diamond Pro' Software. EURO PM 99. - **International Workshop On Diamond Tool Production, Diamond Tool Manufacture & Powder Metallurgy**, pp. 24-27, november, 1999.

-
- [10] GERMAN, R. M. - **Sintering Theory and Practice**. - John Wiley & Sons, Inc, 1996. pp. 385-389.
- [11] CACERES, P. G. - Effect of Microstructure on the Abrasive Wear Properties of Infiltrated Tungsten Alloys. - **Materials Characterization**, n. 49, pp. 1-9, 2002.
- [12] DING, H.; LI, Y.; YANG, X.; HÃO, H.; JIN, Z. - Design of a Non-Homogeneous Diamond bit matrix. - **Journal of Materials Processing Technology**, n. 84, pp. 159-161, 1998.
- [13] STOCKWELL B. H. - An introduction to the metallurgy of diamond tools. - **Macro Technology Team, Kennametal**. Pennsylvania, USA, 2000.
- [14] HSIEH, Y. Z.; LIN, S. T. - Diamond tool bits with iron alloy as the bonding matrix. - **Materials Chemistry and Physics**. n. 72, pp. 121-125, 2001.
- [15] DOR F., Lay S., EUSTATHOPOULOS N., ALLIBERT C.H. - Segregation of Fe During the Sintering of Doped W–Cu Alloys. - **Scripta Materialia**, 49, pp. 237–242, 2003.
- [16] GASIK, M.; KERVINEN, P.; KASKIALA, M.; GRAF, P. - In Situ Sintering Studies of Cobalt Powders for Diamond Tools. EURO PM 99. - **Proceedings, International Workshop On Diamond Tool Production**. Turin-Italy, pp. 107-112, november, 1999.
- [17] KONSTANTY, J. - **Industrial Diamond Review**, A. 1, n. 51, pp. 27-31, 1991.
- [18] BESTE, U.; HARTZELL, T; ENGQVIST, H.; AXÉN, N. - Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons. - **Wear**, 249, pp. 324–329, 2001.

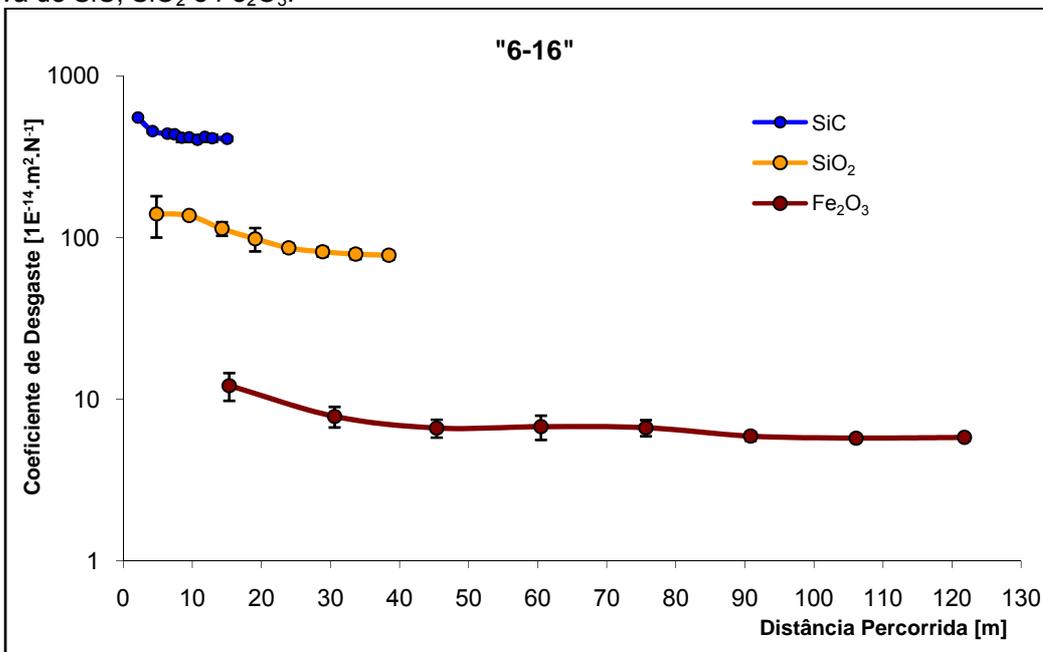
- [19] EROGLU S.; BAYKARA T. - Effects of powder mixing technique and tungsten powder size on the properties of tungsten heavy alloys. - **Journal of Materials Processing Technology**, 103, pp.288:292, 2000.
- [20] HOUCK, D. L.; SPENCER J. R. - Ductility of W/Cu alloys tungsten and refractory metals. - **Proceedings of the third international conference on tungsten and refractory metals**, Metal Powder Industries Federation (MPIF), USA, v. 3, pp. 21-8, 1995.
- [21] CLARK, T. J.; DEVRIES, R. C. - "Superabrasives and Ultrahard Tool Materials". - **ASM Metals Handbook**, v. 2, 10 th edition, pp. 1008-1018, 1990.
- [22] KRAR, S. F.; RATTERMAN, E. - **Superabrasives - Grinding and Machining with CBN and Diamond**. - McGraw-Hill, New York, 1990.
- [23] NAIDICH, Y. H.; UMANSKI, V. P. AND LAVRINENKO, I. A. - **Industrial Diamond Review**, v. 44, pp. 327-328, 1984.
- [24] MORRIS D. G., BENGHALEM A., e MORRIS-MUNOZ, M A. - **Scripta Materialia**; vol 41, n 10, pp. 1123-1130, 1999
- [25] SAKAI, Y. e SCHNEIDER-MUNTAU, H-J. - **Acta Mater**; vol 45, n 3, pp 1017-1023, 1997
- [26] HAWK, J. A.; ALMAN, D. E. - Abrasive wear of intermetallic based alloys and composites. - **Materials Science Engineering**, pp. 239-240, 1997.
- [27] MILLER, D.; BALL, A. - The wear of Diamonds in impregnated diamond bit drilling. - **Wear**, n. 141, pp. 311-320, 1991.
- [28] RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS I. M. - Theory and Application of a Micro-Scale Abrasive Wear Test. - **Journal of Testing and Evaluation**, JTEVA, A. 2, v. 25, pp. 250-260, march, 1997.

