



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

VÍCTOR ALFONSO OSMA GÓMEZ

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS SOBRE
A TAXA E MODOS DE DESGASTE PARA O ENSAIO DE MICROABRASÃO.**

VITÓRIA
2014

VÍCTOR ALFONSO OSMA GÓMEZ

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS SOBRE
AS TAXAS E MODOS DE DESGASTE PARA O ENSAIO DE MICROABRASÃO.**

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

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de Souza.

VITÓRIA
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

G633e Gómez, Víctor Alfonso Osma, 1985-
Efeito da distribuição do tamanho das partículas abrasivas sobre as taxas e modos de desgaste para o ensaio de microabrasão / Víctor Alfonso Osma Gómez. – 2014.
104 f. : il.

Orientador: Cherlio Scandian.
Coorientador: Roberto Martins de Souza.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Desgaste mecânico. 2. Determinação de tamanho de partícula. 3. Abrasivos – Testes. 4. Microabrasão (Engenharia). 5. Desgaste abrasivo. I. Scandian, Cherlio. II. Souza, Roberto Martins de. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

VÍCTOR ALFONSO OSMA GÓMEZ

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTICULAS ABRASIVAS SOBRE
AS TAXAS E MODOS DE DESGASTE PARA O ENSAIO DE MICROABRASÃO.**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 5 de Dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Roberto Martins de Souza-Co-orientador
Universidade de São Paulo- USP

Prof. Dr. Marcelo C. Severo de Macêdo-Examinador interno
Universidade Federal do Espírito Santo-UFES

Prof.^a Dr.^a Henara Lillian Costa Murray-Examinador externo
Universidade Federal de Uberlândia- UFU

DEDICATORIA

Hoy dedico el fruto de mi trabajo a mis dos madres y a mi abuela Elvia,
quienes con sus múltiples esfuerzos
lo han hecho todo posible.

Hoy exalto a mis tres hermanas
como el corazón de la lucha
que libro a diario por ser mejor

Hoy doy gracias a Kissel por estar siempre ahí.

Hoy presento a mis amigos
como el complemento perfecto
para mis carencias como ser humano.

Hoy más que nunca me enorgullece mi familia.

Y siempre estaré en deuda con Dios.

AGRADECIMENTOS

A DEUS

À Organização dos Estados Americanos (OEA)

Ao Grupo Coimbra de Universidade Brasileiras (GCUB)

Aos Professores Cherlio Scandian, Marcelo Camargo Severo de Macêdo e Roberto Martins de Souza.

A meus colegas Mariana, Caruline, Vinicius, Leandro e Nathan.

A todo o pessoal do PPGEM.

RESUMO

Neste trabalho, as distribuições de tamanhos das partículas de dois pós de Carboneto de Silício foram previamente avaliadas e os resultados indicaram uma distribuição Gaussiana para ambos, com tamanhos médios na ordem de 2 μm para o primeiro e 6 μm para o segundo. Posteriormente foram misturados os dois pós originais com diferentes frações mássicas, proporcionando uma nova série de pós de Carboneto de Silício (SiC), que seriam usados nos ensaios de microabrasão com configuração de esfera fixa. A caracterização desta nova série de pós mostrou larguras maiores para aqueles com alto porcentagem do abrasivo pequeno (2,11 μm), conservando a aparência Gaussiana dos originais. Por outro lado para os pós com uma quantidade maior do abrasivo grande (6,57 μm), foram obtidas curvas com uma leve tendência bimodal, mas também apresentaram maiores larguras. As provas foram conduzidas sobre aço carbono AISI 1020, para duas condições diferentes de carga normal e os resultados foram analisados em termos da taxa de desgaste, bem como dos micromecanismos de desgaste (abrasão por rolamento ou abrasão por riscamento). Os resultados indicaram que a fração mássica dos pós originais tem um efeito significativo sobre os micromecanismos de desgaste observados e que as taxas de desgaste não segue uma relação linear com a fração mássica do pó com maior tamanho da partícula abrasiva. Além disso, a análise da severidade de contato determinou que esta diminui durante os ensaios conduzidos com carga constante. Este fenômeno está associado ao aumento da área da cratera de desgaste que produz uma diminuição da pressão de contato. Assim, um incremento para o número de eventos associado ao rolamento de partículas seria esperado, favorecendo a observação de múltiplas indentações ao longo dos sulcos formados previamente. Isto foi confirmado por meio de micrografias eletrônicas de varredura das amostras após ensaios de microabrasão.

Palavras chave: Microabrasão – Microrolamento - Taxa de desgaste – Micromecanismo de desgaste - Tamanho da partícula – Severidade de contato.

ABSTRACT

In this work, the particle size distribution of two silicon carbide (SiC) powders was initially analyzed, indicating a normal (Gaussian) distribution for both powders, with average particle size on the order of 2 μm in one case and 6 μm in the other. The two original powders were then mixed with different mass fractions, providing a new series of SiC powders that were used in micro-scale abrasive tests with fixed-ball configuration. The characterization of these new powders showed larger widths for those with a high percentage of small abrasive (2,11 μm) retaining the Gaussian appearance of the original. In contrast to powders with a high amount of the larger abrasive (6,57 μm), the curves obtained has a slight tendency bimodal, but showed larger widths also. The wear tests were conducted on AISI 1020 carbon steel for two different conditions of normal load and the results were analyzed in terms of wear rate as well as wear mode ("rolling abrasion" or "grooving abrasion"). Results have indicated that the mass fraction of the original powders has a significant effect on the wear modes observed and that the wear rate does not follow a direct relationship with the mass fraction of the powder with larger average particle size. Furthermore, the analysis of the severity of contact determined that this decrease during the tests conducted with constant normal load. This phenomenon is associated with increased area of the crater wear that produces a decrease in contact pressure. Thus an increase in particle rolling should be expected, favoring the observation of multiple indentations along grooves formed previously. This was confirmed by scanning electron micrographs of the samples after micro-abrasion tests.

Keywords: Micro-abrasion – Micro-rolling – Wear rate – Wear micro-mechanism – Particle size – Severity of contact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Desgaste abrasivo a dois corpos b) Desgaste abrasivo a três corpos (ZUM GAHR, 1987).....	24
Figura 2. Mecanismos de desgaste, da esquerda para a direita: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento. (ZUM GAHR, 1987).....	24
Figura 3. a) Imagem de MEV para corpo de prova de aço ferramenta com desgaste abrasivo por riscamento, para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,0009 ($0,003 \text{ g/cm}^3$) do abrasivo (diamante $3 \mu\text{m}$) na lama abrasiva e b) Imagem de MEV para um corpo de prova de aço ferramenta com desgaste abrasivo por rolamento, para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,237 ($1,0 \text{ g/cm}^3$) do abrasivo (SiC F1200) na lama abrasiva (TREZONA et al., 1999).	25
Figura 4. Taxa de desgaste para metais como função do tamanho da partícula abrasiva.	26
Figura 5. Representação para partícula abrasiva idealizada, deslizando sobre um material dúctil (HUTCHINGS, 1992).	27
Figura 6. Diagramas representativos a) da cratera de desgaste esférica produzida no ensaio de microabrasão (MARQUES et al., 2011) b) da profundidade de penetração h_c da esfera de ensaio (COZZA, 2011).	30
Figura 7. Diagrama representativo do ensaio de microabrasão com esfera livre (GANT e GEE, 2011).	31
Figura 8. Diagrama representativo do ensaio de microabrasão com esfera fixa (GANT e GEE, 2011).	32

Figura 9. Variação da geometria da esfera em função da distância deslizada, para uma amostra de alumínio comercial puro (CASSAR et al., 2012).	33
Figura 10. Variação do volume de desgaste após deslizados em função da concentração da lama abrasiva (partículas F1200 SiC) com uma distância deslizada de 30 m. (TREZONA et al., 1999).....	34
Figura 11. Representação esquemática da entrada das partículas na zona de contato a) partícula incrustada que permanece estacionaria b) partícula entrando deslocada pela rugosidade da superfície esfera (ALLSOPP et al., 1998).	34
Figura 12. Transição entre os micromecanismos de desgaste em função da força normal e da concentração da pasta abrasiva, para ensaio realizados em corpos de prova de aço ferramenta com esferas de aço AISI 52100 e partículas e a) SiC F1200 b) diamante e c) alumina (TREZONA et al., 1999).	36
Figura 13. Marcas de desgaste abrasivo misto para aço superduplex UNS S32750 tratado termicamente por solubilização ST, (MEV) (MARQUES et al., 2011).	36
Figura 14. Marcas de abrasão por microrolamento para aço ferramenta AISI H10, utilizando uma carga normal constante de 5 N e uma distância deslizada de 100 m, (MEV) (COZZA et al., 2009).....	37
Figura 15. Modelo bidimensional proposto por Williams e Hyncica (1992).....	38
Figura 16. Modelo da zona de contato entre o corpo de prova, a esfera e as partículas abrasivas b) Indentação da partícula abrasiva na esfera e no corpo de prova (ADACHI e HUTCHINGS, 2003).	38

Figura 17. Mapa de desgaste em função da severidade de contato e a relação entre as durezas do corpo de prova e da esfera (ADACHI e HUTCNHINGS, 2003, 2005).....	41
Figura 18. Mapa de desgaste em função da severidade de contato e a relação entre as durezas do corpo de prova e da esfera (GAVA et al, 2013) considerando a evolução na área de contato, em compósitos constituídos de matriz metálica (partículas de tungstênio com diferentes diâmetros) e um ligante (latão) a) para condição “isocarga” e b) para condição “isodeformação”	42
Figura 19. Imagem de uma das amostras já preparada para a realização dos ensaios.	43
Figura 20. Montagem utilizada durante os ensaios.....	45
Figura 21. Montagem da esfera entre os semi-eixos.	47
Figura 22. Montagem estabelecida para medição do diâmetro da calota.	48
Figura 23. Curva obtida durante o ensaio de microabrasão realizado com a fração mássica 1 (0G) e carga normal de 0,2 N.....	49
Figura 24. Distribuições de tamanho das partículas dos diferentes pós de SiC utilizados para a realização dos ensaios.....	52
Figura 25. Cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.	54
Figura 26. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.....	54
Figura 27. Sobreposição da equação da esfera sob o perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.....	55

Figura 28. Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo, para a condição de 0G com carga normal de 0,2 N.....	56
Figura 29. Comportamento do coeficiente de desgaste em função da fração mássica do abrasivo maior (SiC 6,57 μm) na lama abrasiva. .	57
Figura 30. Comportamento do volume de desgaste em função da fração mássica do abrasivo maior (SiC 6,57 μm) na lama abrasiva.	58
Figura 31.Representação da indentação completa das partículas abrasivas na zona de contato para baixas concentrações de abrasivo.	59
Figura 32. Comportamento da distância de separação final para ensaios realizados com carga de 0,2 N.	60
Figura 33. Comportamento da distância de separação, h, durante o tempo de ensaio para cada uma das frações mássicas de abrasivo maior utilizadas na condição de 0,2N.	61
Figura 34. Comportamento do volume de desgaste como função da fração mássica das partículas efetivas a para o desgaste.....	62
Figura 35. Análise MEV, elétrons secundários, da cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 1 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x...	63
Figura 36. Análise MEV, elétrons secundários, da cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 6 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x...	64
Figura 37. Análise MEV, elétrons secundários, da cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 9 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x...	64
Figura 38. Análise MEV, detector secundário, 2000X, das crateras de desgaste correspondentes ao ensaios realizados com cada fração	

mássica do abrasivo com o maior tamanho médio da partícula para a condição da carga normal de 0,2 N a) 0G; b) 10G; c) 20G; d) 30G; e) 40G; f) 50G; g) 70G; h) 80G; i) 100.	66
Figura 39. Análise MEV, das crateras de desgaste correspondentes ao ensaios realizados com a fração mássica 9 (100G) para as duas condições de carga normal utilizadas 0,2 N (secundário) a)1000x b)2000x, e 0,4 N (retroespalhado) c)1000x d) 2000x.....	67
Figura 40. Analise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 0G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).....	69
Figura 41. Analise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 50G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).....	69
Figura 42. Analise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 100G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).....	70
Figura 43. Analise da transição entre os modos de desgaste levando em conta a variação das partículas ativas, para as misturas de 0G à 50G e as duas condições de carga aplicadas (0,2 e 0,4 N), segundo o mapa de desgaste proposto por Trezona et al. (1999).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Frações mássicas do abrasivo com maior tamanho médio da partícula.	46
Tabela 2. Parâmetros selecionados para a realização dos ensaios. .	46
Tabela 3. Tamanho médio das partículas e largura da distribuição dos pós de SiC utilizados para a realização dos ensaios.	53
Tabela 4. Valores do coeficiente de desgaste, k, obtidos durante os ensaios realizados para a condição de 0G com carga normal de 0,2 N.	56

LISTA DE SIMBOLOS

V	Volume removido
L	Distância deslizada
H	Dureza do material desgastado
W	Carga normal aplicada
P	Pressão de indentação
K	Coeficiente de desgaste adimensional
k	Coeficiente de desgaste dimensional
Q	Volume por unidade de distância deslizada
b	Raio da cratera de desgaste
h_c	Profundidade da cratera
R	Raio da esfera de ensaio
v	Fração volumétrica do abrasivo na lama abrasiva
H_E	Dureza da esfera
H_A	Dureza do corpo de prova
h	Distância de separação entre superfícies
β'	Angularidade típica da partícula abrasiva
d_A	Indentação da partícula abrasiva no corpo de prova
d_E	Indentação da partícula abrasiva na esfera
c	Constante de proporcionalidade definida por Adachi e Hutchings para a distância de separação.
D	Diâmetro da partícula abrasiva
G	Partículas abrasivas de 6,57 μm
P	Partículas abrasivas de 2,11 μm
H'	Dureza reduzida do sistema para a severidade de contato
A	Área de interação dos elementos no ensaio de microabrasão
A₀	Área de contato inicial segundo Adachi e Hutchings
a'	Raio da indentação no ensaio de microabrasão
a	Radio de contato Hertziano

D_E	Diâmetro da esfera
P_C	Pressão de contato
A_S	Área da superfície da cratera de desgaste
A_P	Área projetada da cratera de desgaste
S	Severidade de contato
S_C	Severidade crítica de contato
α, β	Constantes empíricas calculadas para o análises de Severidade de contato de Adachi e Hutchings.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Definição	22
2.2. A TRIBOLOGIA E SEUS CONTEXTOS	22
2.3. DESGASTE	23
2.4. DESGASTE ABRASIVO	23
2.4.1. Mecanismos de desgaste abrasivo.....	23
2.4.2. Equação de Rabinowicz	25
2.5. ENSAIO DE MICROABRASÃO	28
2.5.1. Definição.....	28
2.5.2. Cálculo teórico do volume removido.....	29
2.5.3. Evolução da técnica.....	30
2.5.4. Variantes para o ensaio de microabrasão	31
2.5.5. Influência dos parâmetros de ensaio sobre o comportamento do desgaste microabrasivo.	32
2.5.6. Movimentação das partículas na zona de contato.....	37
2.5.7. Severidade de contato.....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. MATERIAIS	43
3.1.1. Amostras	43
3.1.2. Abrasivos.....	44
3.2. MÉTODOS	44
3.2.1. Ensaio de Microabrasão	44
3.2.2. Análise Topográfica.....	50
3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura.....	50

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1. DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS ABRASIVOS	51
4.2. ENSAIOS DE MICROABRASÃO	53
4.2.1. Análise topográfica em 3D.....	53
4.2.2. Determinação do coeficiente de desgaste dimensional.....	55
4.2.3. Coeficientes de desgaste	57
4.2.4. Micromecanismos de desgaste	63
4.2.5. Severidade de contato.....	68
5. CONCLUSÕES.....	72
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
8. ANEXOS.....	78

CAPITULO 1

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia múltiplas variações dos processos de desgaste abrasivo podem ser reproduzidas por meio de ensaios de esfera rotativa ou também conhecidos como ensaio de microabrasão. Nesta técnica, uma esfera que gira é pressionada contra um corpo de prova na presença de partículas abrasivas na região de contato, com o objetivo de produzir uma cratera de desgaste sob a superfície deste último (GANT e GEE, 2011). Permitindo dessa forma, realizar análises rápidos e localizados dos comportamentos tribológicos em pequenos volumes de materiais de engenharia, através do tamanho da calota de desgaste gerada.

A pesar do ensaio possuir uma metodologia simples, existem na literatura uma quantidade importante de estudos que buscam melhorar o entendimento do mesmo. Um dos diferentes focos das pesquisas desenvolvidas com ajuda do ensaio de microabrasão é o estudo dos micromecanismos atuantes sob a superfície desgastada, os quais têm sido classificados como desgaste abrasivo por rolamento, quando as partículas rolam sobre o corpo de prova, e desgaste abrasivo por riscamento, quando as partículas deslizam sobre a superfície (TREZONA et al., 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005; COZZA et al., 2007; MARQUES et al., 2011; GAVA et al, 2013). De igual forma, já foi observado um terceiro micromecanismo de desgaste abrasivo denominado desgaste abrasivo misto, com marcas de rolamento das partículas nas bordas da cratera e riscamento no centro da mesma (TREZONA et al., 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005; COZZA et al., 2007; MARQUES et al., 2011; GAVA et al, 2013). Recentemente, foi identificado o desgaste abrasivo por microrolamento (COZZA et al., 2009), caracterizado pela presença de partículas pequenas que produzem indentações entre riscos formados previamente por partículas maiores.

Mas, a identificação dos micromecanismos de desgaste tem entre seus antecedentes, o modelo que relaciona a transição entre estes com o diâmetro da partícula abrasiva e a separação entre as superfícies da esfera e o corpo de prova (WILLIAMS e HINCYCA, 1992). Que deu lugar a identificação de regiões dominantes por micromecanismo, em estudos realizados por Trezona et al. (1999), sendo considerado o efeito dos diferentes parâmetros envolvidos durante a realização dos ensaios.

Assim, Adachi e Hutchings (2003, 2005) construíram um mapa de desgaste que prediz o micromecanismo de desgaste para o ensaio de microabrasão em função de dois parâmetros adimensionais: a relação entre a dureza do corpo de prova e a dureza da esfera rotativa (H_A/H_B) e a severidade de contato (S , termo que depende da área de contato, a carga aplicada, a concentração do abrasivo e as durezas da esfera e o corpo de prova), todo baseado na análise da zona de contato entre os elementos.

Continuando com os estudos, foram realizados vários trabalhos (COZZA et al., 2007; CASSAR et al., 2012; GAVA, et al., 2013) nos quais se concluiu que, a severidade de contato sofre uma diminuição durante o ensaio de microabrasão com carga constante, atribuída às pressões de contato menores produzidas pelo aumento na área da cratera de desgaste.

Por tanto neste trabalho tem-se como principal objetivo identificar as variações produzidas pela diminuição da severidade de contato nos micromecanismos de desgaste, além do interesse de esclarecer se a quantidade de material removido no ensaio de microabrasão pode ser afetada por mudanças na distribuição de tamanho de partícula, já que a maior parte das análises tem sido realizadas considerando o tamanho médio de partícula para uma distribuição dada. Para tal finalidade os ensaios foram realizados com dos diferentes abrasivos de carboneto de silício com um tamanho médio de partícula de 2,11 μm para o primeiro e de 6,56 μm para o segundo, os quais foram misturados variando a fração mássica para cada um dos pós. Em cada ensaio foram mantidos constantes os valores

da carga normal aplicada e a velocidade de rotação da esfera, obtendo-se como resultado, a ocorrência de eventos associados ao desgaste abrasivo por rolamento com o aumento na área de contato devido à queda na severidade de contato, além de uma influência da distribuição granulométricas sobre as taxas de desgaste.

CAPITULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição

Segundo o livro de Stachowiak (1993), a Comissão do Ministério da Educação e Ciência da Grã Bretanha no ano de 1966 definiu a tribologia como “a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo com seus assuntos e práticas relacionadas”, passando a ser reconhecida como um uma disciplina empregada para economizar recursos financeiros, matérias-primas e materiais energéticos. (MARTINEZ, 2002).

Posteriormente, Hutchings (1992) sugeriu que tribologia é “o estudo do atrito, desgaste e lubrificação. Uma matéria interdisciplinar que se baseia na experiência do físico, químico e engenheiro mecânico, e também do cientista de materiais ou metalurgista”.

Para a Real Academia da língua Espanhola (RAE) tribologia, (tribo- e -logía), pode ser definida como técnica que estuda o atrito entre os corpos sólidos, com o intuito de produzir melhor deslizamento e menor desgaste entre eles”.

2.2. A TRIBOLOGIA E SEUS CONTEXTOS

Segundo Martinez (2002), o rápido aumento na quantidade de institutos e centros especializados para o estudo da tribologia é reflexo deste ser o campo da ciência com uma das evoluções mais significativas nas últimas décadas. Atualmente, as análises dos problemas de grande significância econômica tais como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos, que vão desde eletrodomésticos até naves espaciais, fazem parte também da tribologia (STACHOWIAK, 1993).

Assim, considerando-se o desgaste, no âmbito da tribologia, como a maior causa do desperdício de material e das perdas no desempenho mecânico e, levando em conta também, que o atrito é a principal da dissipação da energia, e que, um terço dos recursos energéticos mundiais são utilizados para supri-lo, qualquer redução nestas quantidades poderia resultar numa economia considerável. (STACHOWIAK, 1993).

Especificamente, o presente trabalho será desenvolvido na área do desgaste, mais precisamente no desgaste abrasivo em uma escala micrométrica conhecida, também, como desgaste microabrasivo, tópico tratado nos seguintes parágrafos.

2.3. DESGASTE

O desgaste pode ser definido como: “perda progressiva de massa numa superfície sólida devido ao contato e ao movimento relativo entre a superfície e outro material ou outros materiais” (ASTM G77-91).

2.4. DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo é “o deslocamento de material, causado pela presença de partículas duras, livres ou incrustadas em uma ou nas duas superfícies em movimento relativo ou pela presença de protuberâncias em uma ou nas duas superfícies em interação” (ZUM GAHR,1987).

2.4.1. Mecanismos de desgaste abrasivo

Tradicionalmente, o desgaste abrasivo pode ser classificado como desgaste abrasivo a dois corpos ou desgaste abrasivo a três corpos. No desgaste abrasivo a dois corpos as partículas abrasivas movem-se livremente na interfase de contato, enquanto que, para o desgaste abrasivo a três corpos as partículas abrasivas atuam como elementos interfaciais entre o corpo solido e o contra-corpo, em concordância com a Figura 1 (ZUM GAHR,1987).

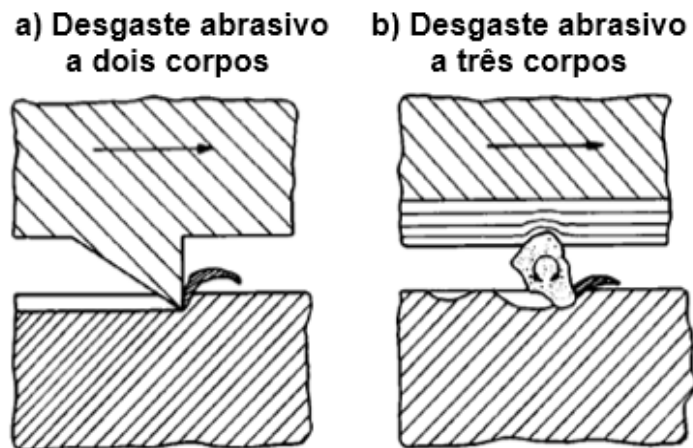


Figura 1. a) Desgaste abrasivo a dois corpos b) Desgaste abrasivo a três corpos (ZUM GAHR, 1987).

A observação detalhada do fenômeno revelou que, dependendo da interação física entre a superfície e as partículas abrasivas, estas podem remover material por microcorte (remoção de material igual ao volume do risco), microsulcamento (o passo da partícula abrasiva não gera desprendimento de material da superfície desgastada), microtrincamento ou microfadiga (ZUM GAHR, 1987), como observado na Figura 2.

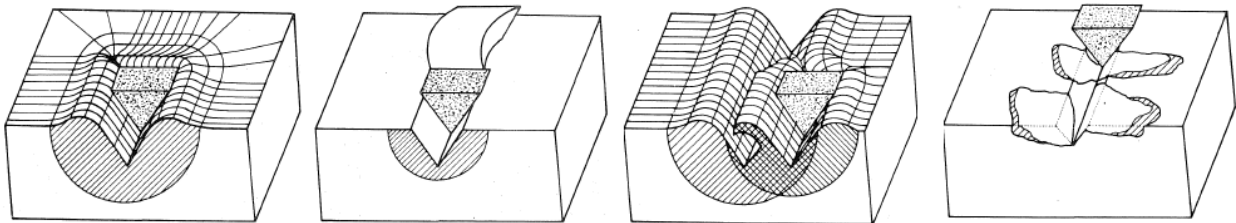


Figura 2. Mecanismos de desgaste, da esquerda para a direita: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento. (ZUM GAHR, 1987).

Assim, no microcorte, o passo da partícula gera uma remoção de material igual ao volume do sulco produzido. Para o microsulcamento, tem-se uma deformação da superfície com remoção de material nula. Para o microtrincamento ocorre uma alta concentração de tensões impostas pelas partículas abrasivas, que, gera grandes perdas de material devido à formação de trincas e sua propagação. E finalmente, a atividade de um alto número de partículas abrasivas produzindo microcorte e microriscamento pode finalizar em desprendimento de material quando o limite de fadiga é excedido (ZUM GAHR, 1987)

De igual forma, na microabrasão tem sido identificados dois mecanismos de atuação das partículas abrasivas sob a superfície desgastada, conhecidos como: desgaste abrasivo por riscamento (partículas deslizando sobre a superfície) e desgaste abrasivo por rolamento (partículas rolando sobre a superfície), como observado nas Figura 3-a e 3-b (TREZONA et al., 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005, COZZA et al., 2007; MARQUES et al., 2011; GAVA et al., 2013).

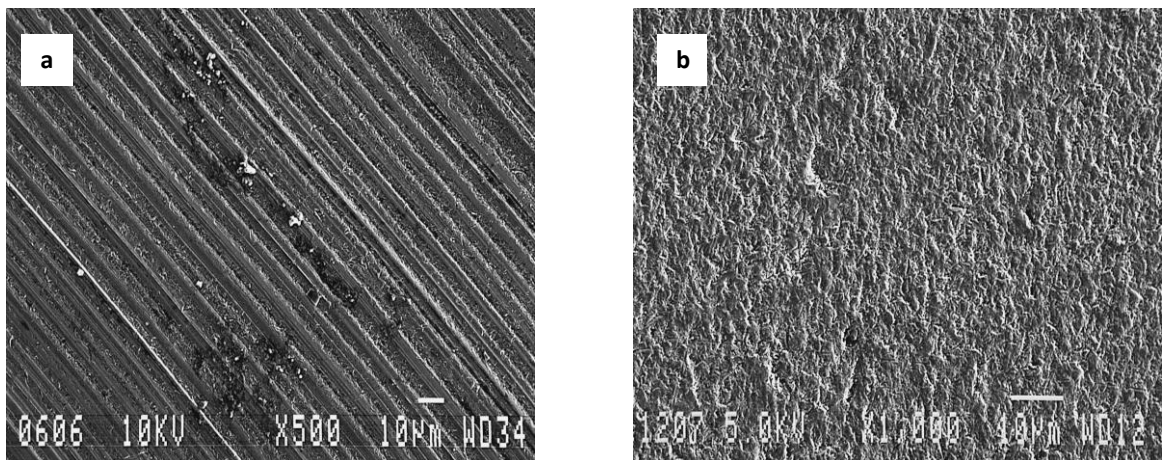


Figura 3. a) Imagem de MEV para corpo de prova de aço ferramenta com desgaste abrasivo por riscamento, para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,0009 (0,003 g/cm³) do abrasivo (diamante 3 µm) na lama abrasiva e b) Imagem de MEV para um corpo de prova de aço ferramenta com desgaste abrasivo por rolamento, para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,237 (1,0 g/cm³) do abrasivo (SiC) na lama abrasiva (TREZONA et al., 1999).

2.4.2. Equação de Rabinowicz

Rabinowicz et al.(1968) realizaram estudos de desgaste abrasivo, nos quais, um metal foi deslizado contra outro metal, na presença de um abrasivo (abrasão a três corpos), determinado-se, que, as relações quantitativas entre as taxas de desgaste e a distância de deslizamento, dureza do material ensaiado e tamanho do abrasivo são similares às apresentadas durante o desgaste abrasivo a dois corpos.

Assim, os resultados em termos do efeito do tempo de abrasão mostraram irregularidades no início do teste e estabilização da taxa de desgaste para tempos maiores. Igualmente foi determinado que a resistência ao desgaste para alguns materiais, é uma função de seu limite elástico e de sua dureza. Também os autores mostraram que o desgaste abrasivo diminui rapidamente para as partículas abrasivas pequenas, no entanto, para tamanhos de partícula maiores, a taxa de desgaste manteve-se quase constante, como apresentado na Figura 4.

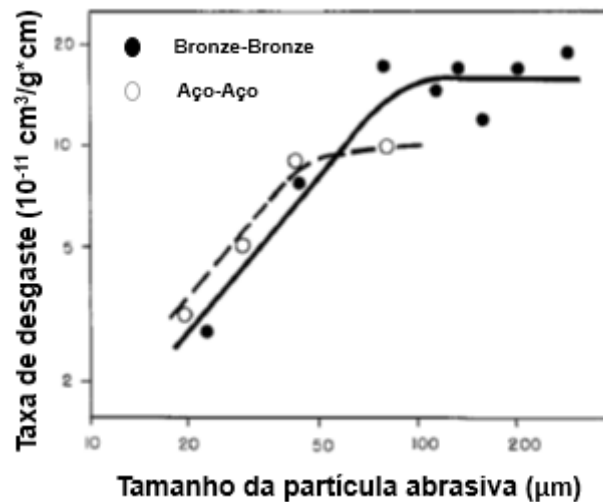


Figura 4. Taxa de desgaste para metais como função do tamanho da partícula abrasiva.

Rabinowicz et al. (1968) também desenvolveram uma equação para a taxa de desgaste abrasivo, idealizando-se uma partícula abrasiva como um cone que é arrastado sobre a superfície de um material dúctil, o qual escoou para uma dada uma pressão de indentação, P (Figura 5).

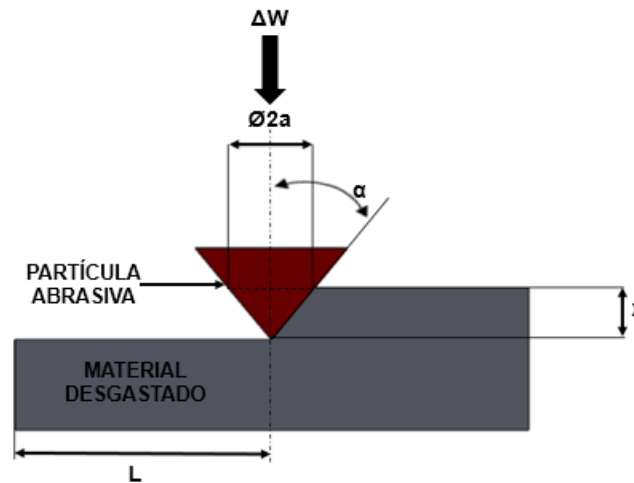


Figura 5. Representação para partícula abrasiva idealizada, deslizando sobre um material dúctil (HUTCHINGS, 1992).

Assim, a partícula forma um risco no material e o desgaste ocorre pela remoção de uma parte do mesmo deslocado sobre o risco. Assumindo um número n_p de partículas abrasivas sob uma carga total (W), e uma pressão (P) igual à dureza do material (H), tem-se a Equação 1 (deduzida no Anexo A), a equação de Rabinowicz para o volume removido (V/L) por unidade de distância deslizada (mm^3/m) a qual é igual à equação que Archard propôs para o desgaste por deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

$$\frac{V}{L} = K * \frac{W}{H} \quad (1)$$

O termo K na Equação (1) é chamado de coeficiente adimensional de desgaste e pode ser utilizado para medir a severidade do processo abrasivo. Os valores típicos para o valor de K no desgaste abrasivo a dois corpos variam entre 5×10^{-3} e 50×10^{-3} e para desgaste abrasivo a três corpos entre $0,5 \times 10^{-3}$ e 5×10^{-3} .

De igual forma substituindo o coeficiente de desgaste adimensional K , pelo coeficiente dimensional de desgaste k (K/H), com unidades de ($\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), a Equação (1) para o volume por unidade de distância deslizada, Q , pode se expressar da seguinte forma:

$$Q = k * W \quad (2)$$

No entanto, esta equação possui algumas limitações, pois foi idealizada para partículas cônicas desconsiderando fatores que influenciam a quantidade de material que pode ser removida. Por exemplo, partículas menos duras que a superfície geram taxas de desgaste mais baixas que as produzidas por partículas mais duras que a superfície.

Observam-se que as taxas de desgaste produzidas com partículas altamente angulares são mais elevadas comparadas às resultantes devido à atuação de partículas arredondadas. Ao ser observado o comportamento das taxas de desgaste em função do tamanho da partícula abrasiva, tem-se uma diminuição pronunciada na quantidade de material removido quando as partículas apresentam tamanhos menores que 100 µm, sendo nesta faixa de tamanhos de partícula que atuam os processos de microabrasão, os quais produzem remoção de algumas ordens de grandeza inferiores ao processos abrasivos (TREZONA et al., 1999, SHIPWAY, 1999, ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005, GAVA et al., 2013). Estes fenômenos atualmente são estudados por meio do ensaio de microabrasão o qual será abordado na seguinte seção.

2.5. ENSAIO DE MICROABRASÃO

2.5.1. Definição

O ensaio de microabrasão pode ser definido como a técnica utilizada para estudar o desgaste abrasivo em escala micrométrica. Esta técnica que consiste da rotação de uma esfera contra um corpo de prova, na presença de pequenas partículas abrasivas (com tamanhos menores que 10 µm), gerando uma cratera de desgaste com uma geometria esférica sob a superfície da amostras. Empregado para avaliar a resistência ao desgaste

tanto em materiais macios como de materiais duros (RUTHERFORD & HUTCHINGS, 1996, 1997, ADACHI e HUTCHINGS 2003, 2005, CAMERINI et al., 2011). .

2.5.2. Cálculo teórico do volume removido

Em materiais homogêneos e não revestidos, o volume de desgaste, V , pode ser relacionado por meio da Equação 3, com a distância de deslizamento (L) e a carga normal de contato (W). Este modelo de desgaste se assemelha à equação proposta por Archard para o desgaste por deslizamento (TREZONA et al., 1999).

$$V = k * L * W \quad (3)$$

Lembrando que, k (mm^3/Nm), é o coeficiente de desgaste dimensional e que a medição da resistência ao desgaste do material é definida quando o volume é diretamente proporcional às duas variáveis S e W . No caso de uma cratera de desgaste esférica, realizada sobre uma superfície inicialmente plana, como observado na Figura 6, o volume do material removido (V) pode ser calculado em função do diâmetro da cratera (b), da profundidade da cratera (h_c) e do raio da esfera de ensaio (R), segundo as Equações 4 e 5 (TREZONA et al., 1999), para $b \ll 2R$ e $h_c \ll 2R$.

$$V = \frac{\pi * b^4}{64 * R} \quad (4)$$

$$V = \pi * h_c^2 * R \quad (5)$$

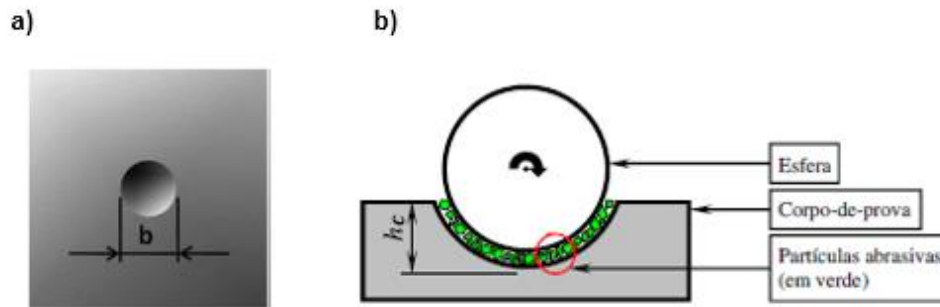


Figura 6. Diagramas representativos a) da cratera de desgaste esférica produzida no ensaio de microabrasão (MARQUES et al., 2011) b) da profundidade de penetração h_c da esfera de ensaio (COZZA, 2011).

Atualmente, são aceitos pela “comunidade tribológica” duas variantes para o ensaio de microabrasão com esfera rotativa, são elas: “sistema de esfera livre” e “sistema de esfera fixa”, fazendo referência ao sistema adotado para a rotação da esfera em relação à amostra. Cada uma das configurações será explicada a seguir.

2.5.3. Evolução da técnica

Segundo Rutherford e Hutchings (1997), quando se fala da evolução histórica do ensaio de microabrasão, se reconhece um processo que começou com os trabalhos realizados por Mikail Lomonosov, (membro da Academia científica de Moscou entre 1745 e 1765), quem analisou o desgaste abrasivo em amostras de metais, minerais e vidros (MCNSHUTKIN, 1952), e que tem entre seus avanços o trabalho de Rutherford e Hutchings (1997), que aplicando a Rabinowicks/Archard, e baseiando-se no trabalho realizado por Kassman et al. (1991), conseguiram medir o coeficiente de desgaste do revestimento e do substrato de forma independente no mesmo ensaio utilizando um equipamento de esfera rotativa.

Hoje em dia, os objetivos das pesquisas são os mais variados e dependem da necessidade e das iniciativas dos pesquisadores, e os resultados obtidos permitem o acompanhamento do comportamento do desgaste microabrasivo (taxas de desgaste, micromecanismos e transições entre eles), quando são variadas condições como: a

superfície da esfera (ALLSOPP et al., 1998), a carga normal (TREZONA et al., 1999), a fração volumétrica do abrasivo (TREZONA et al., 1999), os materiais da esfera e do corpo de prova (TREZONA et al., 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005), tipo de abrasivo (TREZONA et al., 1999; SHIPWAY, 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005, GAVA et al., 2013) entre outras.

2.5.4. Variantes para o ensaio de microabrasão

2.5.4.1. Sistema de esfera livre

Neste tipo de configuração, a esfera é posicionada sob um eixo e seu movimento é estabelecido pela força de atrito. A Figura 7 ilustra o princípio do equipamento (GANT e GEE, 2011). Deve-se levar em consideração que a força normal de trabalho é controlada pelo próprio peso da esfera e pela inclinação da amostra o que introduz limitações na hora de incrementar a carga normal, devido a uma tendência ao deslizamento da esfera sob a amostra quando o ângulo de inclinação da mesma é baixo. Na prática, a carga máxima utilizada neste tipo de ensaio é aproximadamente de 0,4 N (GANT e GEE, 2011).

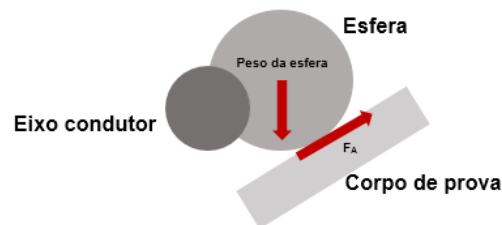


Figura 7. Diagrama representativo do ensaio de microabrasão com esfera livre (GANT e GEE, 2011).

2.5.4.2. Sistema de esfera fixa

Neste tipo de equipamento, a esfera rotativa é diretamente fixada em dois eixos coaxiais, permitindo sua fácil remoção durante a realização dos ensaios. Na Figura 8, observa-se que a amostra é montada verticalmente sob um braço com forma de “L”, e pressionada contra a esfera mediante um peso morto pendurado da seção horizontal do braço. Com este tipo de configuração é possível estabelecer controle sobre parâmetros como: carga

normal aplicada (W), distância deslizada (L_D) e velocidade de rotação da esfera (n_r), proporcionando boa reprodutibilidade dos resultados (TREZONA et al.,1999).

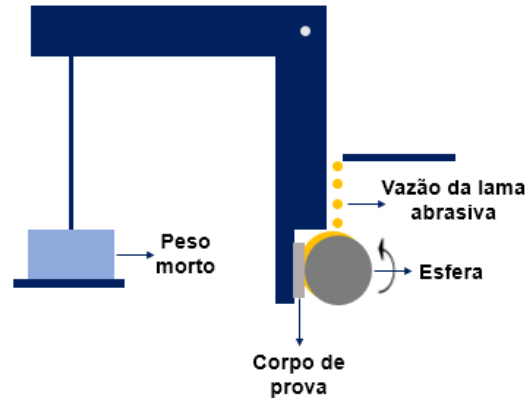


Figura 8. Diagrama representativo do ensaio de microabrasão com esfera fixa (GANT e GEE, 2011).

2.5.5. Influência dos parâmetros de ensaio sobre o comportamento do desgaste microabrasivo.

Na escala de microabrasão, as medições feitas e sua reprodutibilidade podem ser afetadas por parâmetros controláveis como: a carga normal (TREZONA et al.,1999), a distância deslizada (TREZONA et al.,1999), a velocidade de rotação da esfera (BOSE et al., 2005), a fração volumétrica do abrasivo na lama (TREZONA et al.,1999) e o tipo de abrasivo (TREZONA et al.,1999; GAVA et al., 2013), os materiais do corpo e contra-corpo (SHIPWAY , 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005) e a condição superficial da esfera (ALLSOPP et al.,1998). Nos seguintes parágrafos, serão expostos alguns destes fenômenos.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é que a formação da calota esférica depende diretamente da distância, como mostrado por Cassar et al. (2012). Neste trabalho, os autores utilizaram amostras de alumínio comercial puro e um com contra-corpo de esferas de aço AISI 52100, numa configuração de esfera fixa, com uma carga de 0,25 N e uma lama abrasiva com partículas de SiC (4,25 μm), determinando que quanto maior a distância de deslizamento a geometria das crateras de desgaste apresentam aparências mais esféricas como observado na Figura 9.

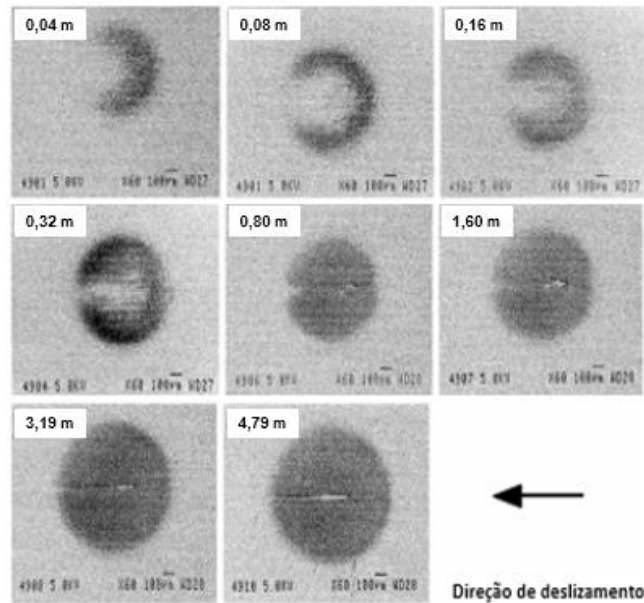


Figura 9. Variação da geometria da esfera em função da distância deslizada, para uma amostra de alumínio comercial puro (CASSAR et al., 2012).

O comportamento do volume desgastado como função da concentração da lama abrasiva, v , foi observado por Trezona et al. (1999) utilizando partículas abrasivas de SiC, uma distância deslizada de 30 m e cargas de 0,25, 0,5 e 1 N. A Figura 10 mostra um comportamento não linear, com um ponto máximo no desgaste, para concentrações entre 0,1 e 0,2 g/cm³ (fração volumétrica entre 0,03 e 0,06).

Para lamas abrasivas com baixa concentração, o volume desgastado foi praticamente independente do valor da carga. Enquanto para concentrações elevadas, o volume de desgaste aumentou consideravelmente para as cargas maiores. É importante ressaltar que o ponto de transição de desgaste abrasivo a dois corpos para o desgaste abrasivo a três corpos, em relação à concentração da lama, mudou quando foi aumentada a carga.

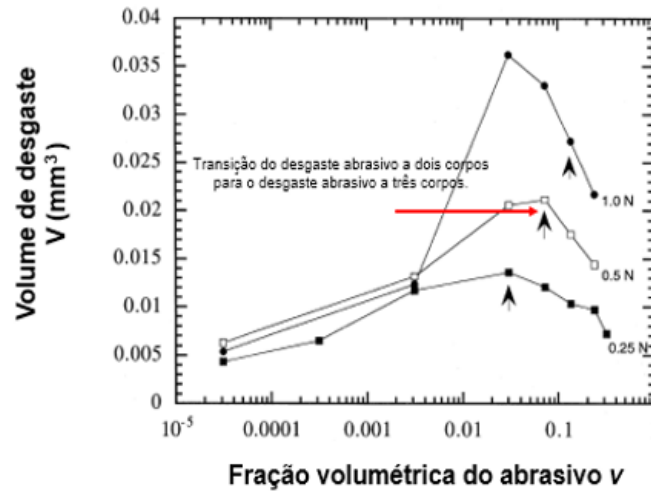


Figura 10. Variação do volume de desgaste após deslizados em função da concentração da lama abrasiva (partículas F1200 SiC) com uma distância deslizada de 30 m. (TREZONA et al., 1999).

Allsopp et al. (1998) ao realizar ensaios com esferas de aço AISI 52100 novas e modificadas demonstrou que, se as mesmas possuíam uma determinada rugosidade antes dos ensaios, a reprodutibilidade melhoraria e os coeficientes de desgaste, baixos para alguns casos, poderiam desaparecer. Esse efeito foi explicado em função do aumento da probabilidade das partículas abrasivas atuarem na zona de contato quando se tem uma superfície rugosa na esfera, como observado na Figura 11. Para uma esfera rígida idealizada, a entrada das partículas abrasivas na zona de contato é determinada pelo atrito resultante entre os elementos.

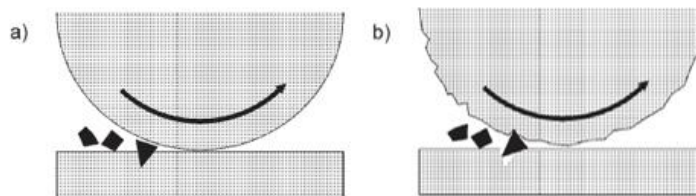


Figura 11. Representação esquemática da entrada das partículas na zona de contato a) partícula incrustada que permanece estacionária b) partícula entrando deslocada pela rugosidade da superfície esfera (ALLSOPP et al., 1998).

Em outro trabalho, realizado para estudar a microabrasão nem vidro (SHIPWAY, 1999), foi determinado que, para esferas fabricadas com materiais como nylon e polipropileno,

o período de tempo necessário para que as partículas abrasivas comecem atuar na zona de contato entre amostra e esfera são menores do que aqueles para esferas fabricadas com materiais como o aço ou alumina, devido ao fato das partículas indentarem mais facilmente os polímeros. Posteriormente, foi determinado que o fator predominante na reprodutibilidade no ensaio é a condição da superfície da esfera (GEE et al., 2003), concluindo que uma esfera rugosa e sem trilha produzida por ensaios tem um comportamento ideal.

Trezona et al. (1999), também, observaram uma variação para a zona de transição entre micromecanismos. Para este estudo, os autores utilizaram também esferas de aço AISI 52100, corpos de prova de aço ferramenta e partículas abrasivas de SiC, Al₂O₃ e diamante. Como resultado, obteve os mapas de desgaste em função da carga e da fração volumétrica da lama abrasiva. A Figura 12 permite observar para os abrasivos utilizados, o comportamentos de desgaste abrasivo por riscamento para baixas concentrações e elevadas cargas, ao passo que, para a condição oposta, elevadas concentrações e baixas cargas, aparece o domínio do desgaste abrasivo por rolamento. Para cada uma das lamas abrasivas ensaiadas, o gráfico apresentou uma zona de transição similar quando se tem partículas de SiC e Al₂O₃ e mais ampla para os ensaios realizados com partículas de diamante.

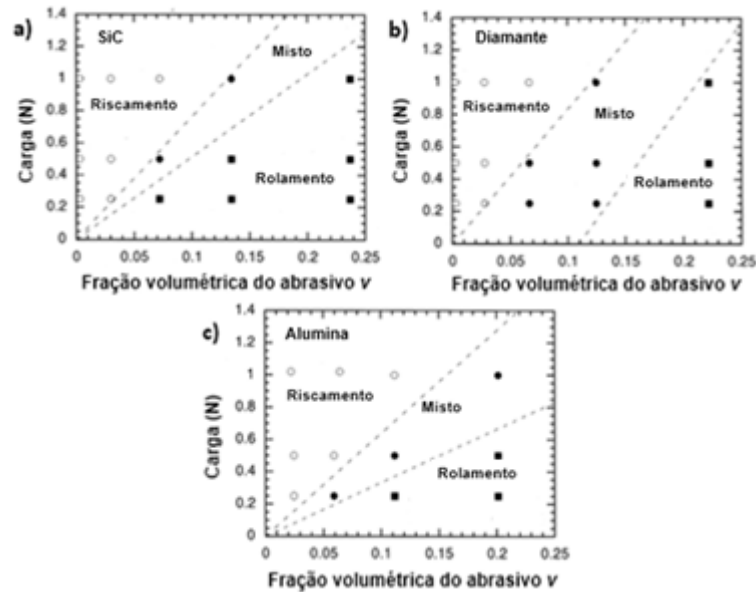


Figura 12. Transição entre os micromecanismos de desgaste em função da força normal e da concentração da pasta abrasiva, para ensaio realizados em corpos de prova de aço ferramenta com esferas de aço AISI 52100 e partículas e a) SiC F1200 b) diamante e c) alumina (TREZONA et al., 1999).