-
- [29] RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS I. M. - A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. - **Surface Coating Technology**, march, 1995.
- [30] 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.
- [31] ALLSOPP, D. N., TREZONA, R. I., HUTCHINGS, I. M. - The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive test. - **Tribology Letters** 5, p. 259–264, 1998.
- [32] LOZZER, A. M., DE MACÊDO, M. C. S., DE MELLO, J. D. B., SCANDIAN, C. - Influência da qualidade superficial do contra-corpo no ensaio de microabrasão com esfera livre em compósitos de matriz metálica a base de tungstênio. - **Anais – 62º Congresso anual da ABM**, pp. 4286-2471, 2007.
- [33] UPADHYAYA, G. S.; SRIKANTH, V. - Effect of Tungsten Particle Size on Sinterized Properties of Heavy Alloys - **POWDER TECHNOLOGY** - v. 39, pp. 61-67, 1984.
- [34] ZUM GAHR, K.H. – **Microstructure and Wear of Materials** – Elsevier, pp. 94, 1987.
- [35] HUTCHINGS, I. M. – **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials** – CRC Press, Boca Raton, pp. 137, 1992.
- [36] ZUM GAHR, K.H. – **Microstructure and Wear of Materials** – Elsevier, pp. 169, 1987.
- [37] SKOCZYNSKI, R. J.; WALMAG, G.; BREYER, J. P. – Improvement of the Work Roll Performance on 2050mm Hot Strip Mill at Iscor Flat Steel Products – **Saruck Conference**, Vanderbijlpark, Gauteng, South Africa, pp. 19-25, 1997.

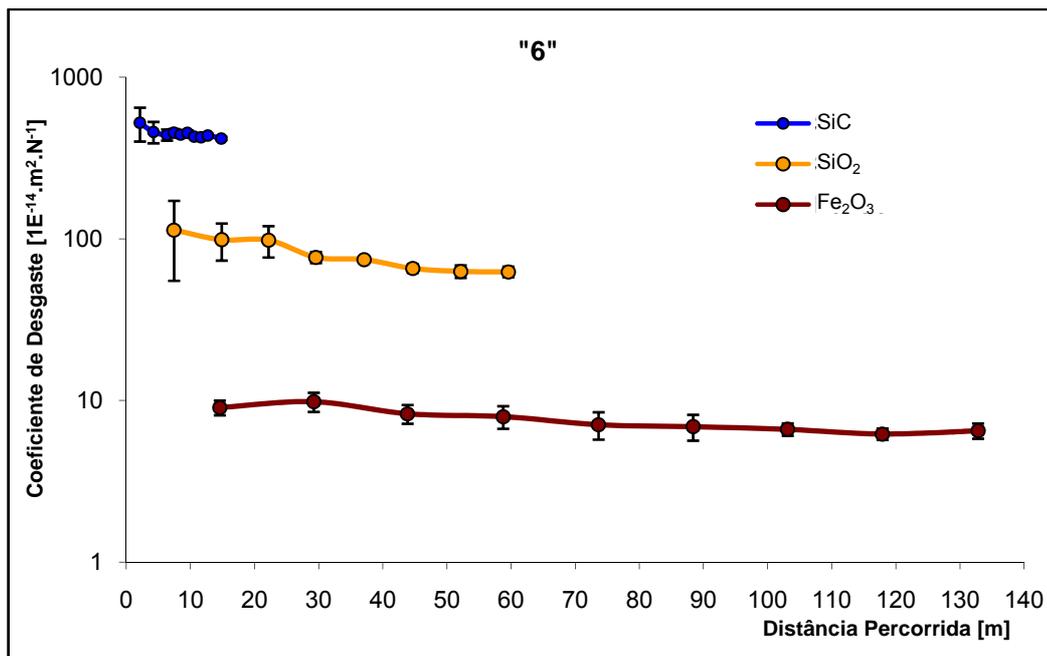
ANEXO



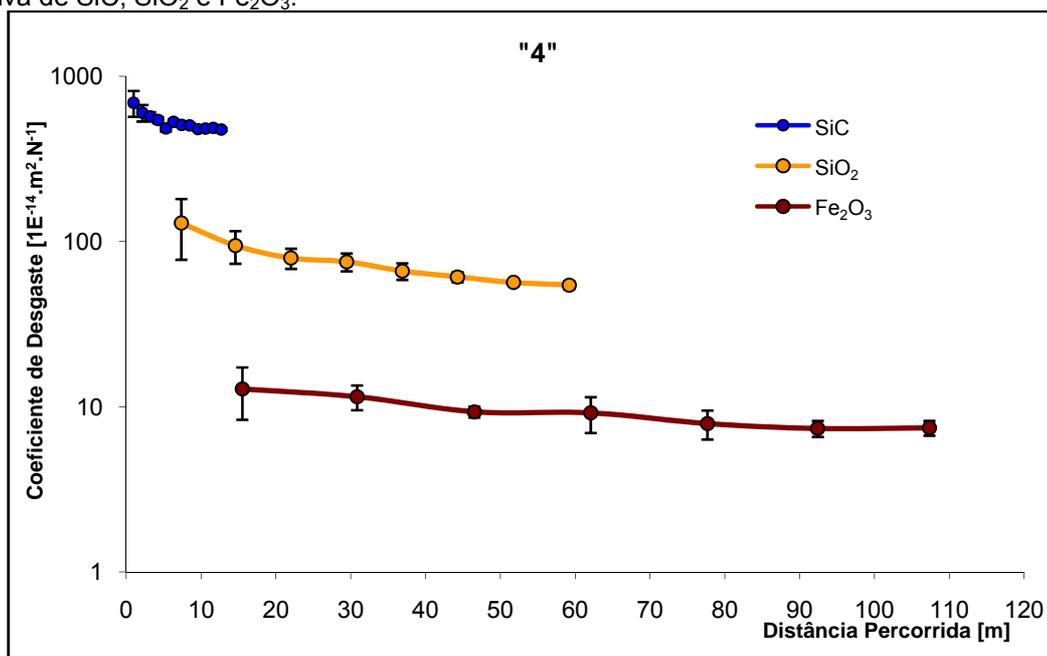
Coeficiente de desgaste dimensional ao longe de distância percorrida para a matriz "16" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