Sendo importante ressaltar que, nessa zona de transição, as crateras mostraram presença de desgaste abrasivo por riscamento na região central e desgaste abrasivo por rolamento nas bordas, como indicado na Figura 13. Este tipo de desgaste é conhecido como desgaste abrasivo misto, característico das cargas e concentrações intermediárias (TREZONA et al., 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005, COZZA et al., 2007; MARQUES et al., 2011; GAVA et al., 2013).

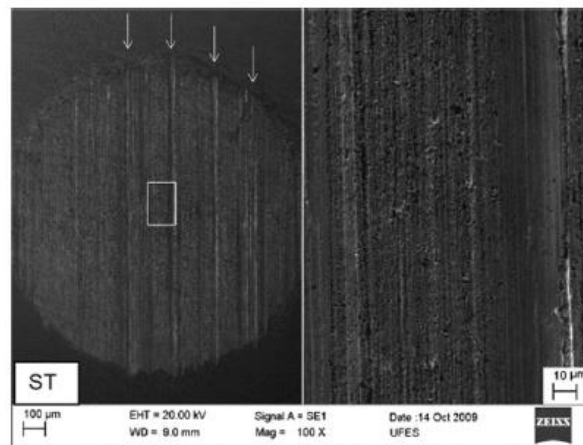


Figura 13. Marcas de desgaste abrasivo misto para aço superduplex UNS S32750 tratado termicamente por solubilização ST, (MEV) (MARQUES et al., 2011).

De igual forma Cozza et al. (2009), mediante estudos de microabrasão realizados com esfera de aço AISI 52100, amostras de aço ferramenta AISI H10, e partículas abrasivas de SiC (3 μm), para duas condições de carga constante e duas condições de pressão constante, observaram em aumentos elevados de imagens MEV, que pode ocorrer uma sinergia entre a abrasão por rolamento e a abrasão por riscamento em uma área igual à área de contato entre a esfera e o corpo de prova, como mostrado na Figura 14. O fenômeno foi descrito como riscos formados por partículas grandes durante o início do ensaio, com rolamento de partículas menores entre a superfície dos riscos formados, para tempos maiores de ensaio. Este comportamento foi definido como abrasão por microrolamento (micro-rolling abrasion) e apresentou diminuições com o aumento da carga normal aplicada e com a diminuição no tempo de ensaio (COZZA et al., 2009, COZZA, 2014).

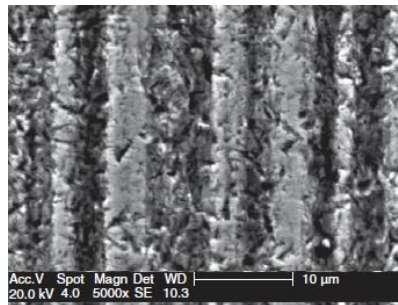


Figura 14. Marcas de abrasão por microrolamento para aço ferramenta AISI H10, utilizando uma carga normal constante de 5 N e uma distância deslizada de 100 m, (MEV) (COZZA et al., 2009).

2.5.6. Movimentação das partículas na zona de contato

A transição do desgaste abrasivo por riscamento para o desgaste abrasivo por rolamento, segundo a literatura, surge devido à mudança na movimentação das partículas abrasivas de deslizamento para rolamento (ADACHI e HUTCHINGS, 2003). Assim, foi proposto um modelo bidimensional, associado a um valor de D/h (WILLIAMS e HYNICICA, 1992), onde D é o diâmetro maior da partícula abrasiva e h é a separação entre as superfícies, como observado na Figura 15.

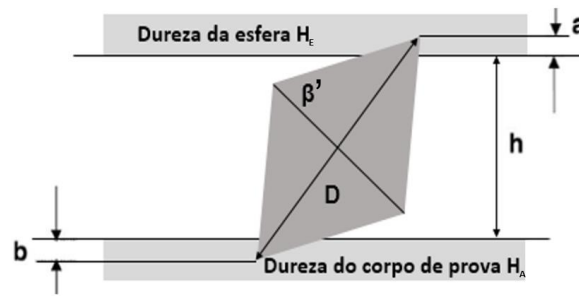


Figura 15. Modelo bidimensional proposto por Williams e Hyncica (1992).

Para uma típica partícula angular com $\beta' = 55^\circ$, a condição de transição entre micromecanismos de desgaste aparece para um valor de D/h aproximadamente igual a 1,74 (WILLIAMS e HYNICICA, 1992), apresentado abrasivo por rolamento, nas condições de baixa carga. Assim, quando as partículas abrasivas suportam cargas um pouco mais altas, as indentações sobre a superfície serão mais profundas ocasionado um valor para $D/h > 1,74$, correspondente ao desgaste abrasivo por riscamento (TREZONA et al., 1999).

Adachi e Hutchings (2003, 2005) também analisaram a zona de contato entre uma partícula abrasiva com diâmetro D , quando uma esfera com dureza H_E e um corpo de prova (plano) com dureza H_A foram empregados. O objetivo foi determinar a separação das superfícies (h), tal como mostrado na Figura 16.

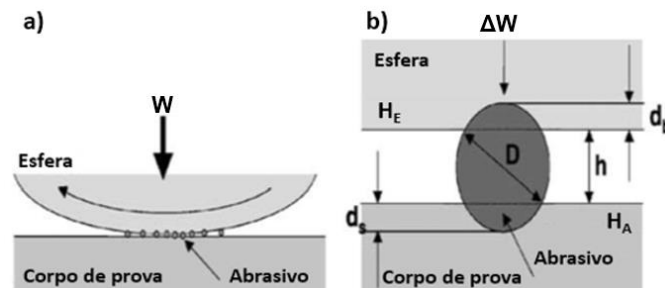


Figura 16. Modelo da zona de contato entre o corpo de prova, a esfera e as partículas abrasivas b) Indentação da partícula abrasiva na esfera e no corpo de prova (ADACHI e HUTCHINGS, 2003).

Assim, para uma carga normal (ΔW) atuando sob uma partícula e produzindo indentações, d_s e d_b sobre as superfícies do corpo de prova e esfera, respectivamente,

tem-se para a distância de separação h , conforme Adachi e Hutchings (2003), a Equação 6:

$$h = D * \left(1 - \frac{2W}{AcvH'} \right) \quad (6)$$

Onde

W: Carga normal total aplicada (suportado por um determinado número de partículas n);

v : Fração volumétrica do abrasivo na lama abrasiva;

c: Constante de proporcionalidade;

A: Área de interação entre os elementos (Área da cratera de desgaste).

Sendo **H'** definida pela Equação 7:

$$H' = \frac{1}{H_E} + \frac{1}{H_A} \quad (7)$$

Para a determinação da área da cratera, Adachi e Hutchings (2003) assumiram que a deformação macroscópica da esfera e do corpo de prova é elástica, determinando que a área de contato A_0 , definida pela Equação 8, fica na região onde a separação das superfícies é menor do que o diâmetro da partícula abrasiva.

$$A_0 = \pi a' = \pi(a^2 + 2RD) \quad (8)$$

Onde

a' = Raio da interação;

a = Raio da área de contato Hertziano;

R = Raio da esfera;

D = Diâmetro da partícula abrasiva.

Tomando $h_c \ll D_E$, sendo h_c a profundidade da cratera e D_E o diâmetro da esfera, e com uma pressão de contato definida nas Equações 9 e 10:

$$P_c = \frac{W}{A_p} \quad (9)$$

$$P_c = \frac{W}{A_s} \quad (10)$$

Cozza et al. (2007) concluíram que $A_s=A_p$, onde A_p é a área total projetada e A_s a área da superfície esférica da cratera, definidas pelas Equações 11 e 12, respectivamente:

$$A_p = \frac{\pi * b^2}{4} \quad (11)$$

$$A_s = \pi * D_E * h_c \quad (12)$$

2.5.7. Severidade de contato

Segundo Adachi e Hutchings (2003, 2005), para um valor determinado de D/h , o ponto de transição entre desgaste abrasivo por rolamento e o desgaste abrasivo por riscamento ocorrerá num valor crítico (S_c), como pode ser observado na equação 13 onde foi definida a severidade de contato (S). Observa-se que cada uma das variáveis que compõem o termo da severidade de contato pode ser mensurada experimentalmente.

$$S = \frac{W}{AvH'} = S_c \quad (13)$$

Finalmente os autores Adachi e Hutchings (2003, 2005), em seus experimentos estabeleceram que o micromecanismo de desgaste para uma ampla faixa de condições de ensaio comporta-se como uma função da severidade de contato S e da relação de durezas da esfera em relação ao corpo de prova (H_A/H_E), no qual o desgaste abrasivo por rolamento aparece nos casos que obedecem à Equação 14 (sendo α e β valores obtidos empiricamente).

$$S = \frac{W}{AvH'} \cong \alpha \left(\frac{H_A}{H_E} \right)^\beta \quad (14)$$

O resultado foi o levantamento do mapa de desgaste, apresentado na Figura 17, que mostra uma transição entre os micromecanismos de desgaste acompanhados de algumas poucas crateras com presença do desgaste misto.

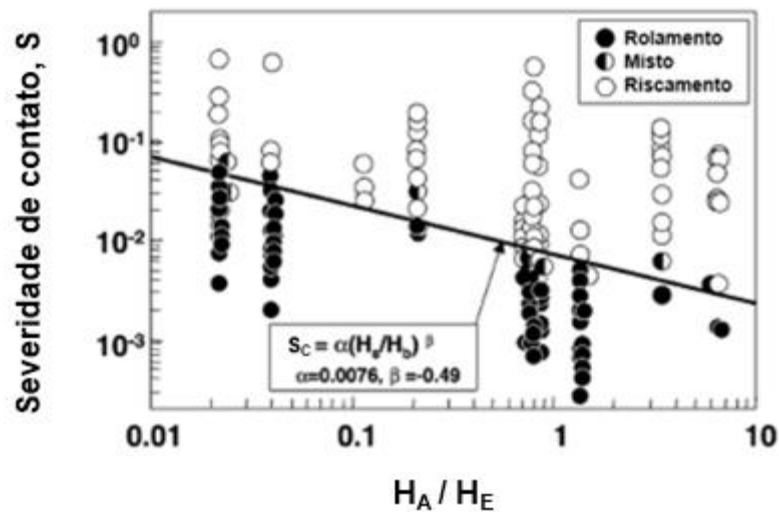


Figura 17. Mapa de desgaste em função da severidade de contato e a relação entre as durezas do corpo de prova e da esfera (ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005).

O resultados obtidos por esses autores também foram utilizados para estudar a severidade de desgaste em materiais não homogêneos (GAVA et al., 2013). Para tal finalidade, foi usado um compósito constituído de matriz metálica (partículas de tungstênio com diferentes diâmetros) e um ligante (latão). O contra-corpo foi a esfera de aço AISI 52100 e a lama abrasiva foi elaborada com SiC, SiO₂ e Fe₂O₃. Os valores de severidade de contato obtidos foram alocados no mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005) considerando duas hipóteses, como observado na Figura 18. A primeira das hipóteses foi definida como isodeformação, isto é, a área de contato é a mesma para a fase de tungstênio e a fase latão duas. Já a segunda foi definida como isocarga, ou seja a carga normal é a mesma para as duas fases, mas a área de contato muda. Foi concluído que a melhor correlação entre os micromecanismos e o mapa de desgaste estará presente se forem consideradas a granulometria do abrasivo ou a evolução da área de contato para cálculo da severidade.

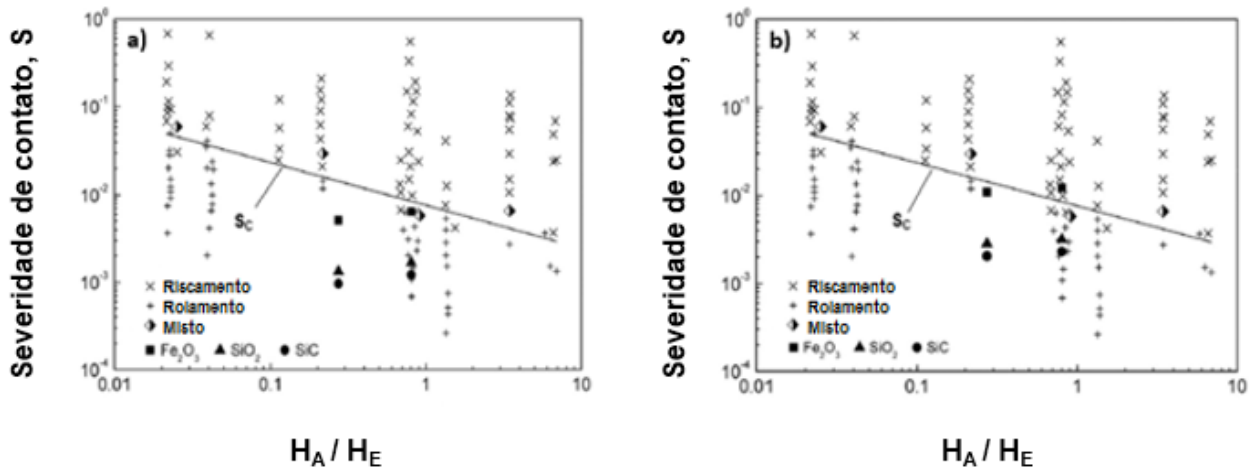


Figura 18. Mapa de desgaste em função da severidade de contato e a relação entre as durezas do corpo de prova e da esfera (GAVA et al, 2013) considerando a evolução na área de contato, em compósitos constituídos de matriz metálica (partículas de tungstênio com diferentes diâmetros) e um ligante (latão) a) para condição “isocarga” e b) para condição “isodeformação”.

CAPITULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Amostras

Neste trabalho, visando atingir o seu objetivo, qual seja determinar a influência da distribuição granulométrica nas taxas e os micromecanismos de desgaste no ensaio de microabrasão, utilizou-se uma liga metálica de microestrutura homogênea: o aço AISI 1020.

As amostras foram seccionadas obtendo as dimensões finais de 30 x 30 x 5 mm, como observado na Figura 19, utilizando uma máquina de corte automática Struers modelo Labotom-3. Prepararam-se as superfícies com politriz manual marca Fortel modelo PLF, empregando lixas de carboneto de silício (SiC) na sequência: 300, 500, 800 e 1200# e, posteriormente, o polimento da superfície foi feito utilizando alumina (Al_2O_3) de 1 μ m.



Figura 19. Imagem de uma das amostras já preparada para a realização dos ensaios.

Todos os corpos de prova foram avaliados no microscópio óptico, para garantir superfícies sem marcas de lixamento. Para finalizar, lavaram-se as amostras com água e álcool e em seguida estas foram secas e acondicionadas num dessecador.

3.1.2. Abrasivos

Como materiais abrasivos para a realização dos ensaios foram escolhidos dois conjuntos de pós diferentes de carboneto de silício. As distribuições do tamanho das partículas foram caracterizadas por meio de um analisador a laser (faixa útil: 0,02 à 2000 μm), Malvern Instruments Ltda, modelo Hydro 2000MU, pertencente ao Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Ensaio de Microabrasão

3.2.1.1. Generalidades

O equipamento escolhido para efetuar os ensaios foi o micro-abrasômetro TE 66 (Plint and Partners, Wokingham, UK) pertencente ao Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), que pode ser observado na Figura 20. O contra-corpo selecionado para a realização dos ensaios foi uma esfera de aço AISI 52100 com um diâmetro de 25,4 mm.

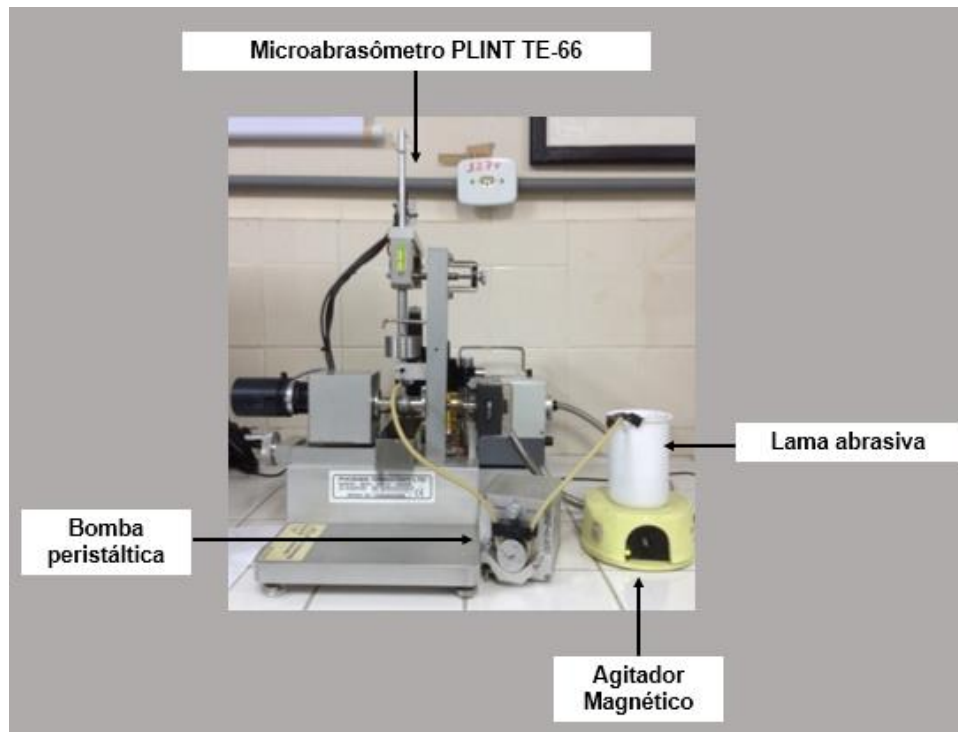


Figura 20. Montagem utilizada durante os ensaios.

Foram prontadas manualmente 7 misturas diferentes com os abrasivos selecionados, variando a fração mássica de cada um, totalizando 9 pós segundo o descrito na Tabela 1. Realizou-se a pesagem das amostras em uma balança de precisão (0,01 g) marca BEL ENGINEERING modelo M2202, além de utilizar a mesma metodologia de caracterização dos abrasivos puros para as misturas.

Tabela 1. Frações mássicas do abrasivo com maior tamanho médio da partícula.

Fração Mássica	Composição
1 (0G)	100% SiC (2,11 μm)
2 (10G)	90% SiC (2,11 μm) e 10% SiC (6,57 μm)
3 (20G)	80% SiC (2,11 μm) e 20% SiC (6,57 μm)
4 (30G)	70% SiC (2,11 μm) e 30% SiC (6,57 μm)
5 (40G)	60% SiC (2,11 μm) e 40% SiC (6,57 μm)
6 (50G)	50% SiC (2,11 μm) e 50% SiC (6,57 μm)
7 (70G)	30% SiC (2,11 μm) e 70% SiC (6,57 μm)
8 (80G)	20% SiC (2,11 μm) e 80% SiC (6,57 μm)
9 (100G)	100% SiC (6,57 μm)

Na tabela 2, a seguir, são descritos os parâmetros operacionais definidos para a realização dos ensaios.

Tabela 2. Parâmetros selecionados para a realização dos ensaios.

Rotação do eixo condutor	150 rpm
Força normal	0,2 e 0,4 N
Distância deslizada	239,39 m
Concentração do abrasivo	0,1 g/cm ³
Vazão	1 gota cada 3 s

A limpeza das amostras e esfera foi feita antes e depois da realização dos ensaios, com álcool e acetona utilizando um limpador ultrassônico, em baterias de dez minutos para cada substância. Além disso, a superfície da esfera também foi preparada antes de cada ensaio, sendo agitada em uma solução de água destilada e areia com a finalidade de

eliminar qualquer marca na superfície da mesma; atribuir rugosidade que permitisse às partículas abrasivas atingir a zona de contato mais facilmente e assegurar uma melhor reprodutibilidade nos estudos segundo Allsopp et al. (1998) e Gee et al., (2003).

Prepararam-se as lammas abrasivas como uma suspensão em água destilada de cada pó descrito na Tabela 2, mantendo sempre a concentração de $0,1 \text{ g/cm}^3$ definida na Tabela 1. Após preparo, a suspensão foi homogeneizada empregando um agitador magnético.

O ensaio é iniciado posicionando a amostra na máquina e fazendo um nivelamento por contrapeso até alcançar um equilíbrio estático do conjunto (porta-amostra, braço e peso morto). Posteriormente, fixa-se a esfera rotativa entre dois semi-eixos como mostrado na Figura 21, sendo um deles o eixo motor do equipamento. Estabelecendo desta forma a configuração de esfera fixa descrita na seção anterior. Também, adicionam-se os pesos equivalentes a carga normal do ensaio. Então, como observado na Figura 20, a lama abrasiva que continua sendo agitada é adicionada sob a zona de contato entre os elementos (esfera/corpo de prova) por meio de um sistema composto por uma mangueira e uma bomba peristáltica, estabelecendo desta forma o tribosistema.



Figura 21. Montagem da esfera entre os semi-eixos.

Durante o ensaio, os parâmetros como a carga normal, a velocidade de rotação e o número de rotações da esfera são controlados pelo equipamento e registrados pelo software Compend 2000 V2.23.

Ao ser formada, a cratera de desgaste, o porta-amostras é posicionado de tal forma que seja possível, com um sistema de iluminação (microscópio, o software Infinity Analyser®-v.4 e o software Capture®-v.4) estabelecer o diâmetro da calota gerada. Na Figura 22, são apresentados os detalhes da montagem.

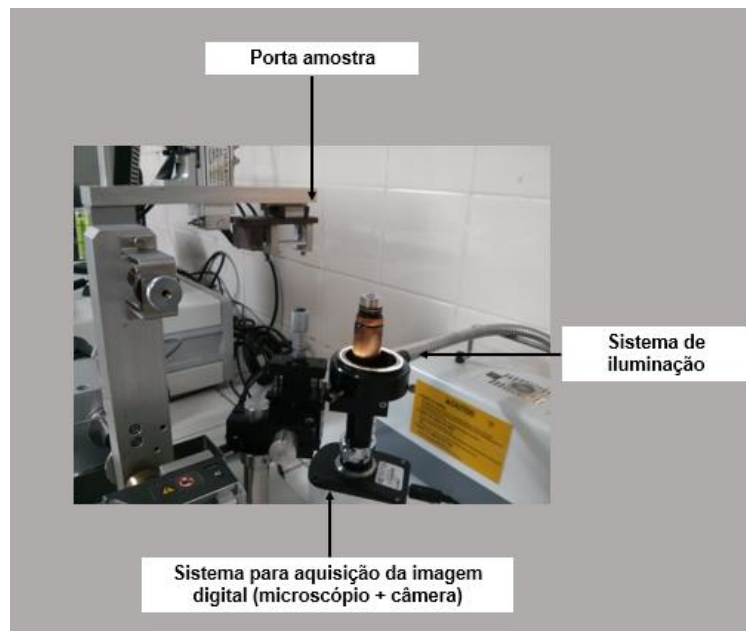


Figura 22. Montagem estabelecida para medição do diâmetro da calota.

3.2.1.2. Determinação do coeficiente de desgaste

Levando-se em conta que no ensaio de microabrasão a geometria da cratera de desgaste possuirá a mesma geometria do contra-corpo, conforme observado na Figura 6, a Equação 4 é válida para o cálculo do volume desgastado e, combinando-a com a Equação 3, tem-se a Equação 15 para o coeficiente de desgaste dimensional, k ($m^3/N \cdot m$), quando $b \ll D_E$.

$$k = \frac{\pi * b^4}{32 * D * L * W} \quad (15)$$

Onde

W: força normal estática;

b: diâmetro da calota;

D_E : diâmetro da esfera;

L: distância deslizada.

Assim, realizaram-se três séries por condição (lama abrasiva + carga), com uma duração de vinte minutos ou trezentas revoluções do eixo para cada bateria, com paradas a cada dois minutos para monitorar o comportamento do coeficiente de desgaste mediante a geometria da cratera como explicado em parágrafos anteriores.

Considerando que para qualquer sistema tribológico dado, só com a obtenção do regime permanente de desgaste é possível a coleta de dados confiáveis, determinou-se que o regime permanente seria atingido quando o coeficiente de variação, em relação a k, para os últimos quatro pontos fosse inferior a 7%, como observado na Figura 23. Finalmente, para o cálculo de k em cada condição, as médias aritméticas levam em conta os últimos três valores de cada série.

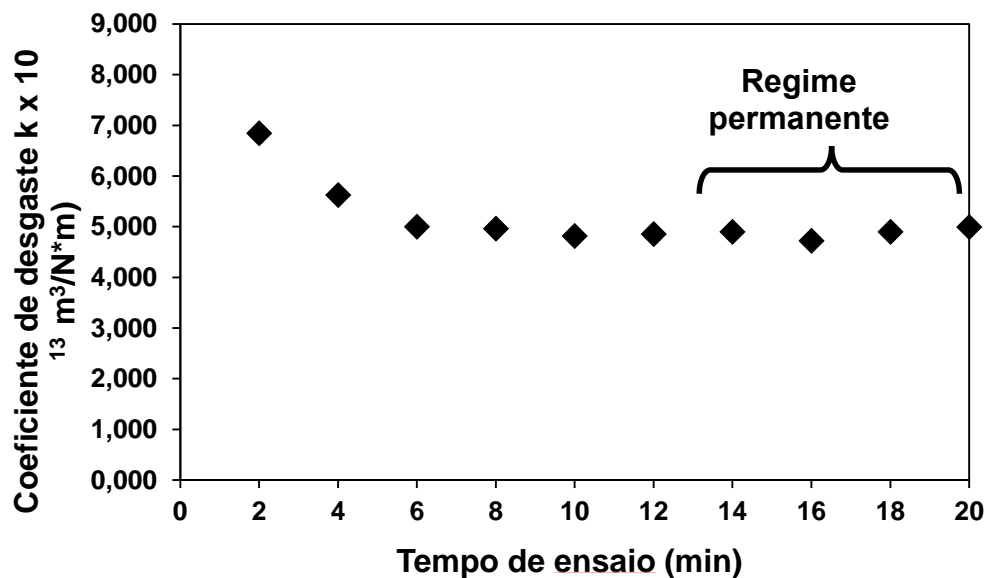


Figura 23. Curva obtida durante o ensaio de microabrasão realizado com a fração mássica 1 (0G) e carga normal de 0,2 N.

3.2.2. Análise Topográfica

Para verificar que uma cratera de desgaste possui a forma de uma calota esférica e conforme ao contra-corpo, foi indispensável à utilização de um Analisador Topográfico 3D do fabricante TAYLOR HOBSON, modelo TALYSURF CLI 2000, pertencente ao Laboratório de Caracterização e Análise de Superfícies (LCSM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), já que as equações utilizadas durante os cálculos estão baseadas nessa premissa.

Os parâmetros utilizados para as análises topográficas foram de 100 pontos por milímetro na direção de rolamento do contra-corpo e 2000 pontos por milímetro na direção perpendicular a esta, numa área de 4 mm² (2 mm x 2 mm), definida para cada uma das crateras de desgaste. Utilizou-se o software TALYMAP GOLD v.4.1.2.4621 para realizar todas as análises e para a obtenção das imagens das calotas.

3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura

Os micromecanismos de desgaste resultantes foram observados em cada uma das superfícies das crateras de desgaste com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura marca ZEISS, modelo EVO 40XVP, pertencente ao Laboratório de Caracterização e Análise de Superfícies (LCSM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Geraram-se imagens com quatro diferentes aumentos que permitiram avaliar as condições finais do desgaste para cada um dos ensaios realizados.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS ABRASIVOS

Conforme apresentado na seção dos materiais e métodos, utilizaram-se dois conjuntos de pós de carboneto de silício (SiC) para a realização dos ensaios, cujas granulometrias foram obtidas com o princípio da difração a laser. Cada pó apresentou uma distribuição granulométrica Gaussiana, com valores para o tamanho médio da partícula de 2,11 μm (P - Pequeno) e 6,57 μm (G -Grande).

De igual forma, para cada uma das misturas realizadas com as diferentes frações mássicas dos abrasivos (10G, 20G, 30G, 40G, 50G, 70G e 80G), também determinou-se a distribuição granulométrica, obtendo-se uma expansão na largura das curvas e uma diminuição no tamanho médio das mesmas. No entanto, para os pós com maior quantidade de partículas grandes na composição, foi determinada uma tendência bimodal na curva resultante. Todos os resultados são apresentados na Figura 24.

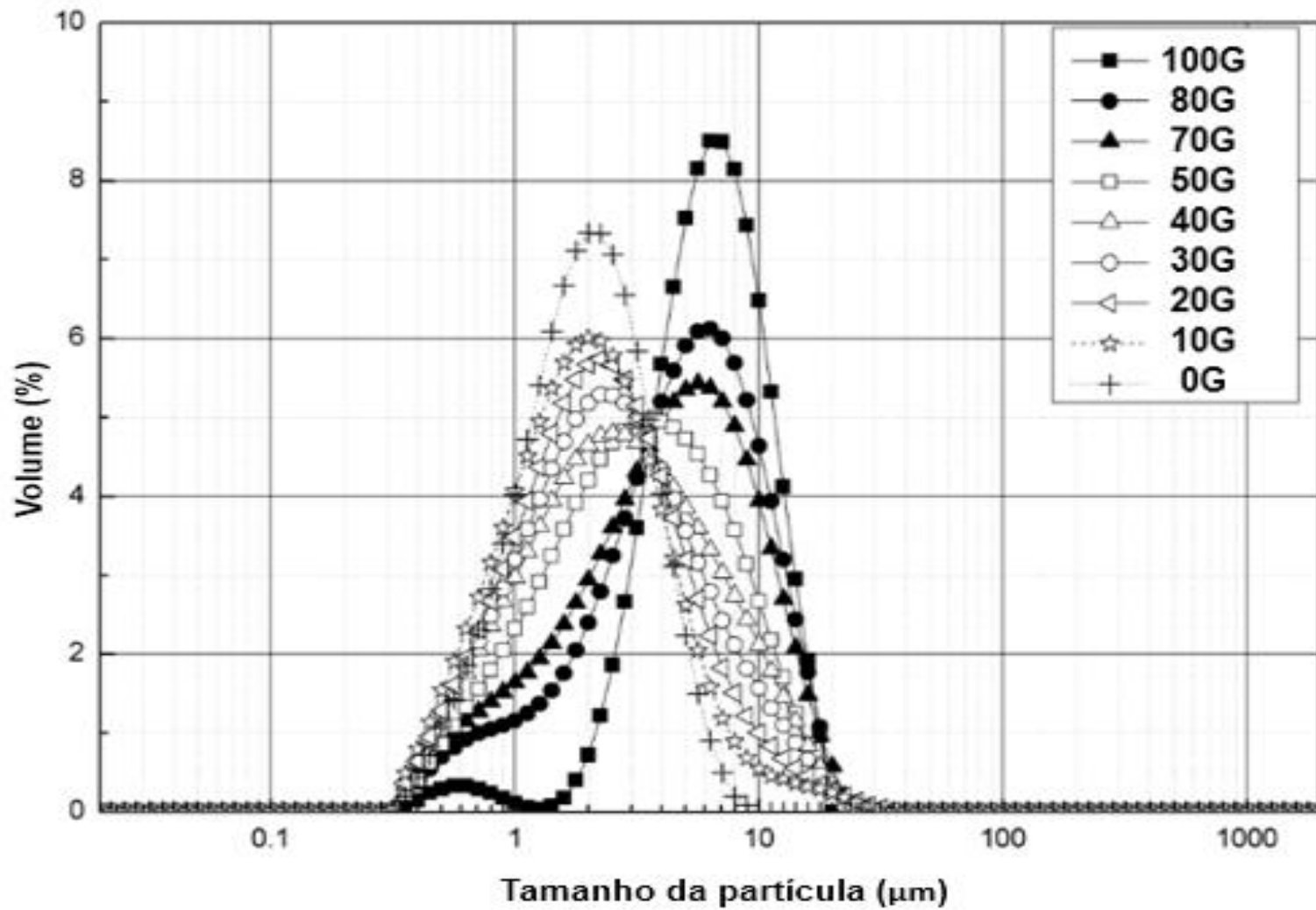


Figura 24. Distribuições de tamanho das partículas dos diferentes pós de SiC utilizados para a realização dos ensaios.

Na Tabela 3, podem ser observados os tamanhos médios obtidos para cada uma das distribuições com suas respectivas larguras.

Tabela 3. Tamanho médio das partículas e largura da distribuição dos pós de SiC utilizados para a realização dos ensaios.

Fração mássica	Tamanho médio da partícula (µm)	Largura da distribuição
1 (0G)	2,11	1,66
2 (10G)	2,59	2,28
3 (20G)	3,00	2,55
4 (30G)	3,30	2,84
5 (40G)	3,67	2,95
6 (50G)	4,06	2,57
7 (70G)	5,06	2,32
8 (80G)	5,44	2,04
9 (100G)	6,57	1,40

4.2. ENSAIOS DE MICROABRASÃO

4.2.1. Análise topográfica em 3D

A Figura 25 abaixo mostra a geometria esférica da cratera de desgaste obtida para umas das baterias realizadas com a condição de lama abrasiva 100G e carga normal de 0,2 N.

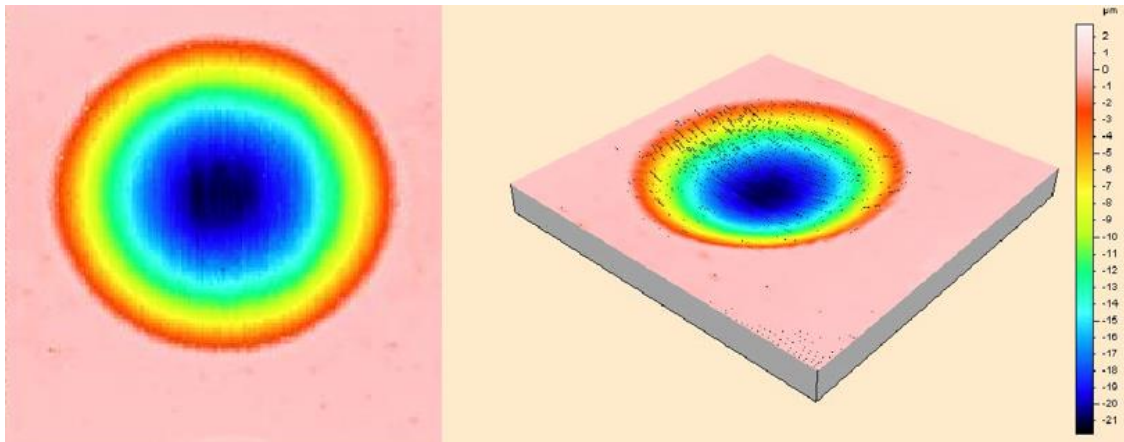


Figura 25. Cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.

Em seguida, sob aquela imagem foi realizado o traçado de uma linha passando pelo centro da cratera que permite obter o perfil da seção transversal da zona desgastada, como observado na Figura 26.

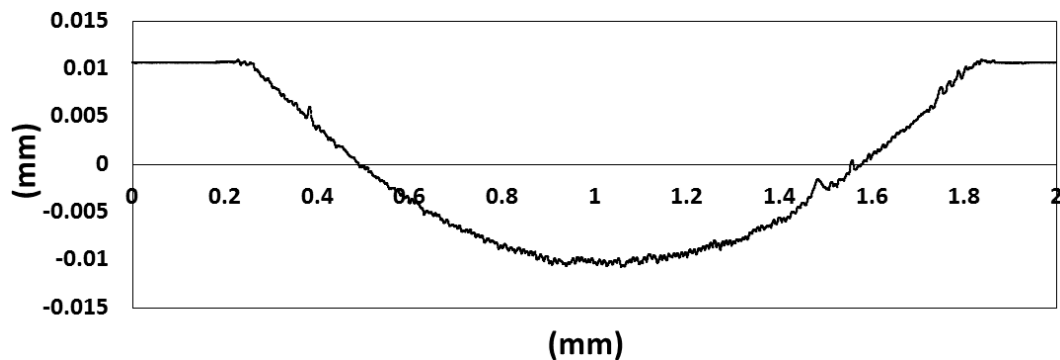


Figura 26. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.

Também, obteve-se a equação para uma circunferência com um diâmetro de 25,4 mm ($R=12,7$ mm), com centro obtido pela observação da Figura 26, na qual foram substituídas as coordenadas obtidas do perfil, obtendo como resultado a sobreposição dos gráficos, tal como observa-se na Figura 27, concluindo que a marca de desgaste é esférica e por tanto as formulações usadas da literatura são validas para o presente estudo (MARQUES et al., 2011).

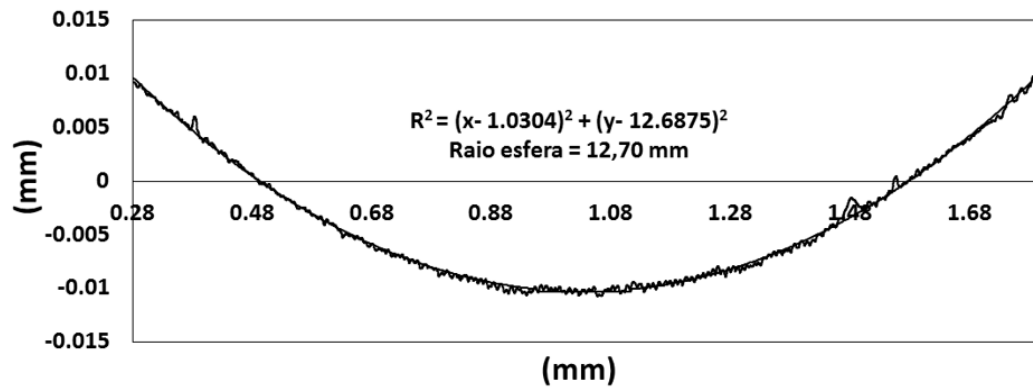


Figura 27. Sobreposição da equação da esfera sob o perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.

Nos anexos F e G, estão contidos alguns perfis das calotas obtidas para cada uma das condições avaliadas.

4.2.2. Determinação do coeficiente de desgaste dimensional.

Como estabelecido no capítulo 3, a obtenção do regime permanente de desgaste estaria sujeita a um coeficiente de variação inferior ao 7% em relação a k , para os últimos quatro pontos de cada ensaio (LOZZER, 2008; GAVA, 2010; MARQUES, 2009, 2011), neste caso dos 14 aos 20 minutos. A Figura 28 apresenta uma curva do coeficiente médio de desgaste dimensional k em função de tempo calculado com base nos valores do diâmetro da cratera (COZZA, 2006; 2011), obtidos utilizando a fração mássica 1 (0G) e carga normal de 0,2 N.

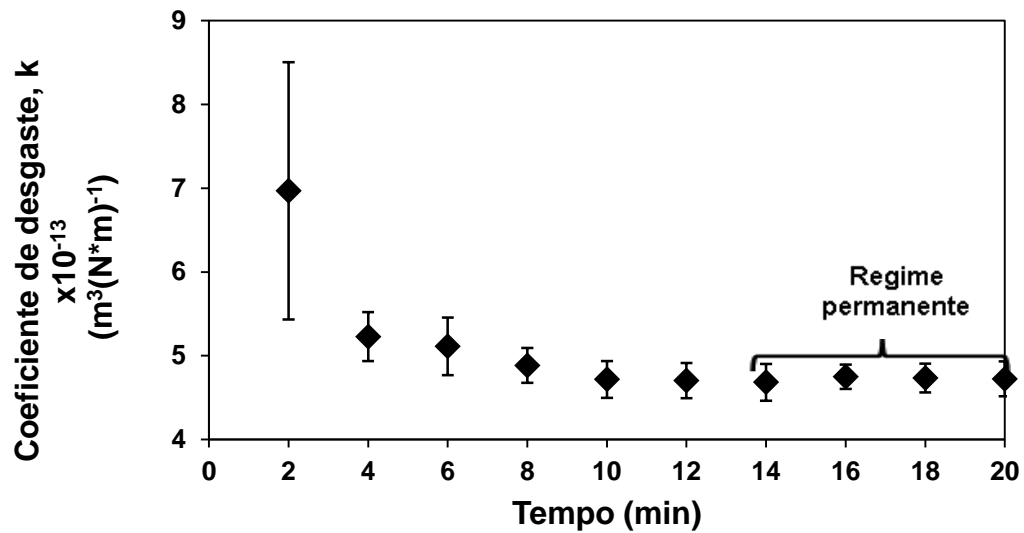


Figura 28. Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo, para a condição de 0G com carga normal de 0,2 N.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos com a fração mássica 1 (0G) e uma carga normal de 0,2 N.

Tabela 4. Valores do coeficiente de desgaste, k, obtidos durante os ensaios realizados para a condição de 0G com carga normal de 0,2 N.

Tempo (min)	kI	kII	kIII
2	6,84E-13	8,91E-13	5,15E-13
4	5,63E-13	5,12E-13	4,93E-13
6	5,00E-13	5,58E-13	4,76E-13
8	4,96E-13	5,09E-13	4,60E-13
10	4,82E-13	4,92E-13	4,41E-13
12	4,86E-13	4,85E-13	4,41E-13
14	4,90E-13	4,77E-13	4,38E-13
16	4,72E-13	4,94E-13	4,59E-13
18	4,90E-13	4,80E-13	4,50E-13
20	5,00E-13	4,68E-13	4,49E-13
Valor Médio de k	4,74E-13		

4.2.3. Coeficientes de desgaste

Para o coeficiente de desgaste k dimensional ($\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), em função da fração mássica das partículas grandes na lama abrasiva, observa-se para cada uma das condições de carga utilizadas, uma tendência não linear com a presença de um k mínimo para os ensaios realizados com a lama abrasiva 50G (50% em massa do abrasivo grande e 50% e massa do abrasivo pequeno), conforme observado na Figura 29.

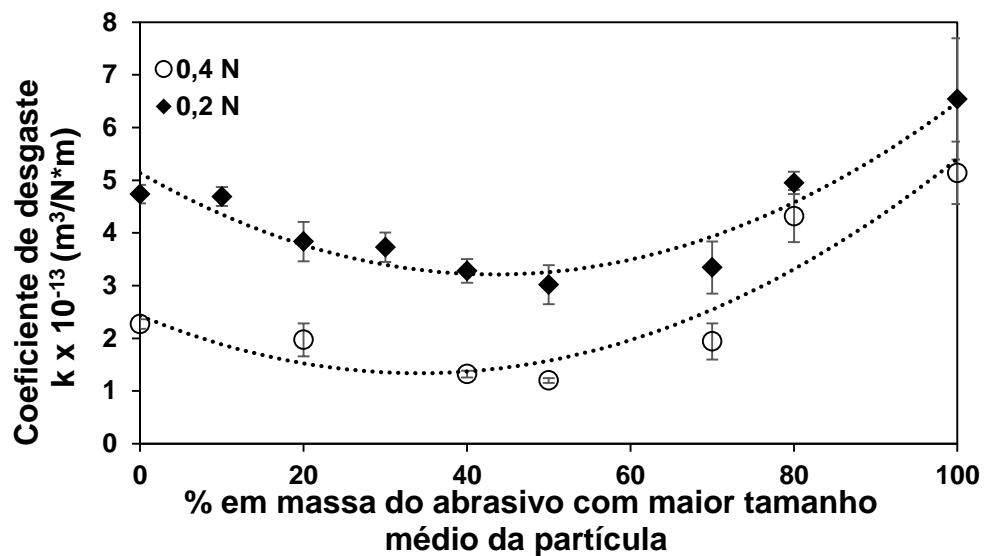


Figura 29. Comportamento do coeficiente de desgaste em função da fração mássica do abrasivo maior ($\text{SiC } 6,57 \mu\text{m}$) na lama abrasiva.

De igual forma, observou-se o mesmo resultado quando o comportamento do volume de desgaste, V , foi avaliado em função da fração mássica do abrasivo maior ($6,57 \mu\text{m}$), conforme Figura 30.

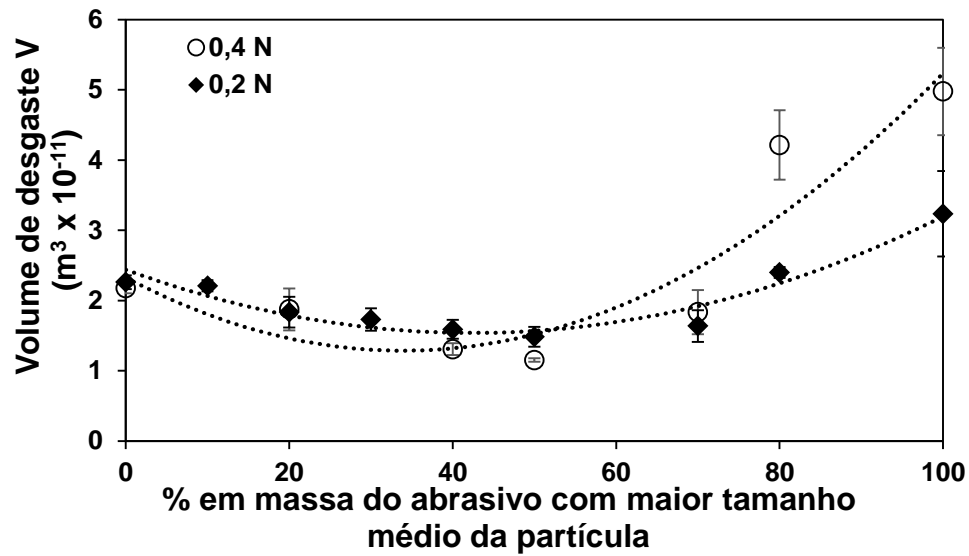


Figura 30. Comportamento do volume de desgaste em função da fração mássica do abrasivo maior (SiC 6,57 μm) na lama abrasiva.

Os resultados da Figura 30 apresentam semelhanças e diferenças ao respeito das análises realizadas por Trezona et al. (1999), para o comportamento do volume de desgaste em função da fração volumétrica do abrasivo (Figura 10).

Assim, segundo Trezona et al. (1999), quando se têm baixas concentrações de abrasivo e assumindo partículas que não sofrem fratura, existe um momento no qual cada partícula na zona de contato incrusta-se totalmente nas superfícies da esfera e corpo de prova (Figura 31) devido à alta carga que suporta, e qualquer incremento posterior nesta será suportado pelas asperidades dos elementos, produzindo que o desgaste abrasivo possa ser aumentado só com aumento da fração volumétrica de partículas na lama utilizada. E as anteriores características estão presentes neste trabalho, na região com baixas frações mássicas do abrasivo com maior tamanho médio das partículas, para cada uma das cargas aplicadas (0,2 N e 0,4 N).

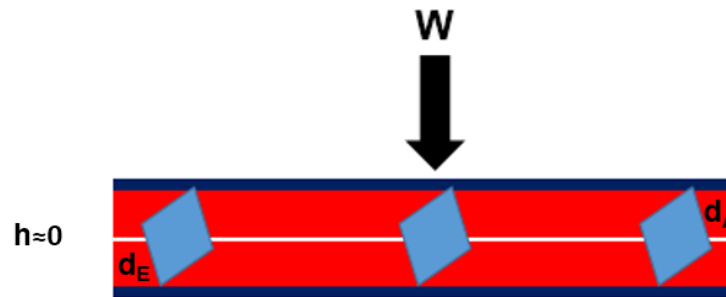


Figura 31. Representação da indentação completa das partículas abrasivas na zona de contato para baixas concentrações de abrasivo.

Por outro lado, segundo Trezona et al. (1999), para ensaios realizados com elevadas frações volumétricas de abrasivo na lama (baixa carga por partícula), determinou-se um aumento do volume de desgaste com o aumento na carga aplicada, resultado que foi obtido neste trabalho quando nos ensaios foram utilizadas as lamas com uma alta fração mássica do abrasivo com maior tamanho médio das partículas, no entanto, teve-se uma diferença nos comportamentos deste trabalho e os obtidos por Trezona et al. (1999), devido à presença do volume de desgaste mínimo para os ensaios realizados com a fração mássica 50G, o que não corresponde a um incremento monotônico no volume de desgaste observado na Figura 10.

Assim, pode se considerar que, a área inicial de contato ocorre predominantemente com as partículas com maior tamanho médio, e existindo uma distribuição uniforme de carga, é possível supor que pequenas frações destas partículas serão associadas com indentações mais profundas (d_A e d_B), que correspondem à diminuição na distância de separação, h , entre o corpo de prova e a esfera (Equação 6), de acordo com a Figura 32.