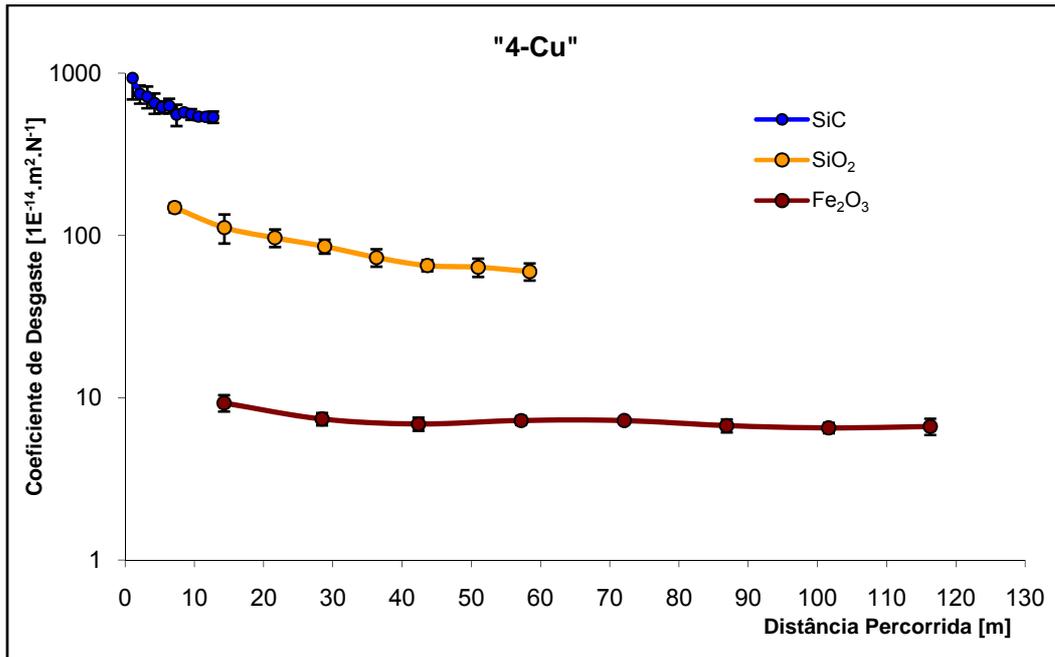
Coeficiente de desgaste dimensional ao longe de distância percorrida para a matriz "6-16" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



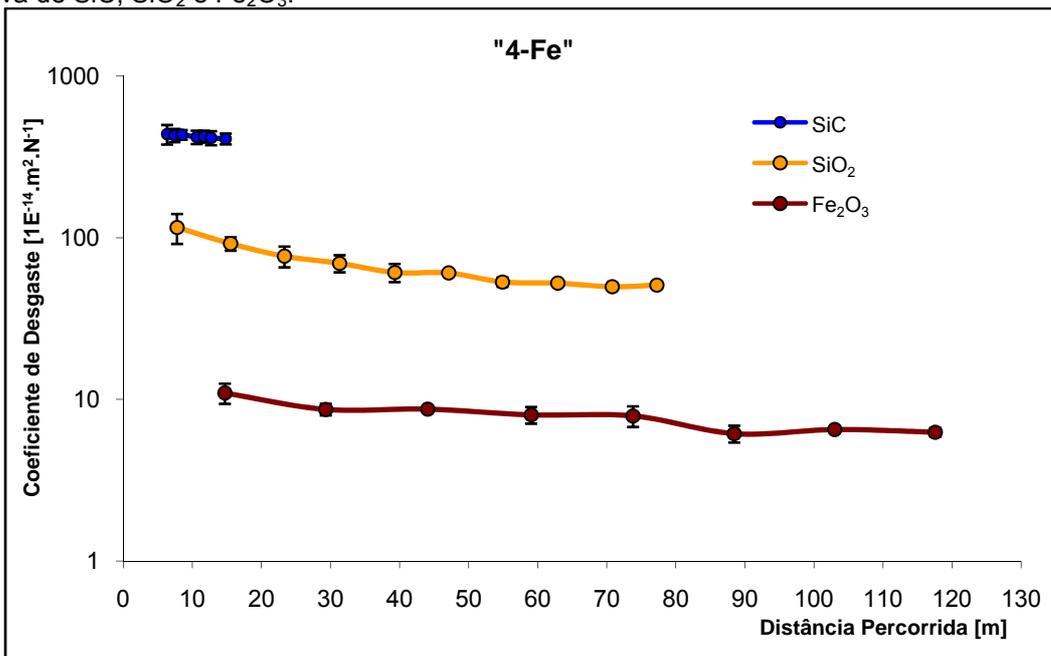
Coeficiente de desgaste dimensional ao longe de distância percorrida para a matriz "6" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



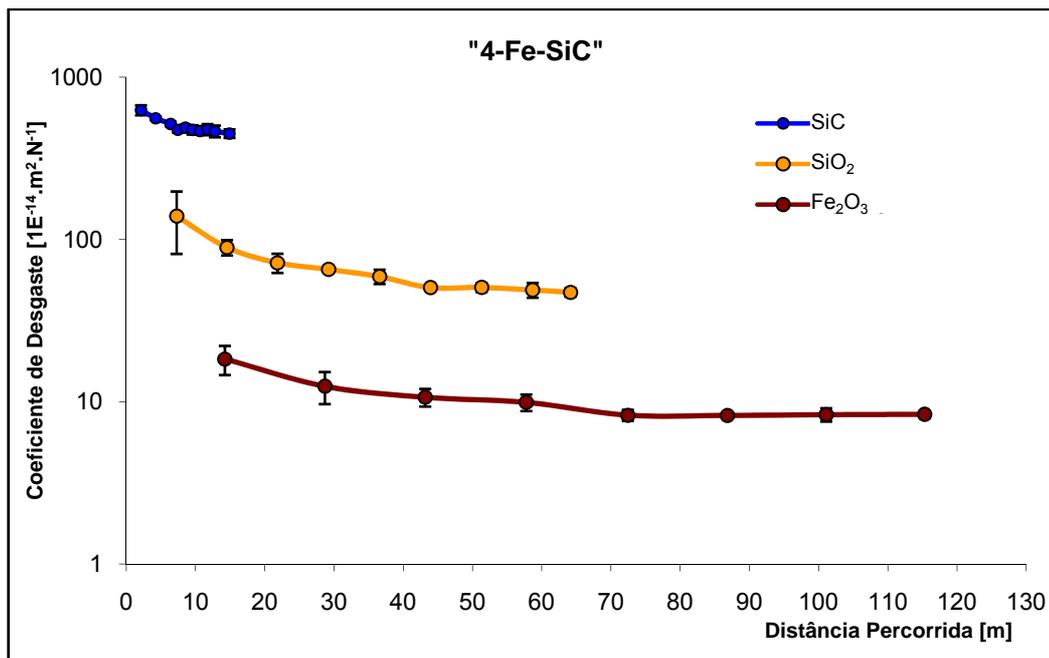
Coeficiente de desgaste dimensional ao longe de distância percorrida para a matriz "4" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