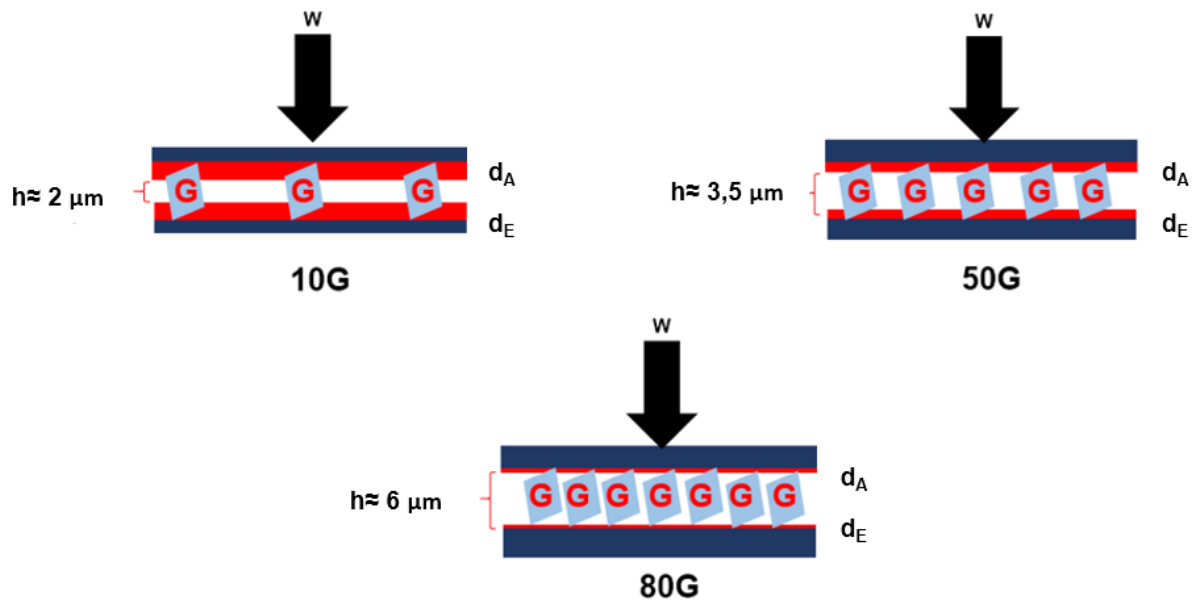


Figura 32. Comportamento da distância de separação final para ensaios realizados com carga de 0,2 N.

Com a finalidade de observar a evolução dos valores de h m função do tempo, é apresentada a Figura 33, que mostra o comportamento de dito valor para cada uma das lamas abrasivas utilizadas neste trabalho com carga normal aplicada de 0,2 N. O ponto inicial, para cada uma das curvas de h representadas, foi calculado usando a equação proposta por Adachi e Hutchings (2003, 2005) para a área de contato, descrita pela Equação 8, enquanto que para cada um dos pontos seguintes, os quais correspondem a cada uma das paradas realizadas durante o ensaio, o cálculo foi feito considerando a evolução do diâmetro da cratera. As duas abordagens sempre levaram em conta que a carga aplicada seria suportada pelas partículas grandes, para cada uma das distribuições granulométricas (CASSAR et al., 2012; GAVA et al., 2013).

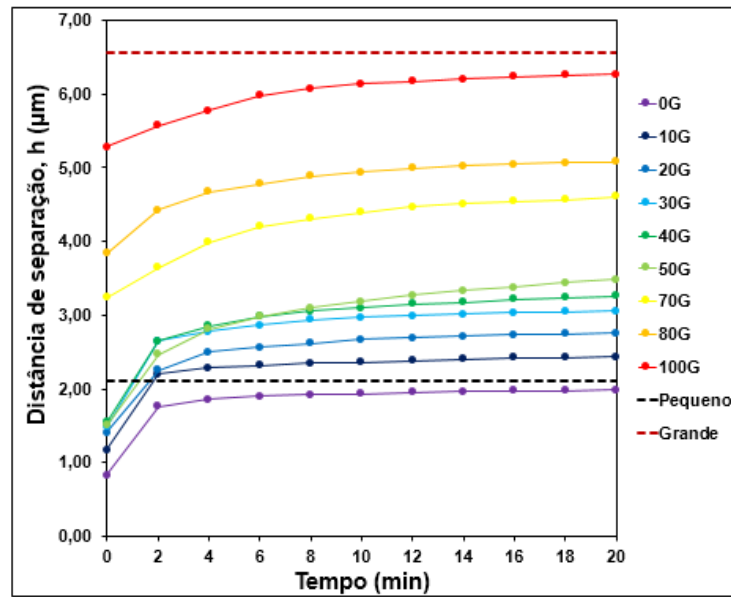


Figura 33. Comportamento da distância de separação, h , durante o tempo de ensaio para cada uma das frações mássicas de abrasivo maior utilizadas na condição de 0,2N.

Ainda na Figura 33, as linhas horizontais foram desenhadas para indicar o tamanho médio dos pós abrasivos originais (2 e 6 μm aproximadamente). Estas linhas permitem diferenciar na figura duas regiões com comportamentos para os valores de h . Na primeira, têm-se para as frações mássicas 0G à 50G, separações próximas aos 2 μm (aproximadamente o tamanho médio da partícula do abrasivo pequeno), e na segunda região, para as condições 50G à 100G, foram observadas separações próximas aos 6 μm (aproximadamente o tamanho médio da partícula do abrasivo grande), o qual indica que as partículas ativas na zona de contato correspondem à fração mássica dominante no abrasivo.

Desta forma, pode ser relacionada a fração volumétrica das partículas pequenas com a fração volumétrica das partículas ativas, para as condições de 0G à , e, a fração volumétrica das partículas grandes com a fração volumétrica das partículas ativas nas condições de 50G à 100G, sendo este valor calculado mediante a Equação 16.

$$N_A = g * v \quad (16)$$

Onde

g = % de partículas dominantes na mistura (P- 0G à 50G e G- 50G à 100G).

v = Fração volumétrica de abrasivo na lama.

A Figura 34 mostra o comportamento dos volumes de desgaste como função das frações volumétricas das partículas ativas na zona de contato. A figura permite ver que quando as partículas ativas na zona de contato correspondem às frações volumétricas do abrasivo pequeno (0G à 50G), os volumes de desgaste apresentaram comportamentos quase iguais para os dois valores de carga utilizados durante os ensaios (0,2 e 0,4 N). No entanto, para as condições nas quais as partículas ativas correspondem as frações volumétricas de abrasivo grande (50G à 100G), vê-se um incremento significativo na quantidade de material removido com o incremento da carga, sendo esses resultados os mais próximos aos apresentados por Trezona et al. (1999), (veja Figura 10, Capítulo 2).

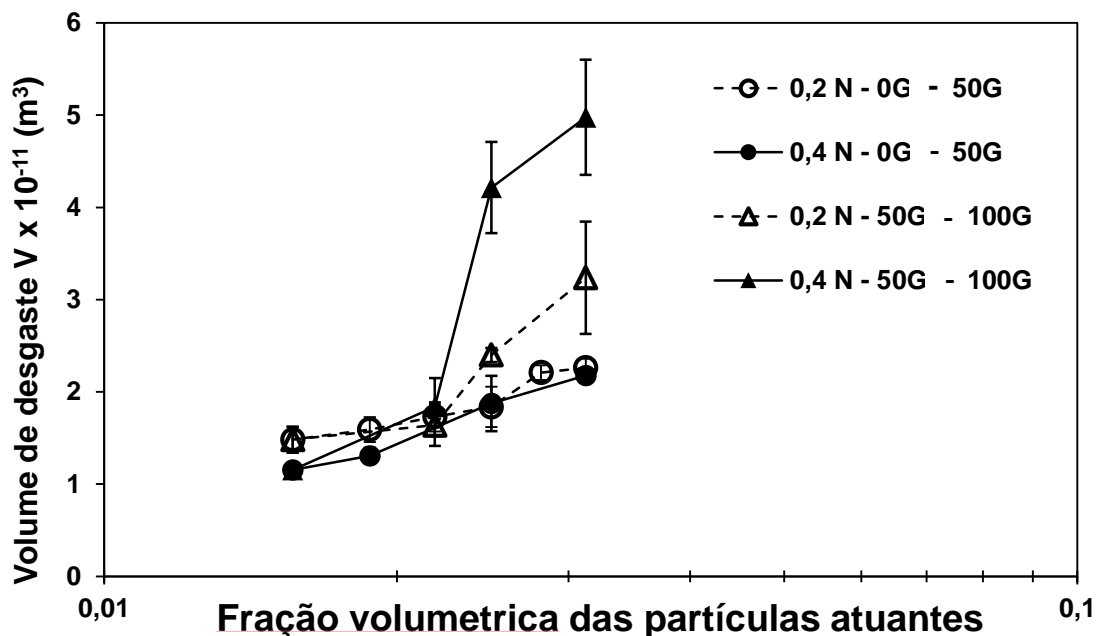


Figura 34. Comportamento do volume de desgaste como função da fração mássica das partículas efetivas a para o desgaste.

4.2.4. Micromecanismos de desgaste

Em termos dos micromecanismos de desgaste as Figura 35,36 e 37 apresentam uma sequência de imagens com diferentes ampliações da superfície da cratera de desgaste obtida para uma das baterias efetuadas com as frações mássicas de 0G, 50G e 100G respectivamente, utilizando uma carga normal de 0,2 N.

Nos anexos B e C, também podem ser encontradas outras sequências para cada uma das duas cargas aplicadas (0,2 e 0,4 N).

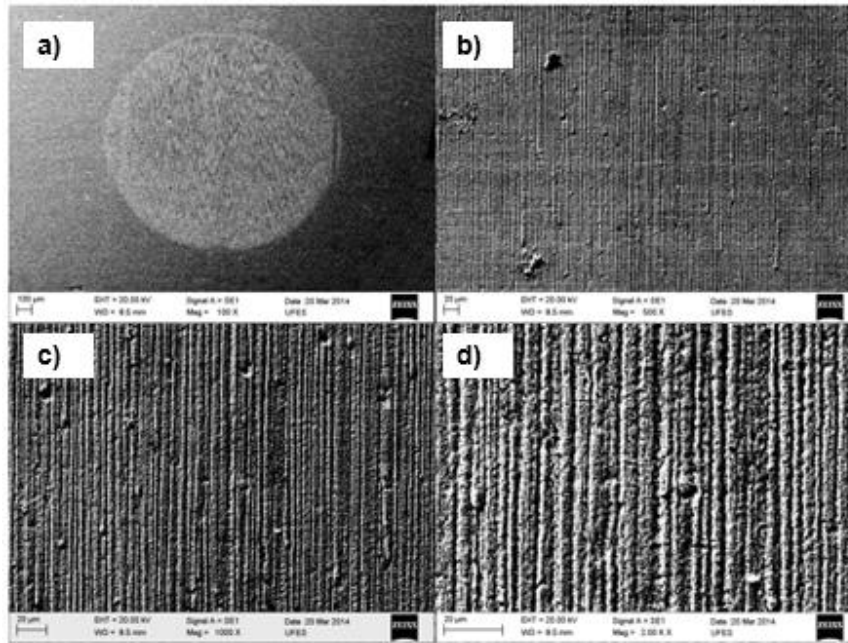


Figura 35. Análise MEV, elétrons secundários, da cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 1 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x.

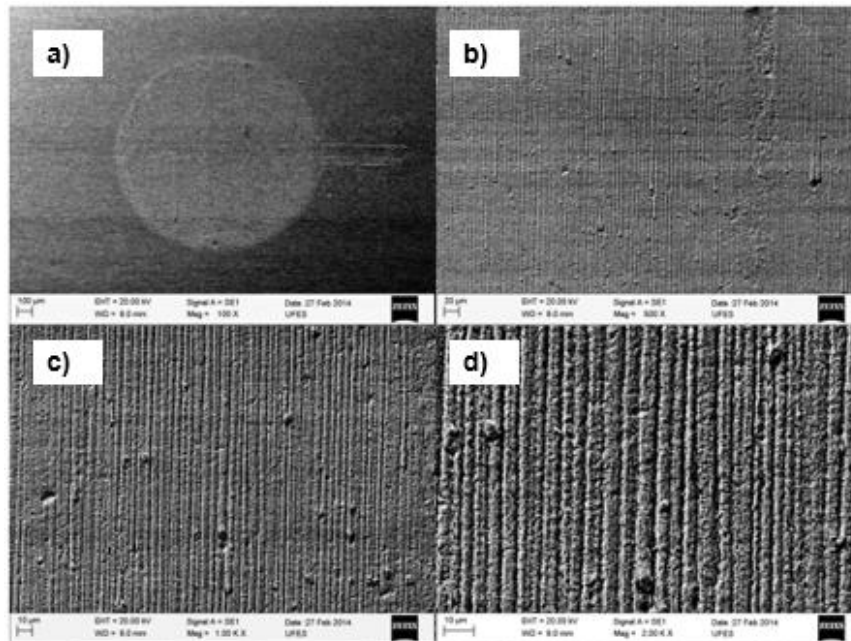


Figura 36. Análise MEV, elétrons secundários, da cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 6 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x.

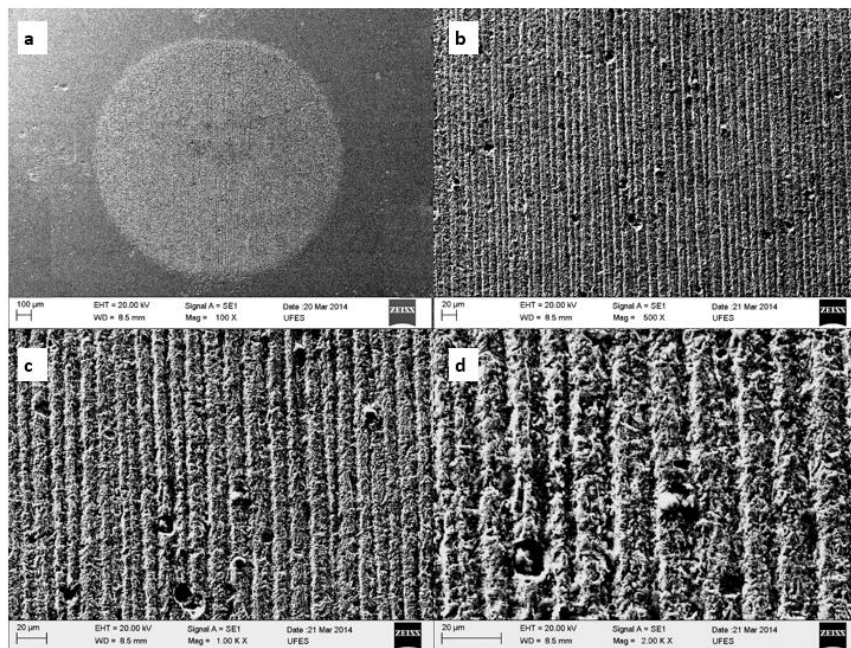


Figura 37. Análise MEV, elétrons secundários, da cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 9 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x.

Nas Figuras 34-b, 35-b e 36-b, o mecanismo corresponde ao deslizamento das partículas formando riscos definidos (TREZONA et al., 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003, 2005;

COZZA, 2007; GAVA et al., 2013). No entanto, quando observam-se as Figuras 34-d, 35-d e 36-d, a percepção do mecanismo dominante de desgaste sobre a superfície muda totalmente, uma vez que apareceram marcas de rolamento de partículas entre os riscos, características que encaixam perfeitamente na definição para a abrasão por microrolamento (micro-rolling) realizada por Cozza et al. (2009).

A Figura 38 apresenta imagens com ampliações elevadas das superfícies desgastadas com cada uma das frações mássicas definidas na Tabela 1.

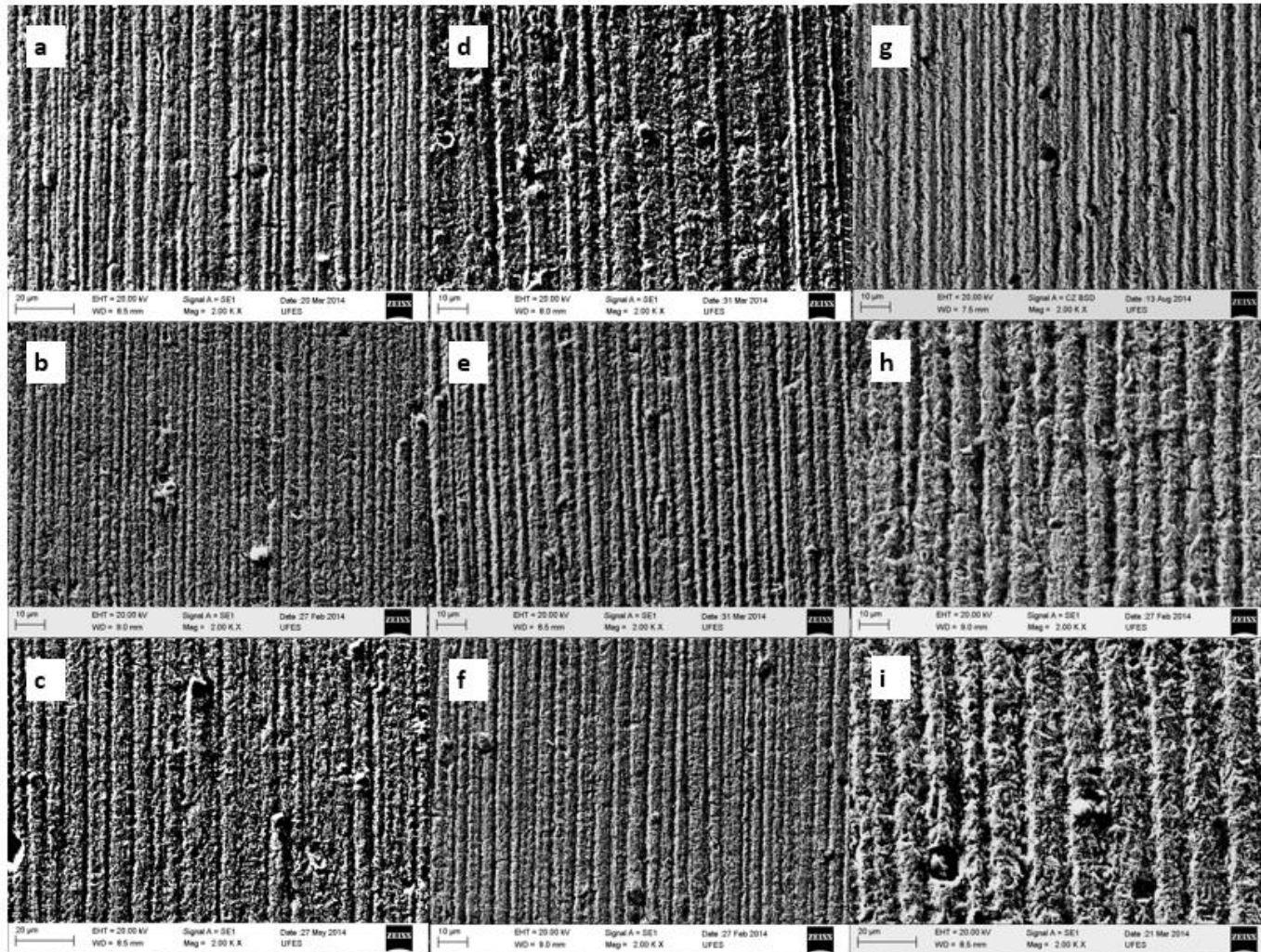


Figura 38. Análise MEV, detector secundário, 2000X, das crateras de desgaste correspondentes aos ensaios realizados com cada fração mássica do abrasivo com o maior tamanho médio da partícula para a condição da carga normal de 0,2 N a) 0G; b) 10G; c) 20G; d) 30G; e) 40G; f) 50G; g) 70G; h) 80G; i) 100.

Os resultados observados mostram algumas marcas de rolamento das partículas para todas as condições, mas especialmente para as superfícies resultantes nos ensaios realizados com os abrasivos puros (0G e 100G). No entanto, ao observar a Figura 37, conclui-se que os resultados de microrolamento, com características semelhantes às aquelas apresentadas pelos ensaios realizados com a condição de 100G, não podem ser associados com distribuições granulométricas amplas ou com distribuições granulométricas bimodais, de acordo com a Figura 24.N

Por outro lado, a Figura 39 apresenta a condição final da superfície desgastada para os ensaios realizados com a fração mássica 9 (100G), com as cargas de trabalho de 0,2 N e 0,4 N. A Figura 39-b correspondente à condição com a menor carga (0,2 N), apresentou uma superfície com alta presença de rolamento das partículas pequenas entre os riscos, ao contrário da Figura 39-d que correspondente à superfície desgastada com a condição de maior carga (0,4 N), a qual evidenciou riscos mais definidos, concordando com a diminuição no rolamento das partículas com o incremento da carga normal aplicada, como foi exposto por Cozza et al. (2009).

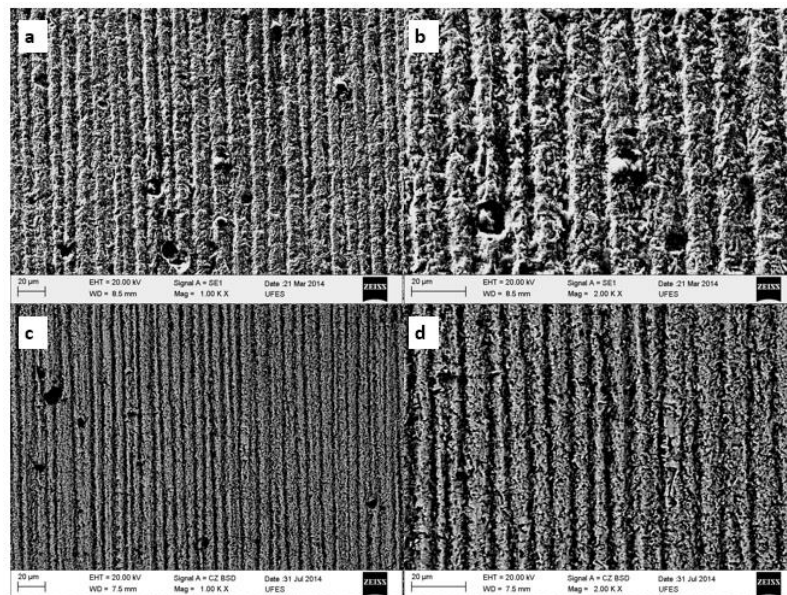


Figura 39. Análise MEV, das crateras de desgaste correspondentes ao ensaios realizados com a fração mássica 9 (100G) para as duas condições de carga normal utilizadas 0,2 N (secundário) a)1000x b)2000x, e 0,4 N (retroespalhado) c)1000x d) 2000x.

4.2.5. Severidade de contato

Por outro lado, a aparição do microrrolamento durante os ensaios, também pode ser explicada mediante a análise da severidade de contato no mapa de micromecanismos de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

As Figuras 40, 41 e 42 apresentam os resultados da evolução da severidade de contato para as condições nas quais foram utilizadas as frações mássicas 1 (0G) e 6 (50G) e 9 (100G), considerando como área da cratera de contato inicial (A_0), a área definida por Adachi e Hutchings (2003). Os pontos seguintes levam em consideração as medições dos diâmetros da cratera durante os ensaios, considerando a evolução da área de contato (COZZA et al., 2007, CASSAR et al., 2012; GAVA et al., 2013).

Os resultados mostrados nessas figuras confirmam uma diminuição na severidade de contato durante o ensaio conforme os resultados apresentados por Cozza et al. (2007). Para este trabalho, os resultados obtidos com as frações mássicas 1 (0G) e 9 (100G) mostraram uma condição final próxima do limite entre a abrasão por rolamento e abrasão por riscamento. Assim, um aumento na quantidade de partículas rolando sobre a zona de contato seria esperado com o transcorrer do ensaio, favorecendo a presença conjunta com os riscos formados durante o início do desgaste.

Nos anexos D e E, estão contidos os gráficos correspondentes a cada uma das misturas testadas com cada um dos valores de carga aplicada (0,2 e 0,4 N).

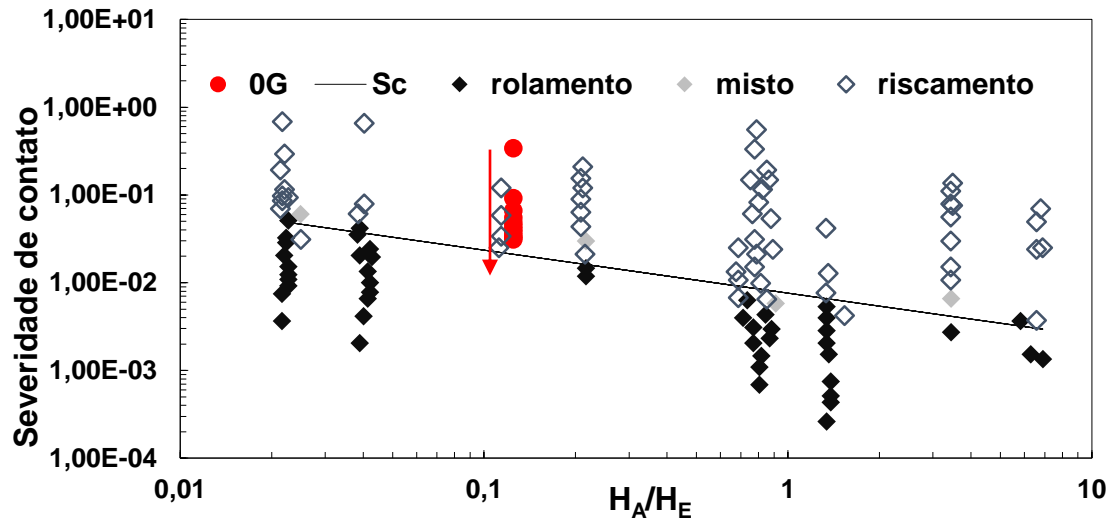


Figura 40. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 0G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

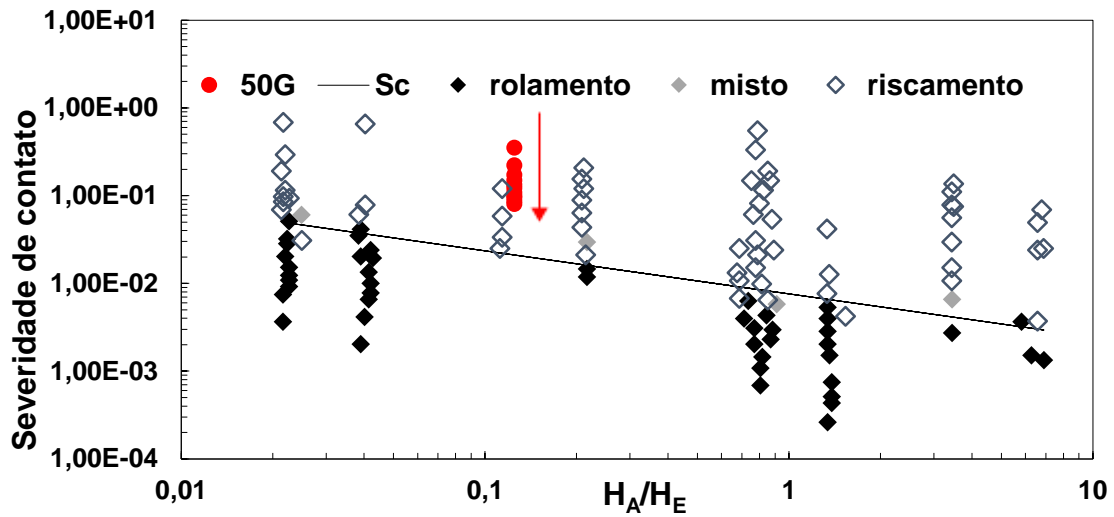


Figura 41. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 50G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

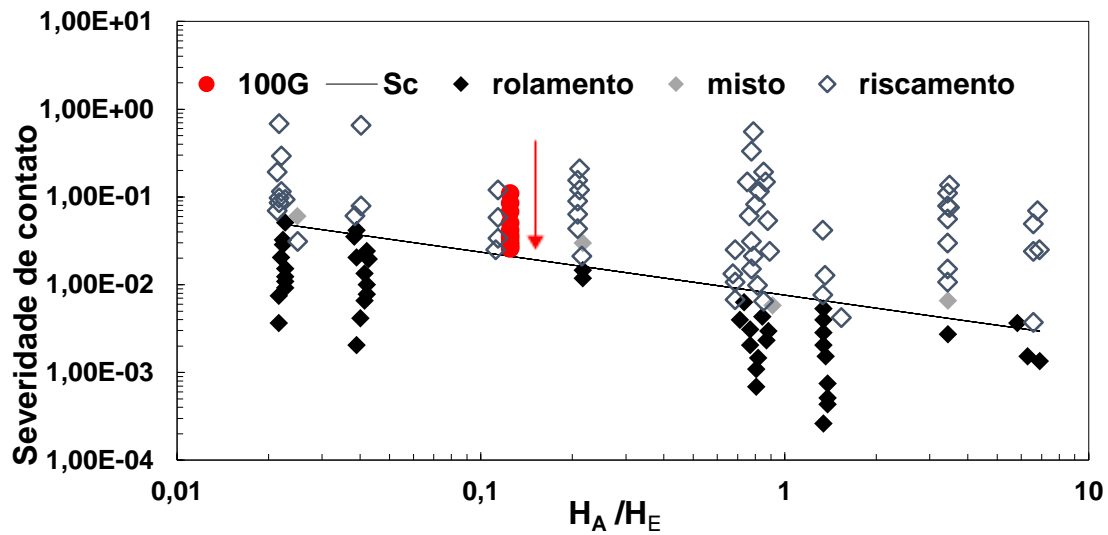


Figura 42. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 100G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

As Figuras 40, 41 e 42, concordam com o aumento de partículas rolando entre os riscos formados previamente, quando, avalia-se a variação na quantidade de partículas abrasivas ativas, mediante o mapa de desgaste proposto por Trezona et al. (1999), como observado na Figura 43. Nesta figura, também é possível notar uma diminuição dos eventos associados ao rolamento de partículas, quando, a carga normal aplicada é aumentada, fenômeno que já tinha sido observado nas micrografias das crateras de desgaste. Todo isso, permite afirmar que este trabalho tem uma alta concordância com os resultados apresentados por Trezona et al. (1999) e por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

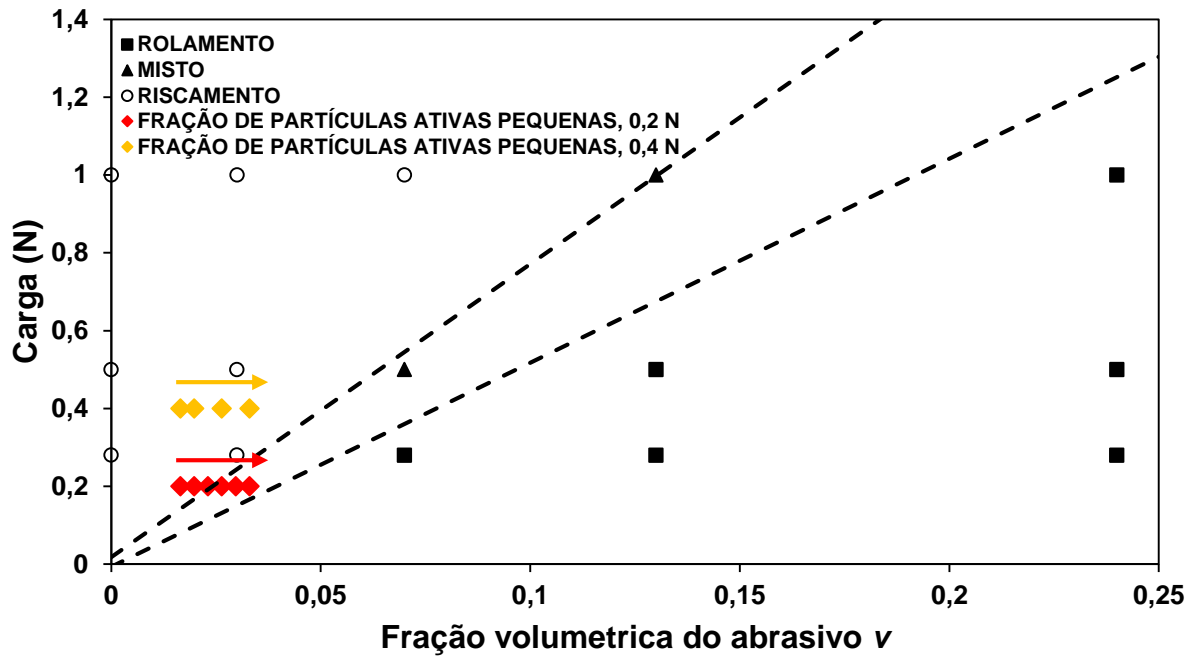


Figura 43. Análise da transição entre os micromecanismos de desgaste levando em conta a variação das partículas ativas, para as misturas de 0G à 50G e as duas condições de carga aplicadas (0,2 e 0,4 N), segundo o mapa de desgaste proposto por Trezona et al. (1999).

CAPITULO 5

5. CONCLUSÕES

De acordo com o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005), o mecanismo dominante durante o transcurso dos ensaios foi o desgaste abrasivo por riscamento. No entanto, mediante as análises MEV das superfícies das crateras de desgaste, foi determinado para alguns dos casos rolamento de partículas ao longo dos riscos formados durante o início dos ensaios, com uma frequência mais alta em aqueles que foram conduzidos usando os pós com distribuições granulométricas normais.

Com a misturas das duas distribuições granulométricas normais com diferente tamanho médio das partículas (6,57 μm e 2,11 μm), observou-se a presença de um volume de desgaste mínimo na condição 50G, para os dois valores de carga normal aplicada utilizados durante os ensaios, determinando-se, uma correlação não linear entre o coeficiente de desgaste, k , e o tamanho médio da partícula abrasiva para estas condições.

O coeficiente de desgaste aumenta com o aumento na fração volumétrica de partículas que são efetivas na zona de contato e o tamanho das mesmas é determinado pela distância de separação entre as superfícies da esfera e o corpo de prova.

O microrolamento está diretamente relacionado com a evolução do micromecanismo de desgaste durante o ensaio. O decréscimo observado na severidade de contato permite que na condição final de cada ensaio o mecanismo de desgaste presente seja posicionado perto da zona mista de desgaste, onde se teve aparição de impressões geradas por partículas que rolaram entre os riscos já definidos.

CAPITULO 6

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para tentar dar continuidade aos trabalhos realizados sugere-se:

Realizar ensaios de microabrasão para as mesmas misturas utilizando valores mais altos para carga normal aplicada, aumentando também a fração volumétrica das partículas na lama abrasiva. Cabe ressaltar que qualquer tentativa de reprodução do ensaio usando diferentes tipos de abrasivos proporcionará um complemento aos resultados obtidos utilizando partículas de SiC.

Considerado o fato de realizar a mistura de dois abrasivos com uma maior diferença para o valor médio do tamanho das partículas. E, também, trabalhar com tamanhos médios maiores indo da micro para a macroabrasão.

CAPITULO 7

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADACHI, K., HUTCHINGS, I.M. Sensitivity Of Wear Rates In The Micro-Scale Abrasion Test To Test Conditions And Material Hardness. **Wear** (2005) p. 318-321.

ADACHI, K., HUTCHINGS, I.M. Wear Mode-Mapping For The Micro-Scale Abrasion Test. **Wear** (2003) p. 23-29.

ALLSOPP, D.N., TREZONA, R.I., HUTCHINGS, I.M. The Effects Of Ball Surface Condition In The Micro-Scale Abrasive Wear Test. **Tribology Letters** (1998) p. 259-264.

ASTM G77-91: Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.

BOSE, K, WOOD, R. J. K. Optimun Tests Conditions For Attaining Uniform Rolling Abrasion In Ball Cratering Tests On Hard Coatings. **Wear** (2005) p. 322 – 332.

CAMERINI, R., SOUZA, R., CARLI, F. PEREIRA, A., BALZARETTI N.M. Ball Cratering Test On Ductile Materials. **Wear** (2011) p. 770-774.

CASSAR, G., BANFIELD, S., AVELAR-BATISTA WILSON, J.C., HOUDSEN, J., MATTHEWS, A., LEYLAND, A. Micro-Abrasion Wear Testing Of Triode Plasma Diffusion And Duplex Treated Ti-6al-4v Alloy. **Wear** (2012) p. 377-387.

COZZA, R.C., DE MELLO, J.D.B., TANAKA, D.K., SOUZA, R.M. Relationship Between Test Severity And Wear Mode Transition In Micro-Abrasive Wear Test. **Wear** (2007) p. 111-116.

COZZA, R.C., TANAKA, D.K., SOUZA, R.M. Friction Coefficient And Abrasive Wear Modes In Ball-Cratering Tests Conducted At Constant Force And Constant Pressure- Preliminary Results. **Wear** (2009) p. 61-70.

COZZA, R.Z. **Estudo Do Comportamento Do Coeficiente De Desgaste E Dos Modos De Desgaste Abrasivo Em Ensaios De Desgaste Micro-abrasivo**. Dissertação De Mestrado, 2006, Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil.

COZZA, R.Z. **Estudo Do Desgaste E Atrito Em Ensaios Micro-abrasivos Por Esfera Rotativa Fixa Em Condições De Força Normal Constante E Pressão Constante**. Tese De Doutorado, 2011 Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil.

COZZA, R.Z. Third Abrasive Wear Mode: Is It Possible? **Journal Of Materials Research And Technology**, 2014, p 191-193.

GANT, A.J., GEE, M.G. A Review Of Micro-Scale Abrasion Testing, **Journal of Physics D: Applied Physics** 44 (2011) 073001 15pp.

GAVA, G.H.S. **Micropenetração Instrumentada Em Compósitos De Matriz Metálica A Base De Tungstênio Empregados Em Coroas De Perfuração Utilizadas Em Sondagem Mineral**. Dissertação De Mestrado, 2010, Departamento De Engenharia Mecânica Da Universidade Federal de Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil.

GAVA, G.H.S., SOUZA, R.M., DE MELLO, J.D.B., DE MACÊDO, M.C.S., SCANDIAN, C. Effect Of Load Partition And Particle Distribution On Micro-Abrasive Wear Mapping Of Two-Phase Metal Matrix Composites. **Wear** (2013) p. 130-136.

GEE, M.G., GANT, A., HUTCHINGS, I.M., BETHKE, R., SCHIFFMANN, K., VAN ACKER, K., POULAT, S., GACHONF, Y., VON STEBUT, J. Progress Towards Standardisation Of Ball Cratering. **Wear** (2003) p. 1-13.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 1992.

KASSMAN, Å., JACOBSON, S., ERICKSON, L, HEDENQVIST, P., OLSSON, M. A New Test Method For The Intrinsic Abrasion Resistance Of Thin Coatings. **Surface and Coatings Technology** (1991) p. 75,84.

LOZZER, A. M. **Microabrasão De Compósitos De Matriz Metálica A Base De Tungstênio Empregados Em Coroas De Perfuração Utilizadas Em Sondagem Mineral**. Dissertação De Mestrado, 2008, Departamento De Engenharia Mecânica Da Universidade Federal De Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil.

MARQUES, F. **Influência Das Fases Endurecedoras α' , σ , E χ Do Aço Super Dúplex UNS S32750 No Comportamento Em Microabrasão**. Dissertação De Mestrado, 2009, Departamento De Engenharia Mecânica Da Universidade Federal De Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil.

MARQUES, F., DA SILVA, W.M., PARDAL, J.M., TAVARES, S.S.M., SCANDIAN. Influence Of Heat Treatments On Micro-Abrasion Wear Resistance Of A Superduplex Stainless Steel, **Wear** (2011) p. 1288-1294.

MARTINEZ, F. **La Tribología: Ciencia Y Técnica Para El Mantenimiento**. Mexico: Limusa, 2002.

MCNSHUTKIN, B. N., Russia's Lomonosov, Princeton: Princeton University Press, 1952.

Real Academia Española, Diccionario De La Lengua Española 22.a ed (2001). Consultado em <http://lema.rae.es/drae/?val=tribologia>

RUTHERFORD, K.L., HUTCHINGS, I.M. A Micro-Abrasive Wear Test, With Particular Application To Coated Systems. **Surface and Coating Technology** march (1996) p. 231-239.

RUTHERFORD, K.L., HUTCHINGS, I.M. Theory And Application Of A micro-Scale Abrasive Wear Test. **Journal of Testing and Evaluation**, (JTEVA) A2 v. 25, march (1997) p. 250–260.

SHIPWAY, P.H., The Role Of Test Conditions On The Microabrasive Wear Behaviour Of Soda-Lime Glass, **Wear** (1999) p.191–199.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR A. W. **Engeneering Tribology**. Amsterdam: New York: Elsevier, 1993.

TREZONA, R.I, ALLSOPP, D.N., HUTCHINGS, I.M. Transitions Between Two-Body E Three-Body Abrasive Wear: Influence Of Test Conditions In The Microscale Abrasive Wear Test. **Wear** (1999) p. 205-214.

WILLIAMS, J.A., HYNICICA, A.M. Abrasive Wear In Lubricated Contacts. **Journal of Physics D** (1992) p. A81-A90.

WILLIAMS, J.A., HYNICICA, A.M. Mechanism Of Abrasive Wear In Lubricated Contacts. **Wear** (1992) p. 57-74.

ZUM GAHR, K.H. – **Microstructure and Wear of Materials** – Elsevier, 1987

CAPITULO 8

8. ANEXOS

ANEXO A- DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ARCHARD PARA O DESGASTE ABRASIVO

ANEXO B- IMAGENS MEV DE AMOSTRAS ENSAIDAS COM A CARGA NORMAL APLICADA DE 0,2 N.

ANEXO C- IMAGENS MEV DE AMOSTRAS ENSAIDAS COM A CARGA NORMAL APLICADA DE 0,4 N.

ANEXO D- ANÁLISES DE SEVERIDADE DE CONTATO PARA AMOSTRAS ENSAIDAS COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,2 N.

ANEXO E- ANÁLISES DE SEVERIDADE DE CONTATO PARA AMOSTRAS ENSAIDAS COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,4 N.

ANEXO F- IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ESFÉRICO PARA CRATERAS DE DESGASTE COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,2 N.

ANEXO G- IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ESFÉRICO PARA CRATERAS DE DESGASTE COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,4 N.

ANEXO A- DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ARCHARD PARA O DESGASTE ABRASIVO

A dedução da equação começa considerando uma partícula cônica que desliza sobre uma superfície plana de um material dúctil sob a ação de uma carga normal ΔW (Figura A-1):

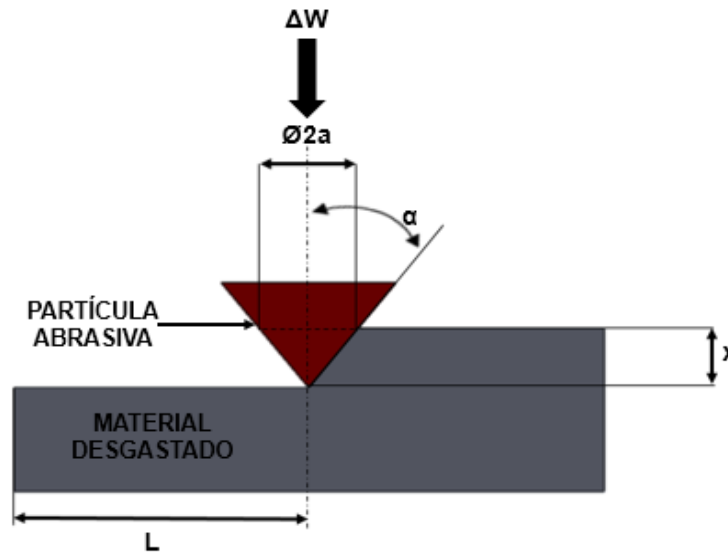


Figura A-1 Representação para partícula abrasiva idealizada, deslizando sobre um material dúctil (HUTCHINGS, 1992).

A carga ΔW gera uma pressão P que age sobre a área de contato entre a partícula e a superfície. Como a partícula está em movimento de translação, o contato ocorre somente sobre sua superfície frontal. Portanto, ΔW fica:

$$\Delta W = P * \frac{\pi * a^2}{2} \quad (A-1)$$

Da Figura A1 e levando em conta a geometria temos para a Equação A-1:

$$\Delta W = \frac{1}{2} * P * \pi * x^2 * \tan^2 \alpha \quad (\text{A-2})$$

A deformação plástica na superfície do material será desprezível, caso a partícula abrasiva se deforme, ou se rompa antes que P atinja o valor de aproximadamente σ_{esc} (sendo σ_{esc} , a tensão de escoamento do material da superfície). Entretanto, se P atingir $\approx 3\sigma_{esc}$, a superfície sofrerá uma acentuada deformação plástica. Esse valor de P é denominado dureza de indentação, ou seja, é a dureza do material ($P = H$), e possui dependência com a forma da partícula abrasiva. Nessa condição, o volume de material deslocado ao longo da ranhura a uma distância L é definido por:

$$V = L * a * x \quad (\text{A-3})$$

Que também pode ser expressado como:

$$V = L * x^2 * \tan^2 \alpha \quad (\text{A-4})$$

Assim de todo material deslocado lateralmente à partícula, somente uma fração η é removida como fragmentos de desgaste, por unidade de distância de deslizamento. Finalmente, a taxa de desgaste de uma partícula (q) é definido como:

$$q = \eta \frac{V}{L}$$

$$q = \eta \frac{L * x^2 * \tan^2 \alpha}{L}$$

$$q = \eta * x^2 * \tan^2 \alpha \quad (\text{A-5})$$

E isolando x da equação I-2:

$$x^2 = \frac{2\Delta W}{P * \pi * \tan^2 \alpha}$$

Substituindo na equação I-5:

$$q = \eta \frac{2\Delta W}{P * \pi * \tan^2 \alpha} \quad (\text{A-6})$$

Onde para um número “ n_p ” de partículas o volume total de material removido por unidade de distância de deslizamento, define-se como:

$$Q = \eta \sum_{i=1}^{n_p} q_i = \left\{ \frac{2\eta}{H * \pi * \tan^2 \alpha} \right\} * \sum_{i=1}^{n_p} \Delta W_i$$

$$Q = \left\{ \frac{2\eta}{\pi * \tan^2 \alpha} \right\} * \frac{W}{H} \quad (\text{A-7})$$

Com W, a carga normal total aplicada sobre o sistema e H a dureza do material.