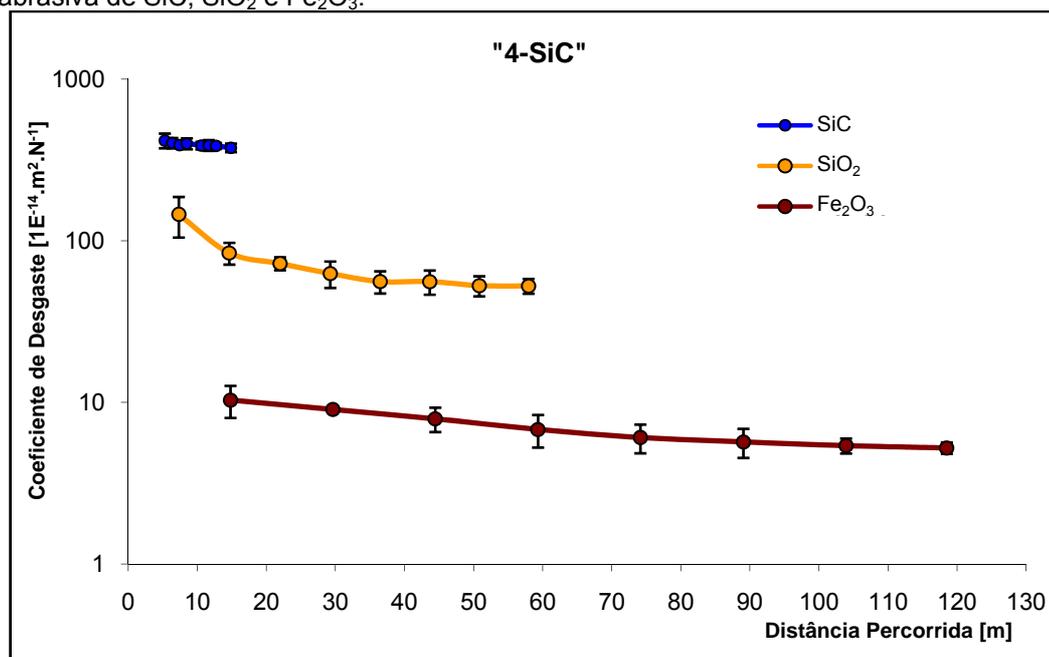
Coefficiente de desgaste dimensional ao longo de distância percorrida para a matriz "4-Cu" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



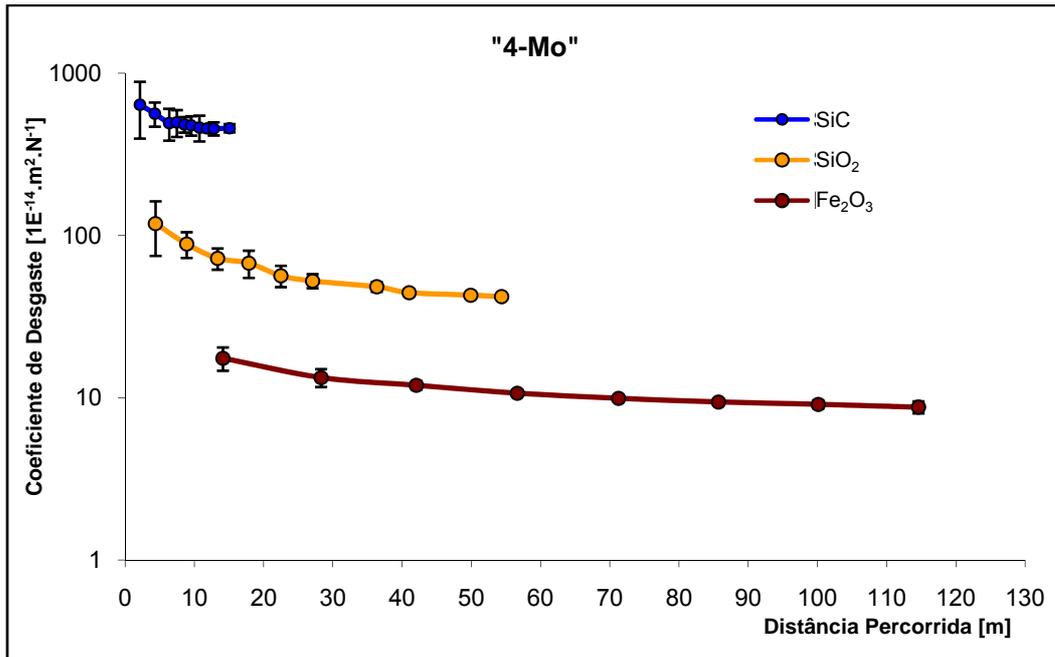
Coefficiente de desgaste dimensional ao longo de distância percorrida para a matriz "4-Fe" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