E definindo

$$K = \frac{2\eta}{\pi * \tan^2 \alpha}$$

Temos que a equação I-7 torna-se:

$$Q = K * \frac{W}{H} \quad (\text{A-8})$$

Onde em termos de unidades temos que

$$Q = \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{m}} \right]$$

$$H = \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$W = [\text{N}]$$

Agora com

$$k = \frac{K}{H}$$

E substituindo na equação I-8

$$Q = k * W \quad (\text{A-9})$$

Com

$$k = \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} * \text{m}} \right]$$

**ANEXO B- IMAGENS MEV DE AMOSTRAS ENSAIDAS COM A CARGA
NORMAL APLICADA DE 0,2 N.**

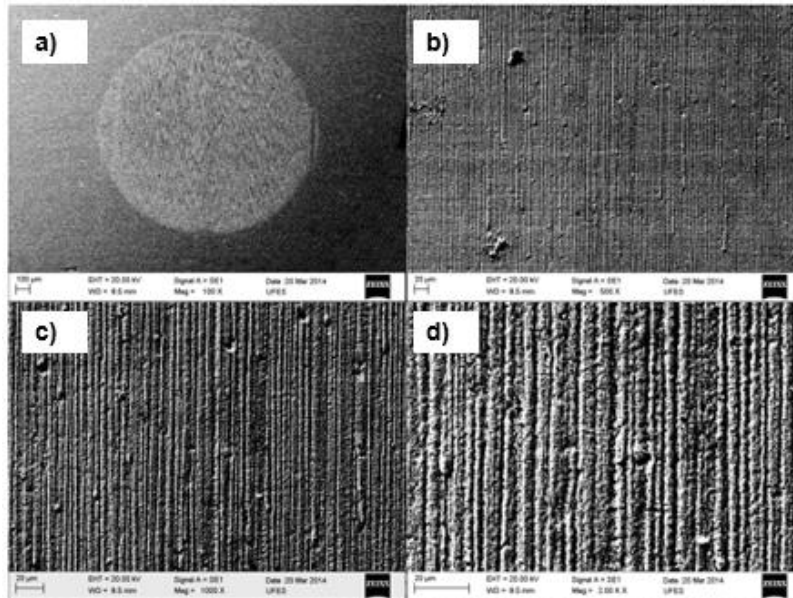


Figura B1. Análise MEV- Elétrons Secundários- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 1 (0G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

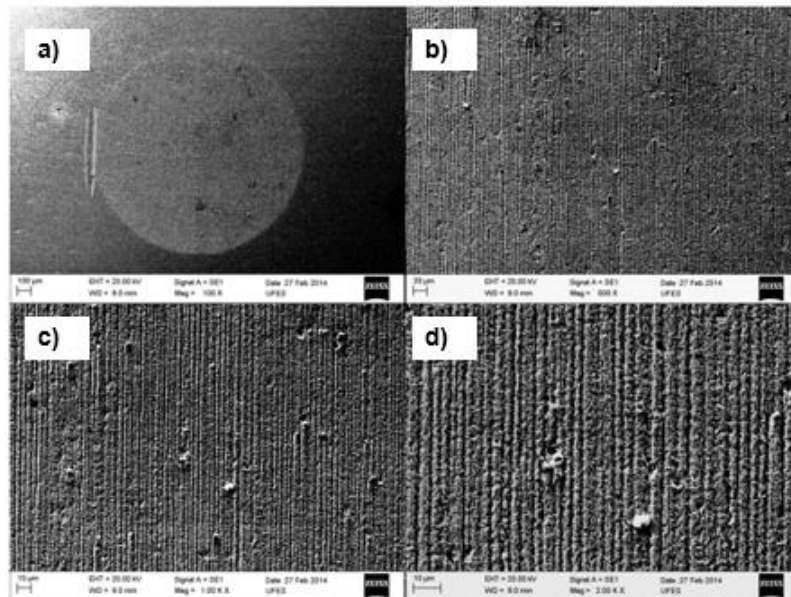


Figura B2. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 2 (10G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

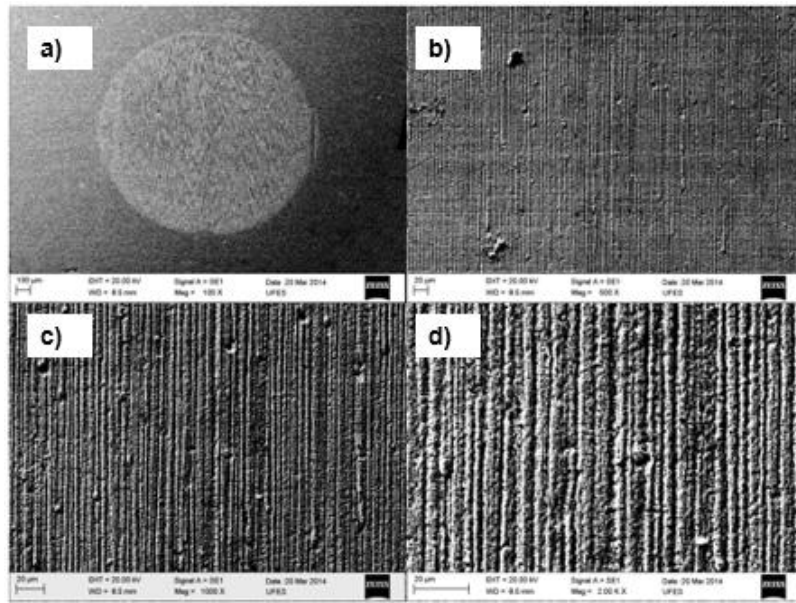


Figura B3. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 3 (20G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

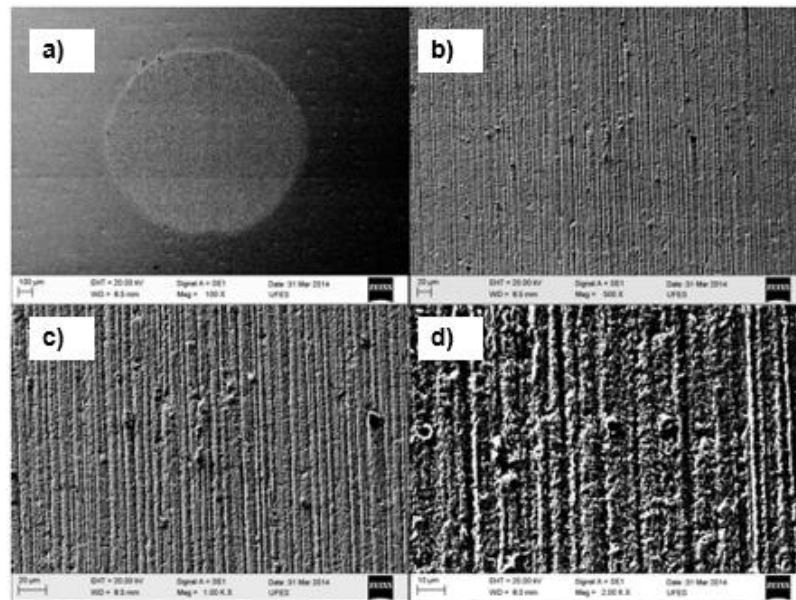


Figura B4. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 4 (30G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

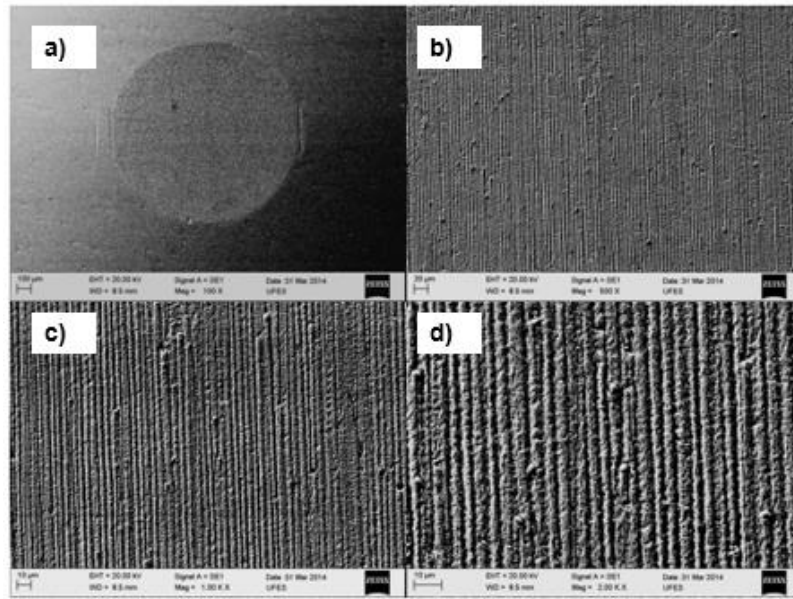


Figura B5. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 5 (40G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

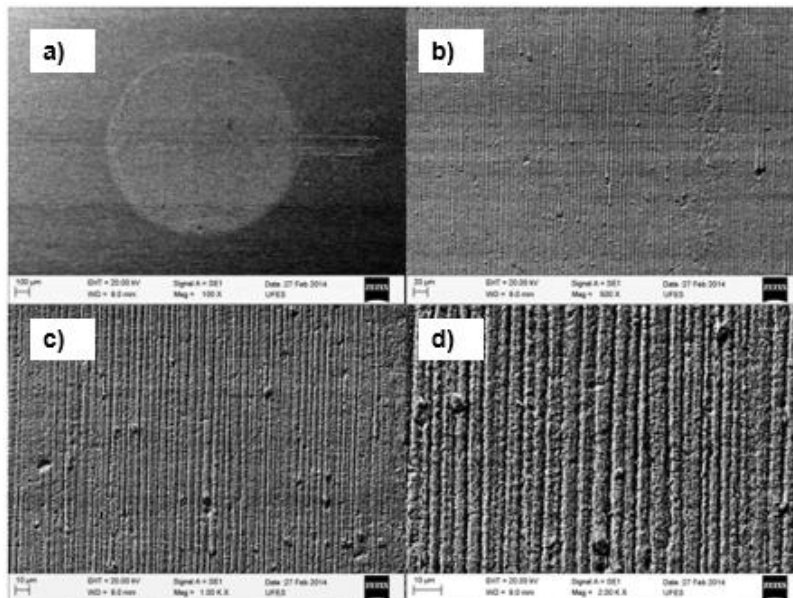


Figura B6. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 6 (50G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

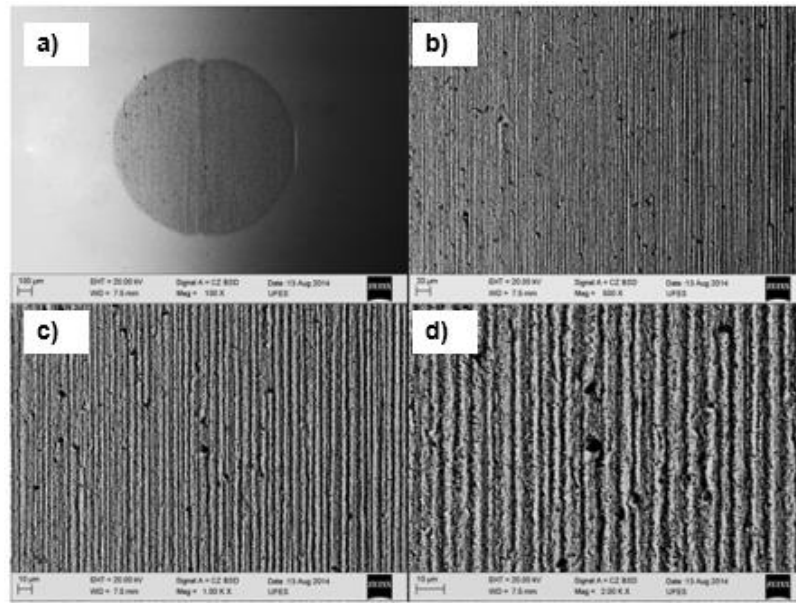


Figura B7. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio e realizado com a fração mássica 7 (70G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

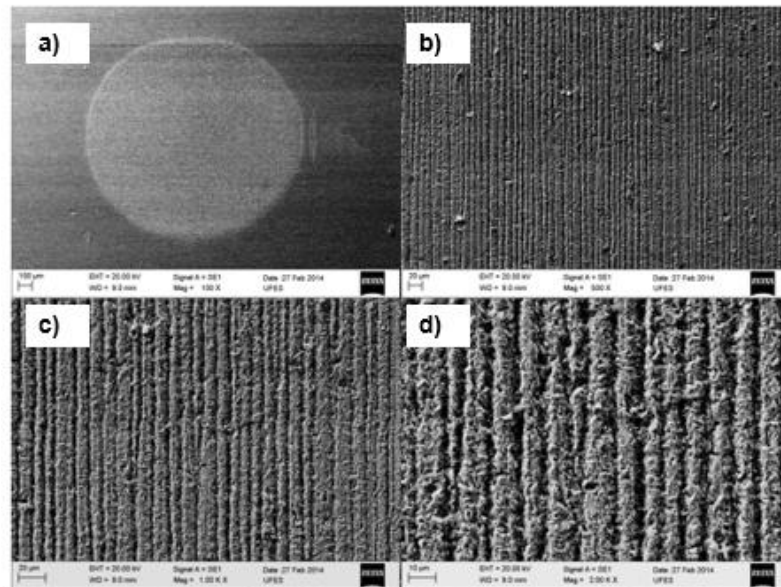


Figura B8. Análise MEV- Elétrons Secundários - Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 8 (80G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

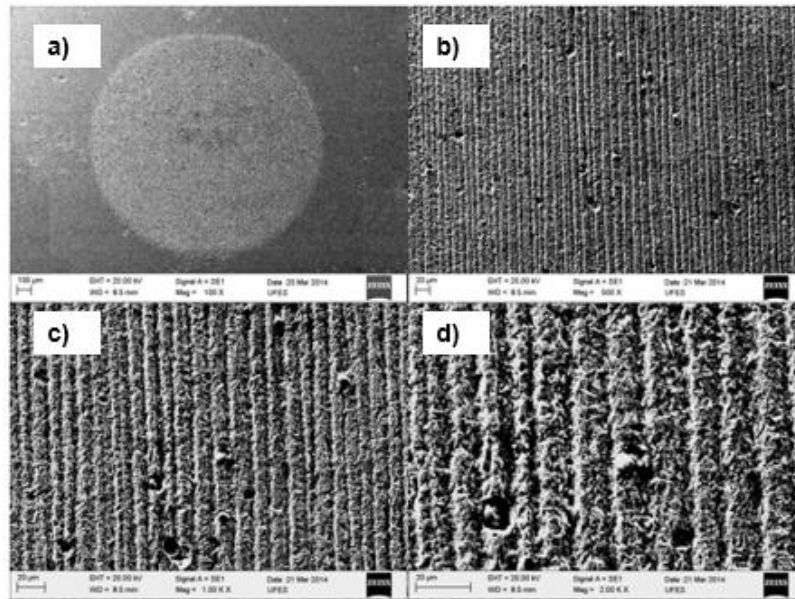


Figura B9. Análise MEV-Elétrons Secundários- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 9 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

ANEXO C- IMAGENS MEV DE AMOSTRAS ENSAIDAS COM A CARGA NORMAL APLICADA DE 0,4 N.

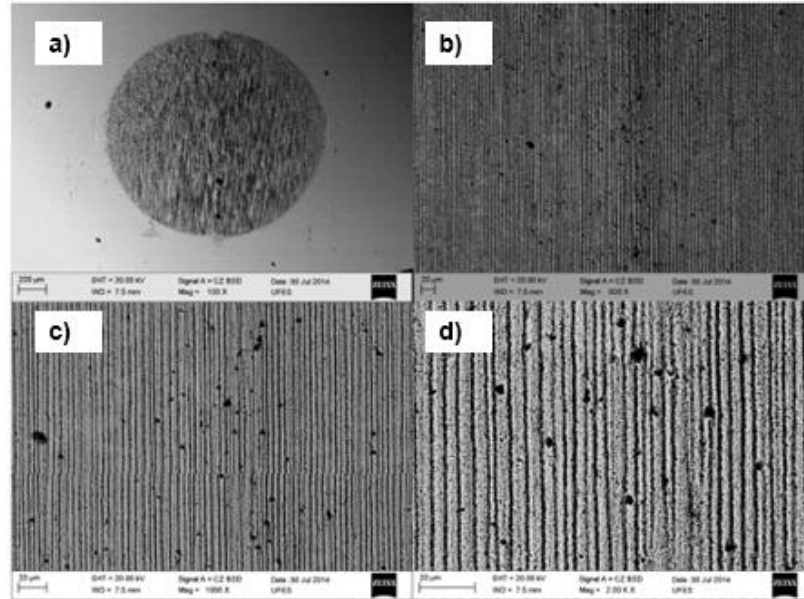


Figura C1. Análise MEV- Elétrons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 1 (0G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

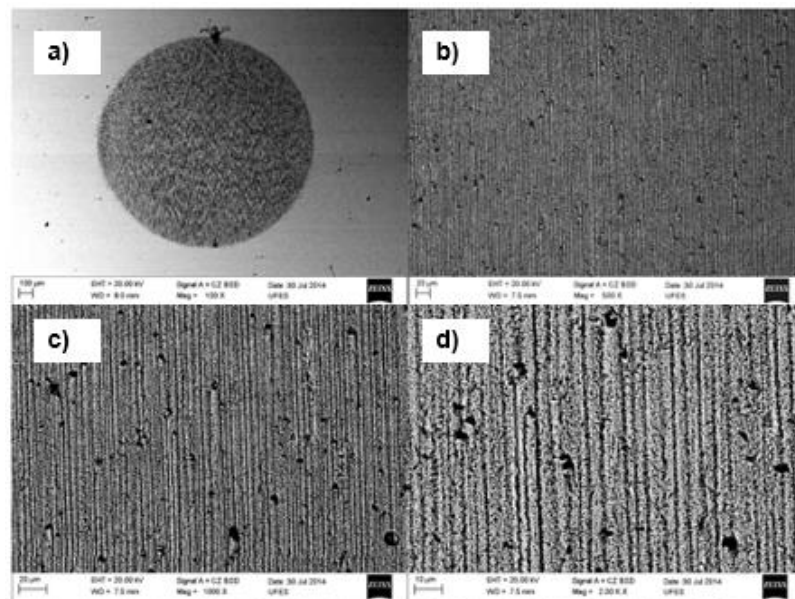


Figura C2. Análise MEV- Elétrons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 3 (20G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

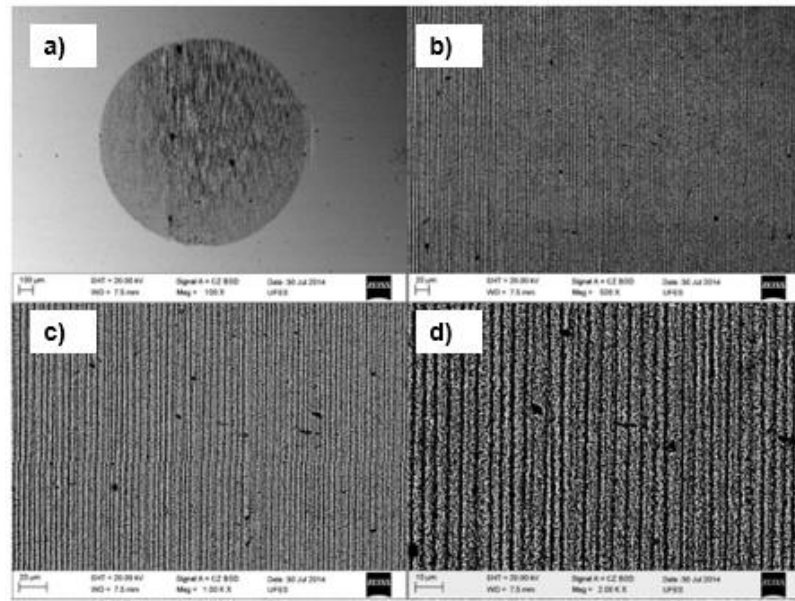


Figura C3. Análise MEV- Elétrons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 5 (40G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

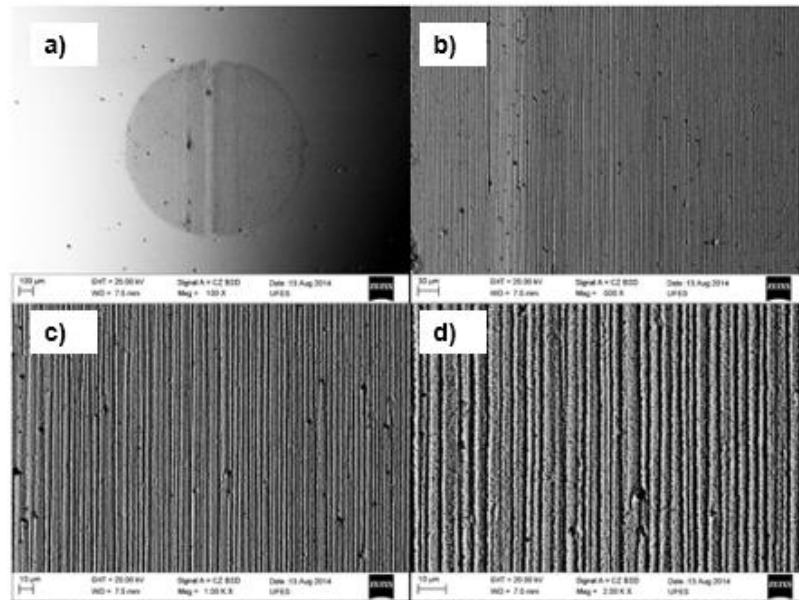


Figura C4. Análise MEV- Elétrons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 5 (50G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

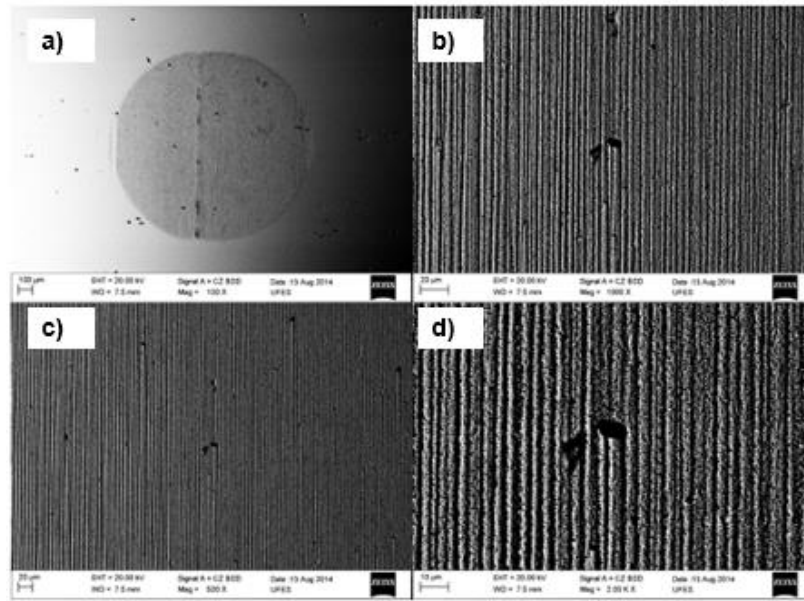


Figura C5. Análise MEV- Elétrons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 6 (70G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

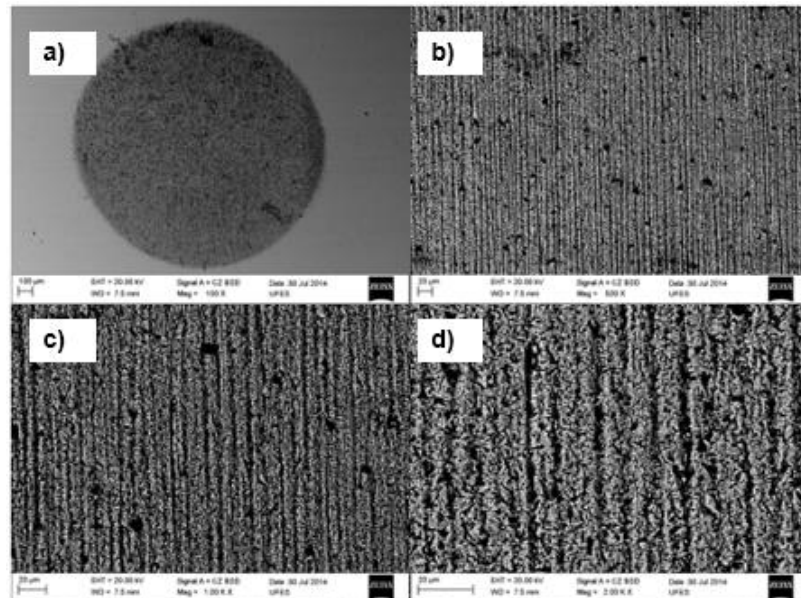


Figura C6. Análise MEV- Elétrons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 7 (80G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

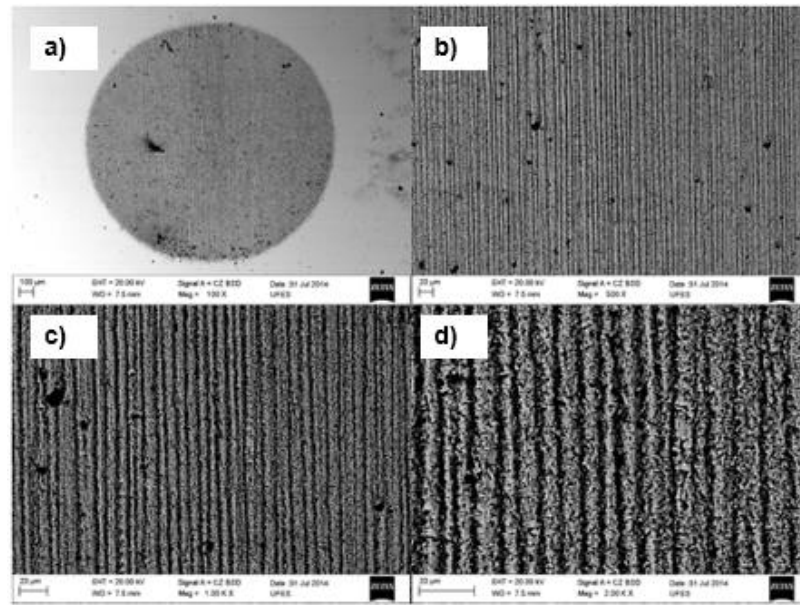


Figura C7. Análise MEV- Eléons Retroespalhados- Cratera de desgaste correspondente ao ensaio realizado com a fração mássica 9 (100G) com uma carga normal de 0,2 N a)100x b)500x c) 1000x d) 2000x

**ANEXO D- ANÁLISES DE SEVERIDADE DE CONTATO PARA AMOSTRAS
ENSAIDAS COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,2 N.**

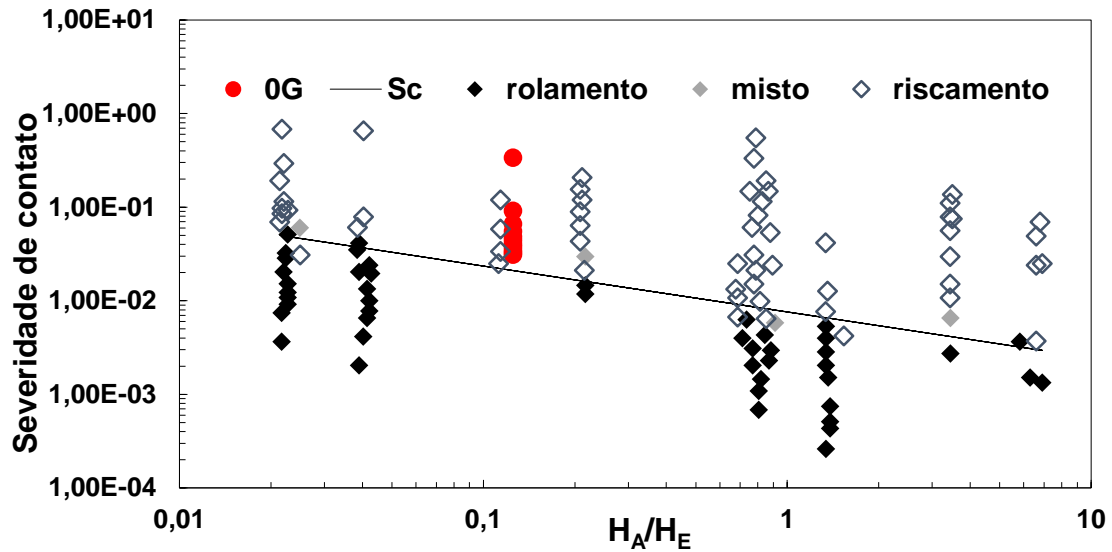


Figura D1. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 0G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