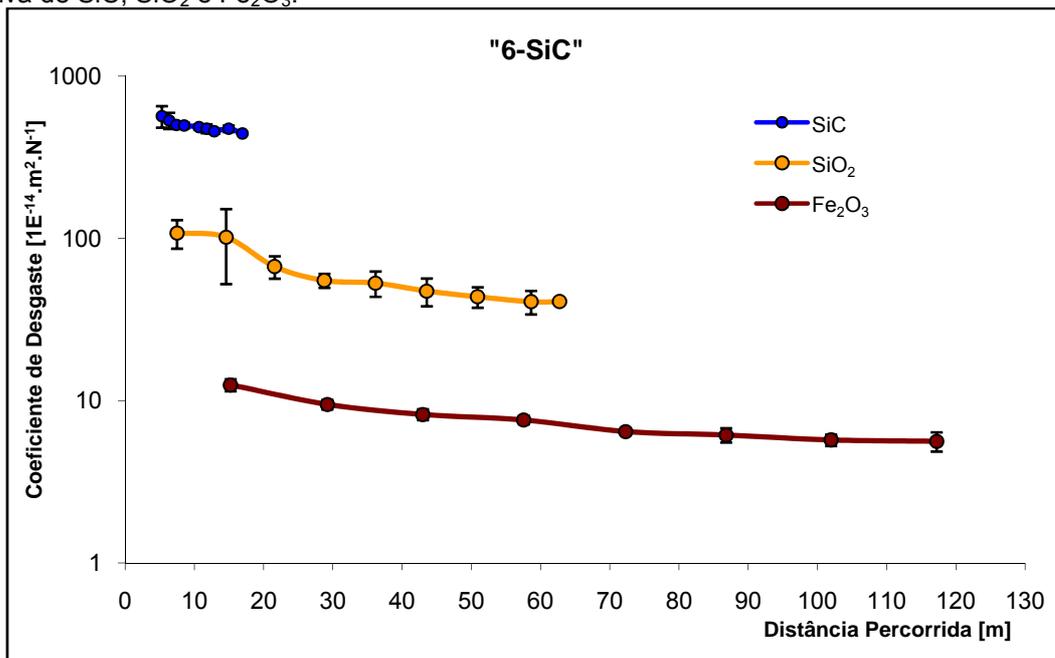
Coeficiente de desgaste dimensional ao longe de distância percorrida para a matriz "4-Fe-SiC" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



Coeficiente de desgaste dimensional ao longe de distância percorrida para a matriz "4-SiC" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.

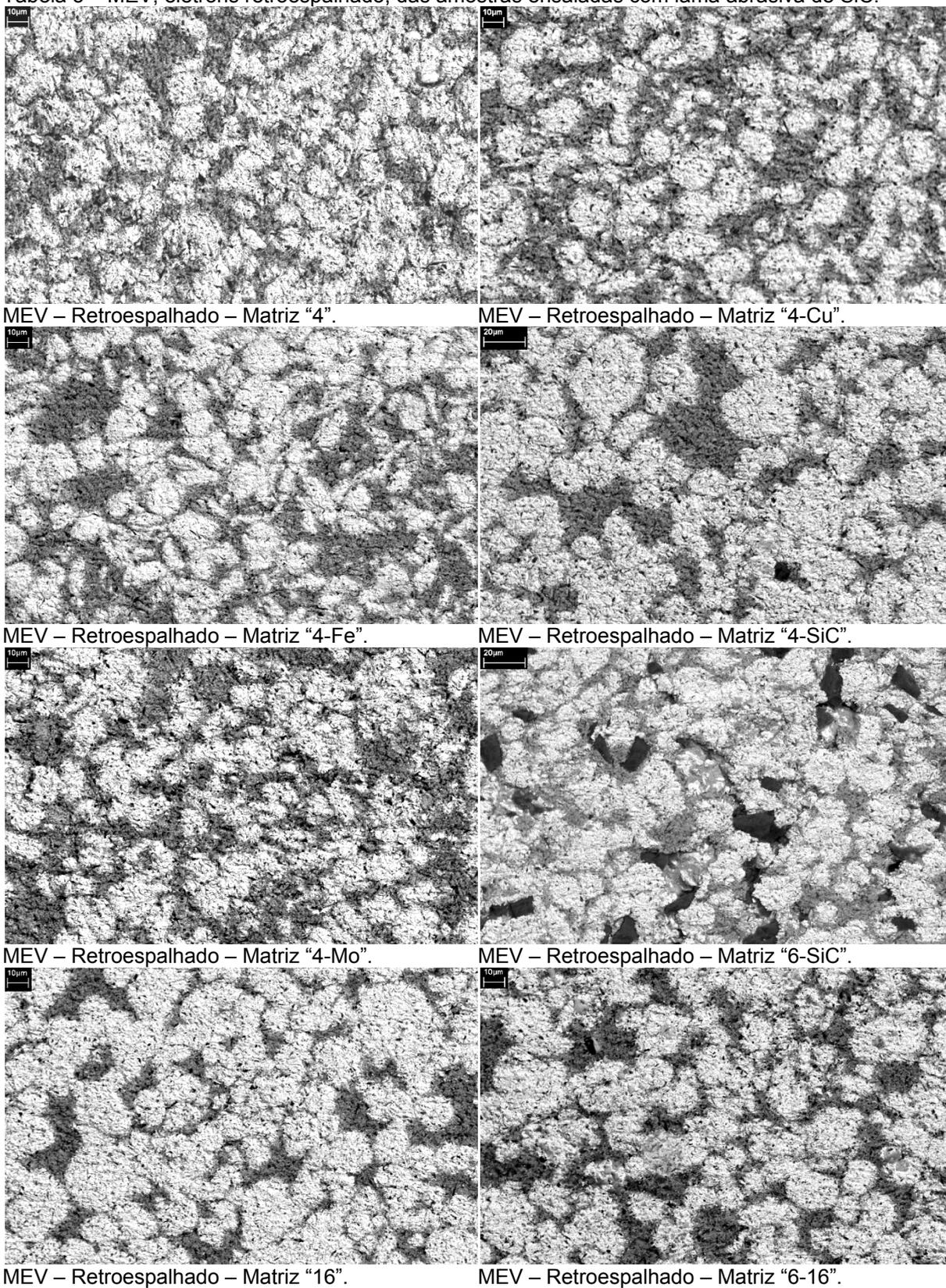


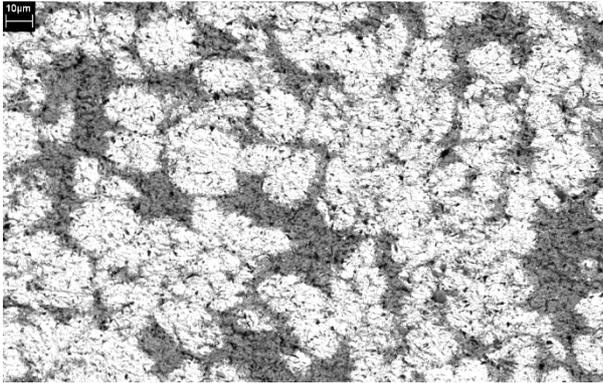
Coeficiente de desgaste dimensional ao longo de distância percorrida para a matriz "4-Mo" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.



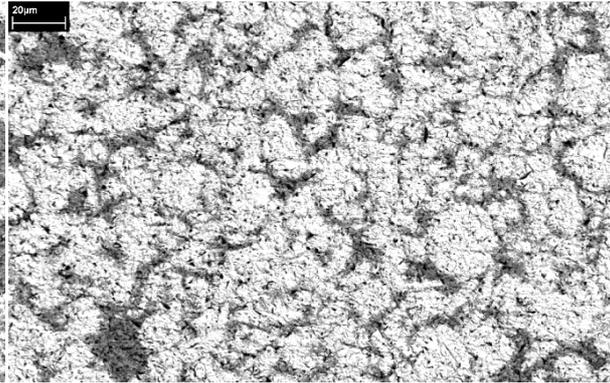
Coeficiente de desgaste dimensional ao longo de distância percorrida para a matriz "6-SiC" com lama abrasiva de SiC, SiO₂ e Fe₂O₃.

Tabela 5 – MEV, elétrons retroespalhado, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de SiC.



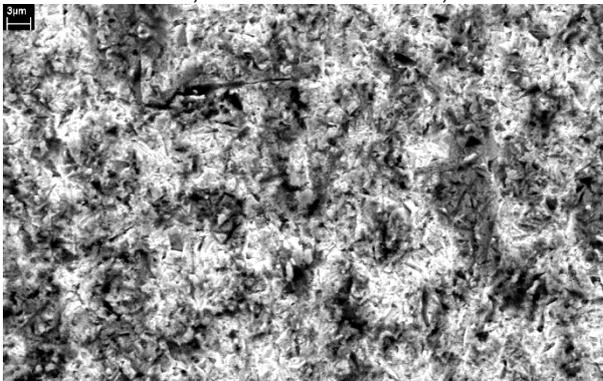


MEV – Retroespalhado – Matriz “6”.

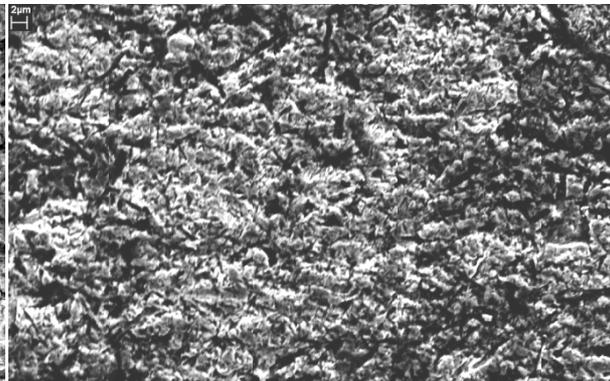


MEV – Retroespalhado – Matriz “4-Fe-SiC”.

Tabela 6 – MEV, elétrons secundário, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de SiC.



MEV – Secundário – Matriz “4”.



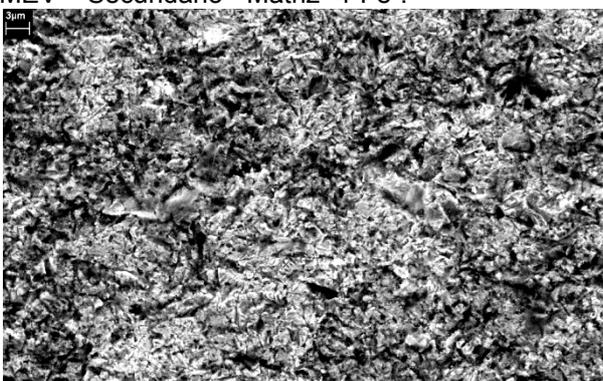
MEV – Secundário – Matriz “4-Cu”.



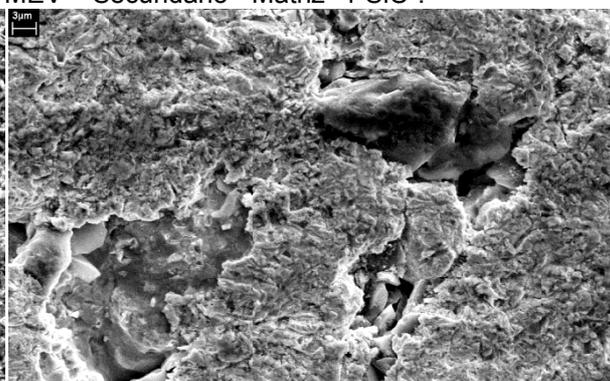
MEV – Secundário - Matriz “4-Fe”.



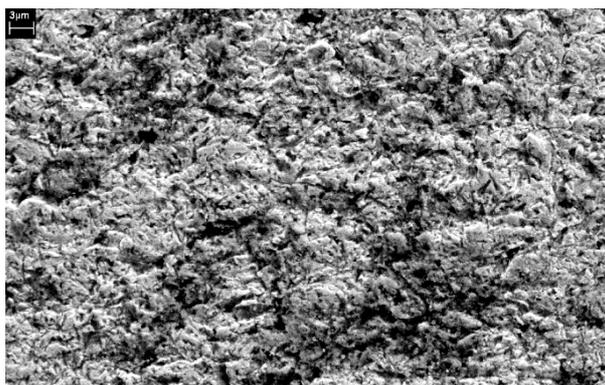
MEV – Secundário - Matriz “4-SiC”.



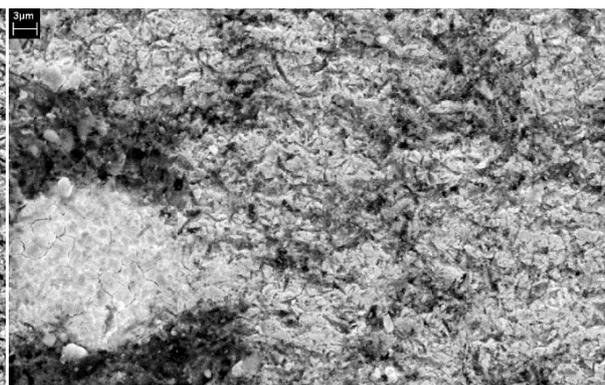
MEV – Secundário - Matriz “4-Mo”.



MEV – Secundário – Matriz “6-SiC”.



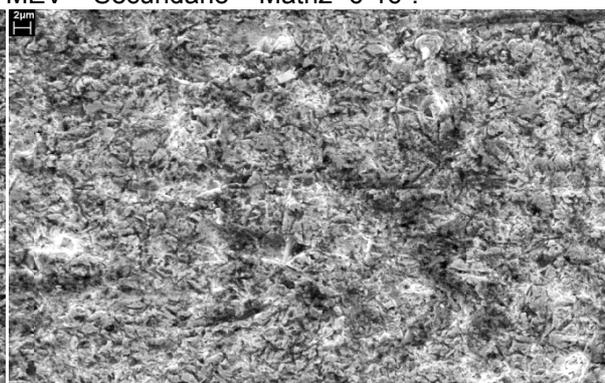
MEV – Secundário – Matriz “16”.



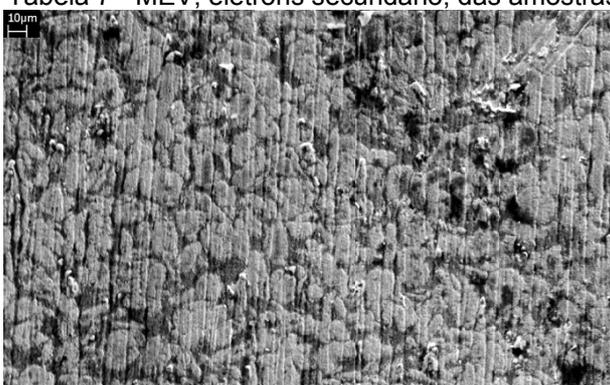
MEV – Secundário – Matriz “6-16”.



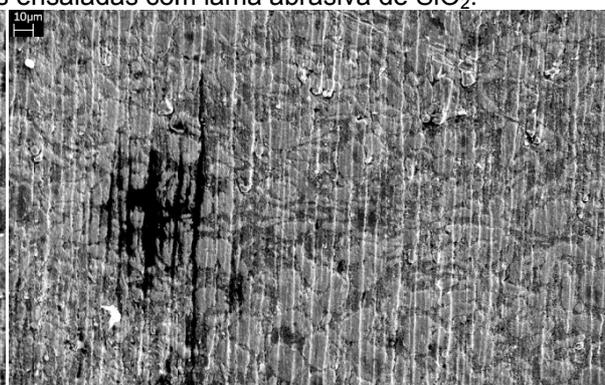
MEV – Secundário – Matriz “6”.



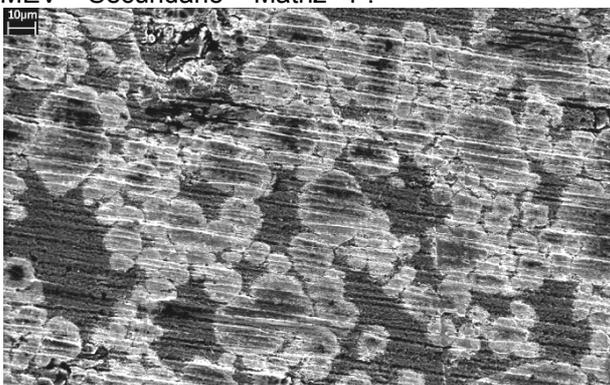
MEV – Secundário – Matriz “4-Fe-SiC”.

Tabela 7 - MEV, elétrons secundário, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de SiO_2 .

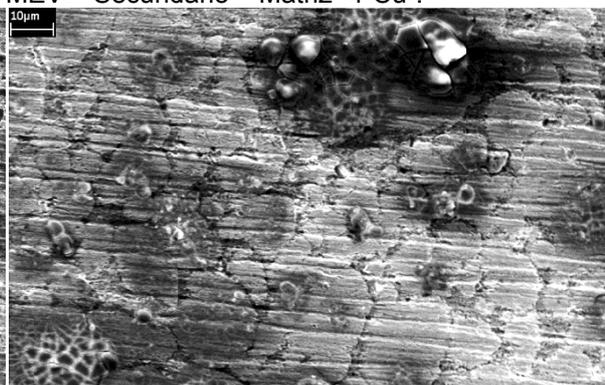
MEV – Secundário – Matriz “4”.



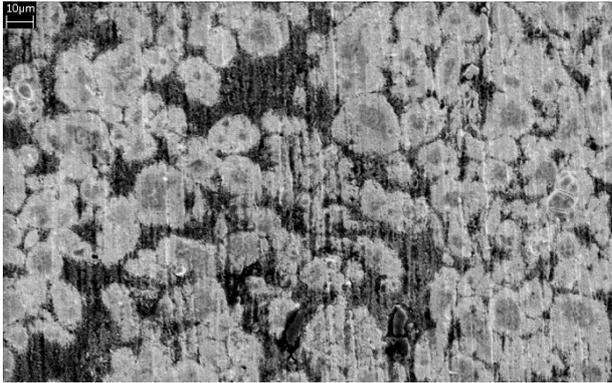
MEV – Secundário – Matriz “4-Cu”.



MEV – Secundário - Matriz “16”.



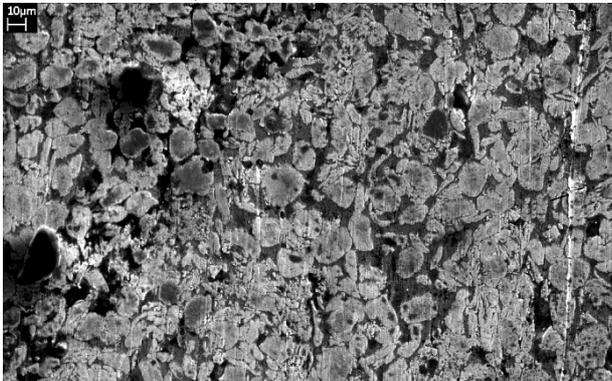
MEV – Secundário - Matriz “6-16”.



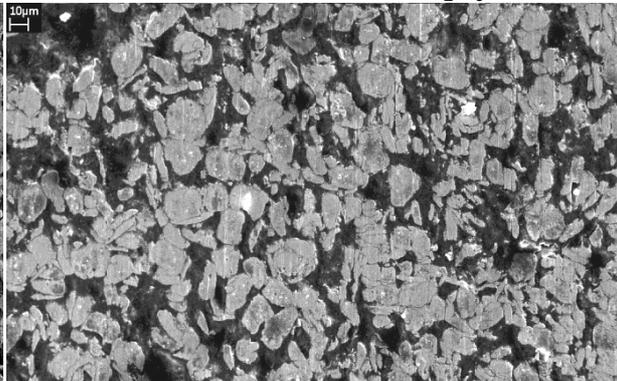
MEV – Secundário - Matriz "6".



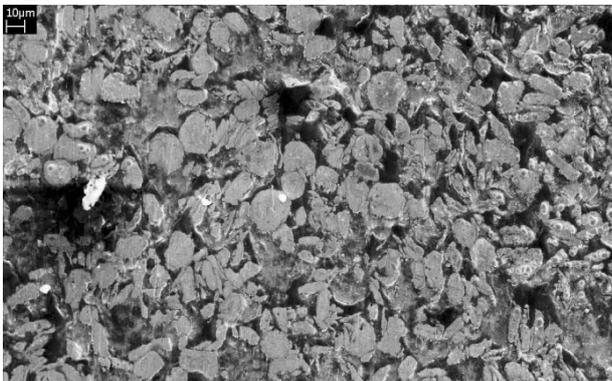
MEV – Secundário – Matriz "4-Fe-SiC".

Tabela 8 - MEV, elétrons secundário, das amostras ensaiadas com lama abrasiva de Fe_2O_3 

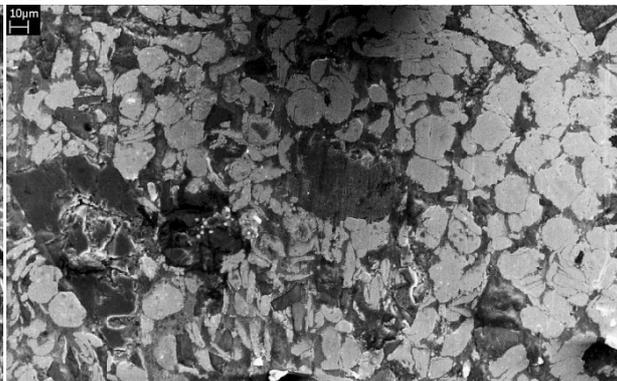
MEV – Secundário – Matriz "4".



MEV – Secundário – Matriz "4-Cu".



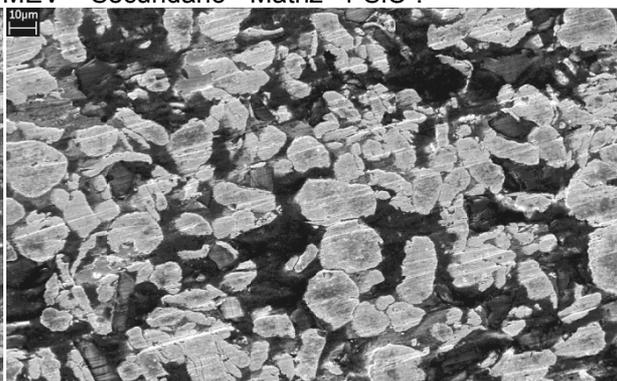
MEV – Secundário - Matriz "4-Fe".



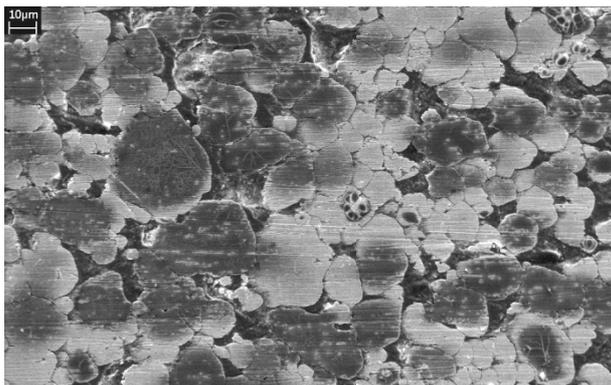
MEV – Secundário - Matriz "4-SiC".



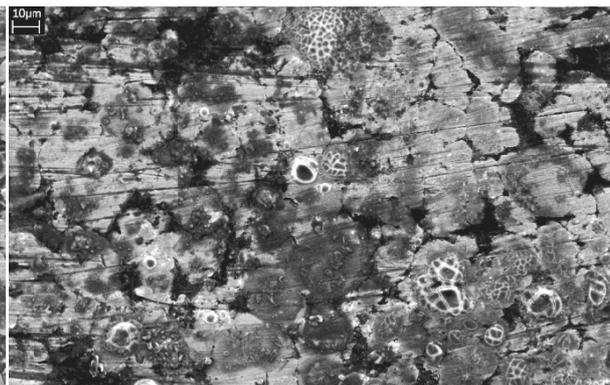
MEV – Secundário - Matriz "4-Mo".



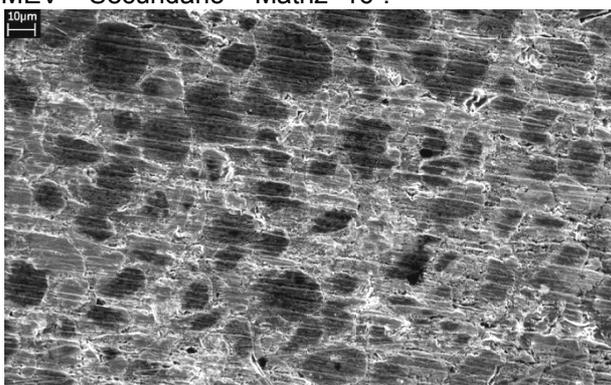
MEV – Secundário – Matriz "6-SiC".



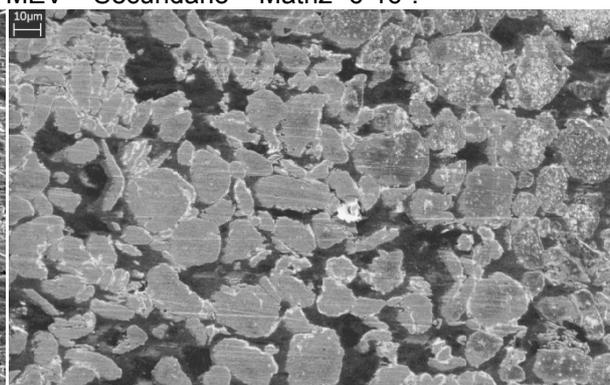
MEV – Secundário – Matriz "16".



MEV – Secundário – Matriz "6-16".



MEV – Secundário – Matriz "6".



MEV – Secundário – Matriz "4-Fe-SiC".