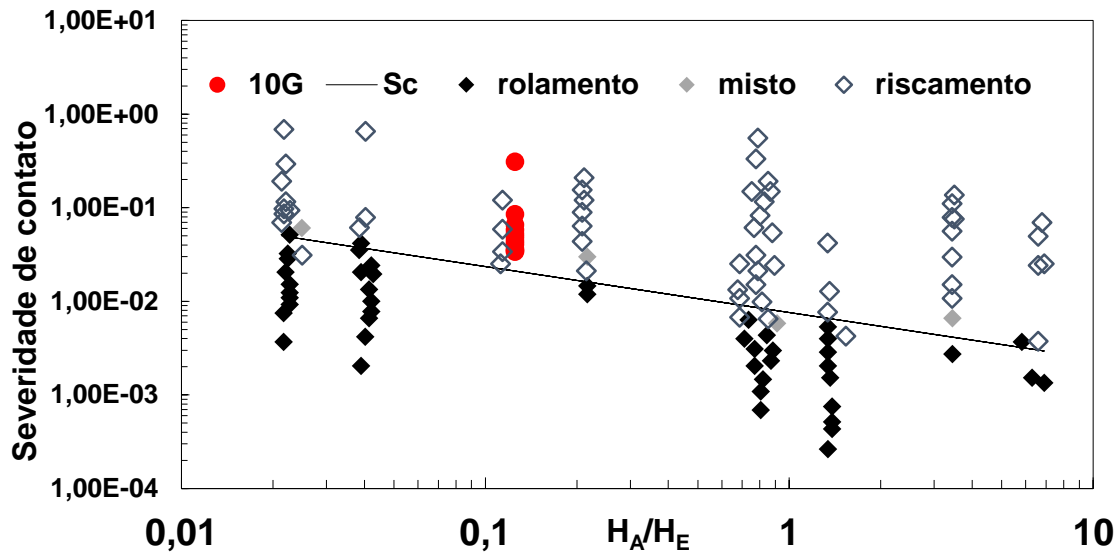


Figura D2. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 10G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

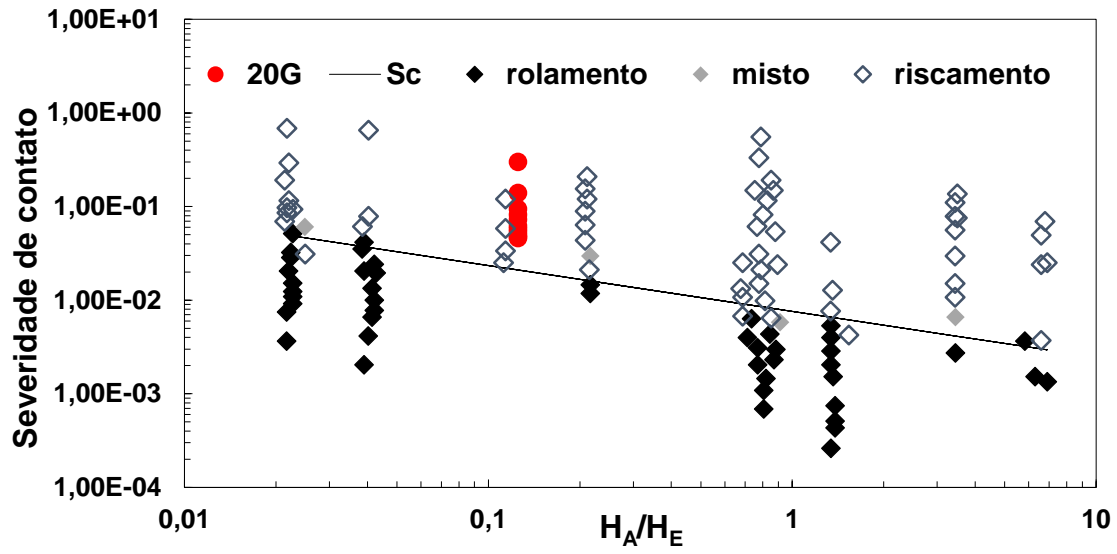


Figura D3. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 20G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

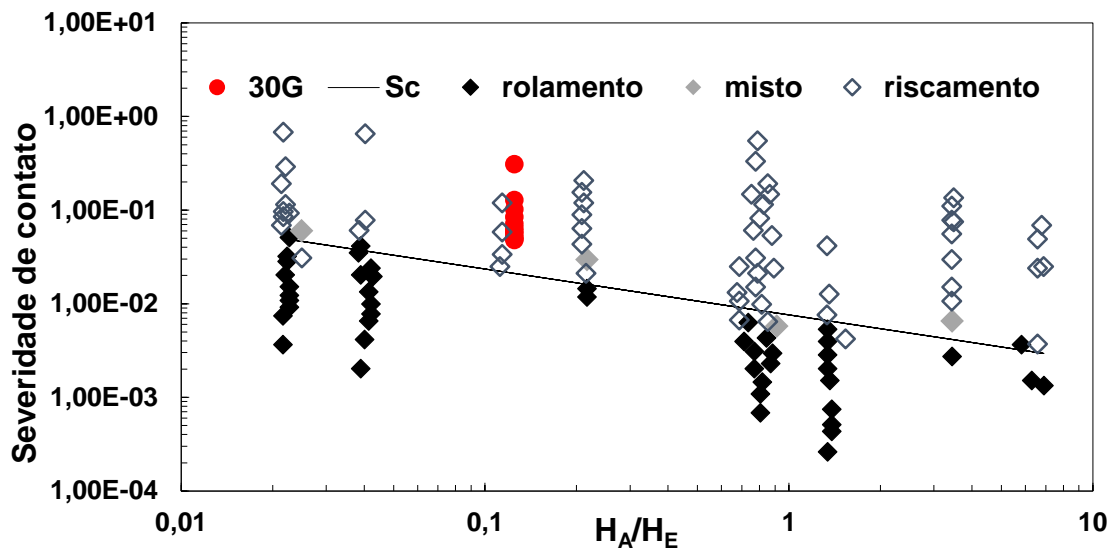


Figura D4. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 30G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

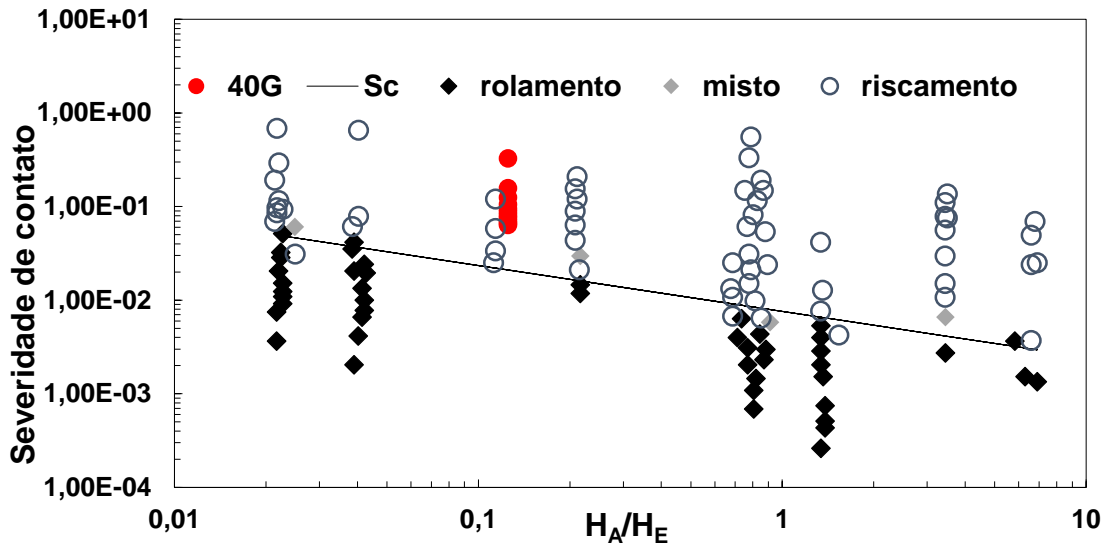


Figura D5. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 40G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

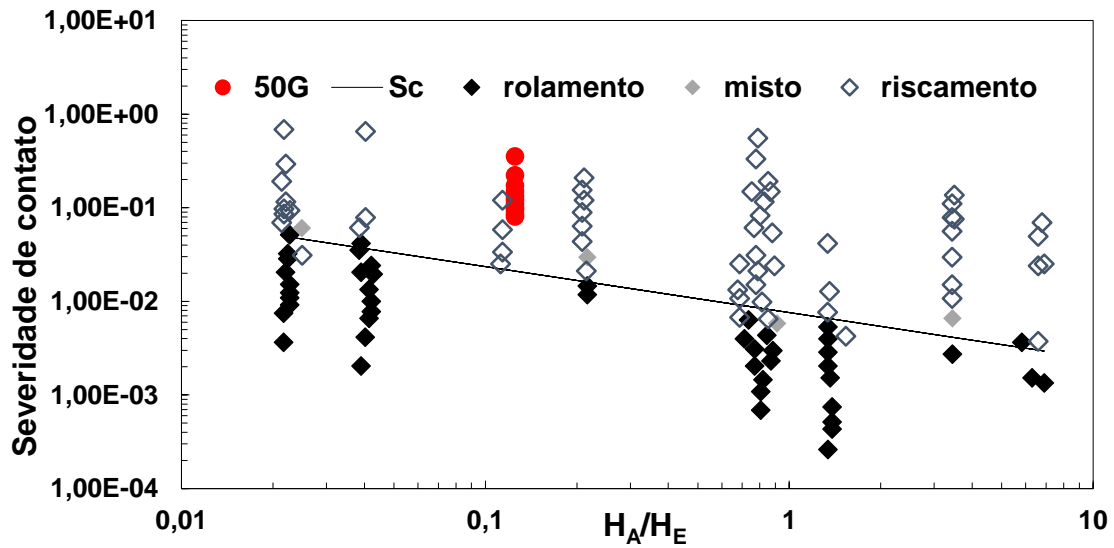


Figura D6. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 50G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

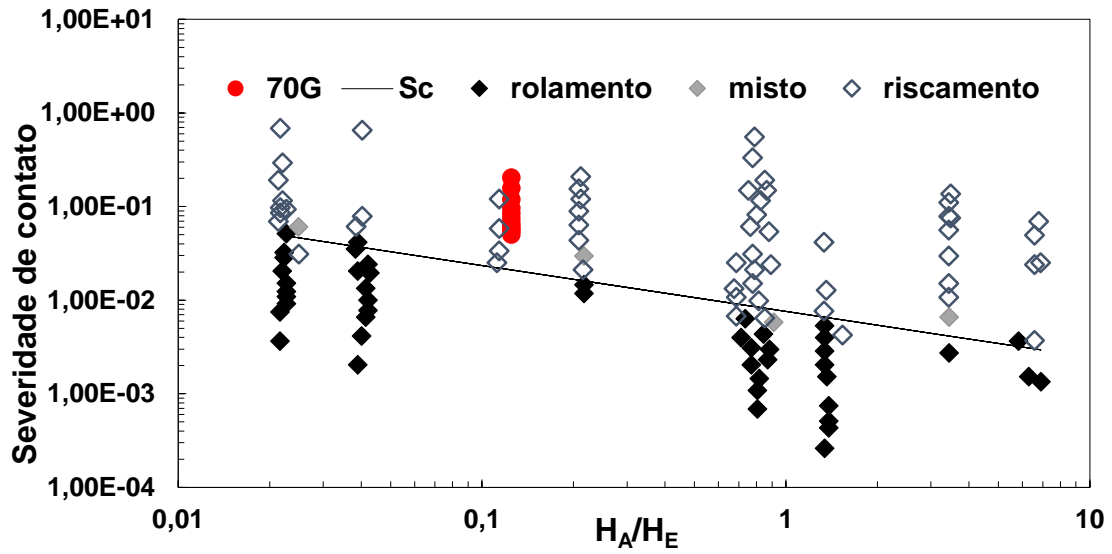


Figura D7. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 70G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

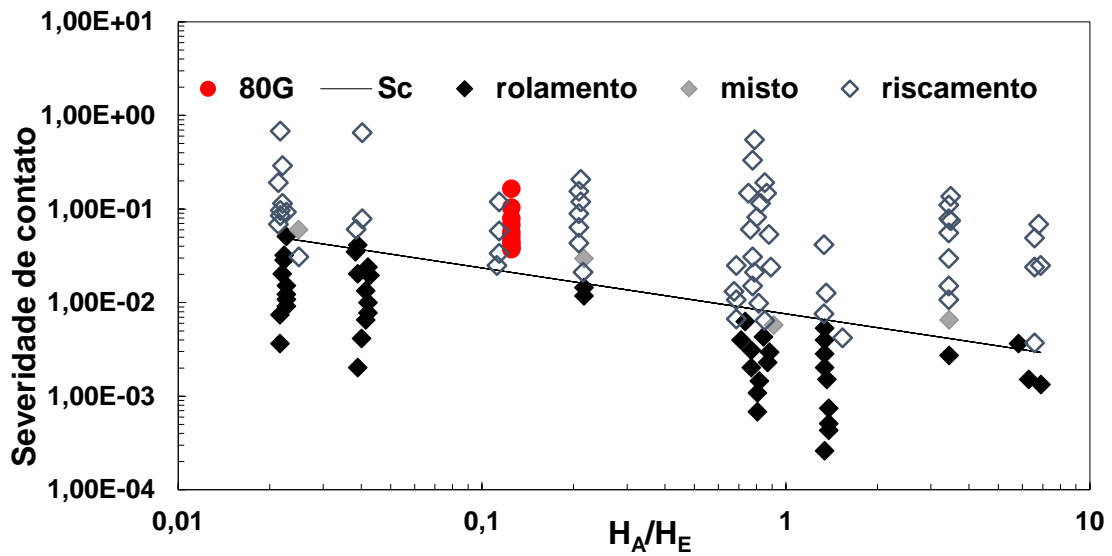


Figura D8. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 80G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

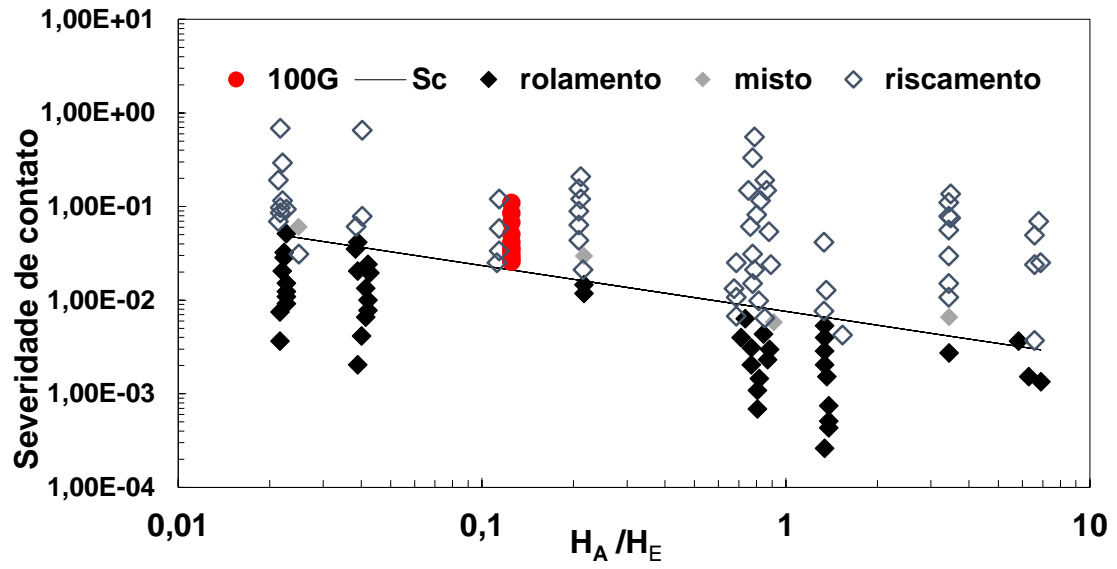


Figura D9. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 100G, e com carga normal de 0,2 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

**ANEXO E- ANÁLISES DE SEVERIDADE DE CONTATO PARA AMOSTRAS
ENSAIDAS COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,4 N.**

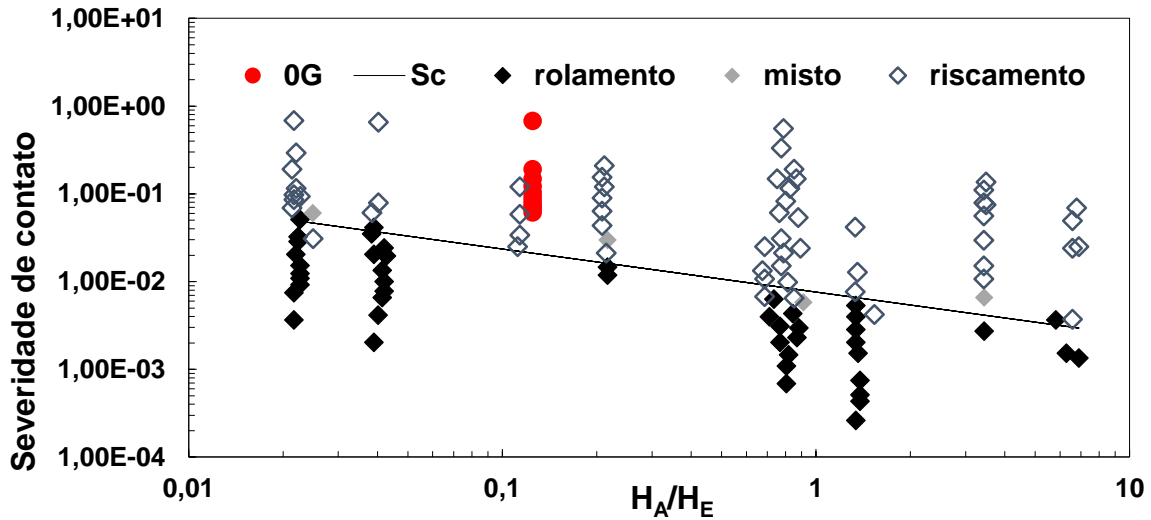


Figura E1. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 0G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

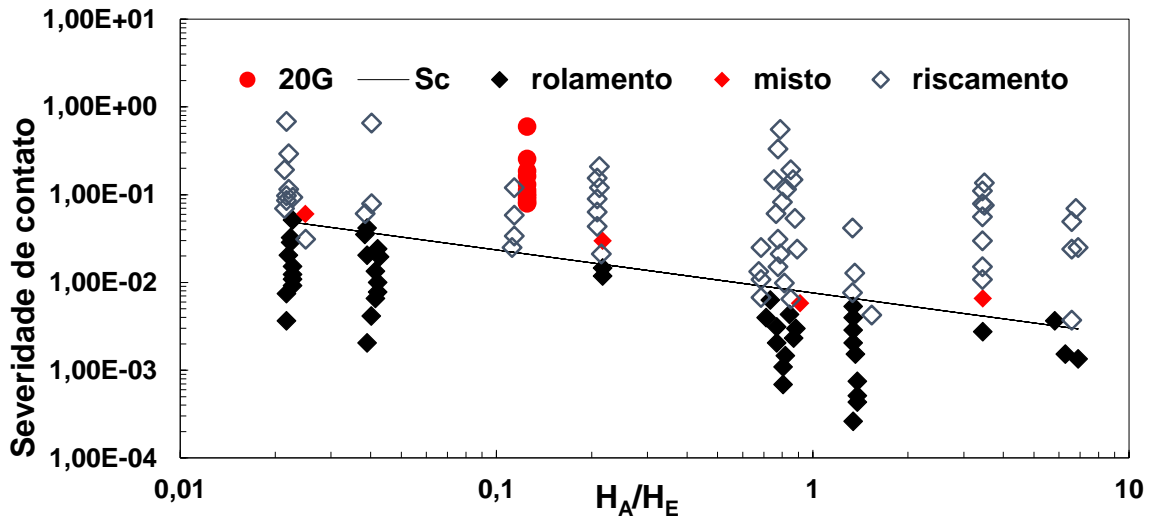


Figura E2. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 20G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

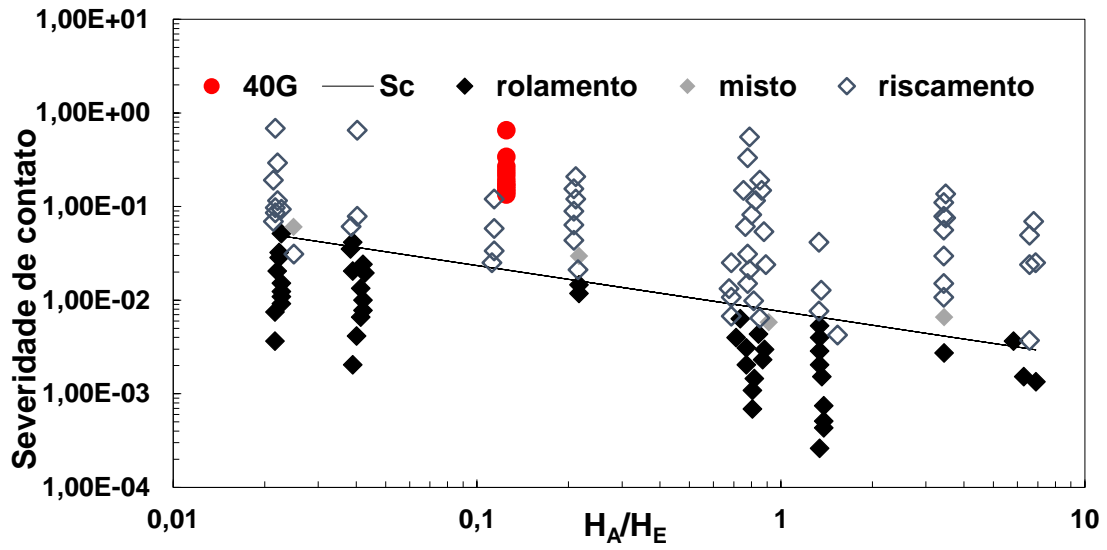


Figura E3. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 40G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

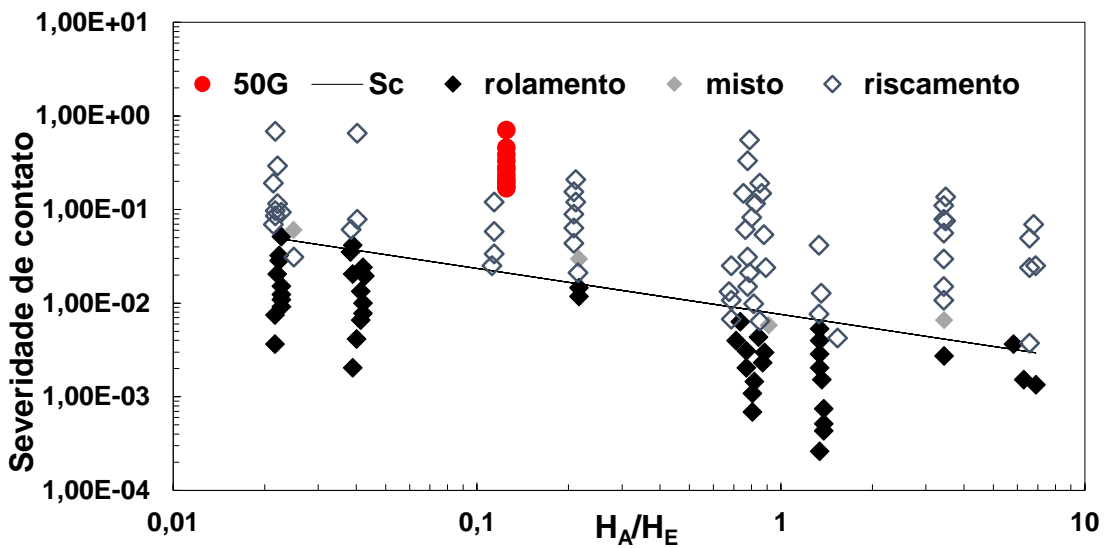


Figura E4. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 50G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

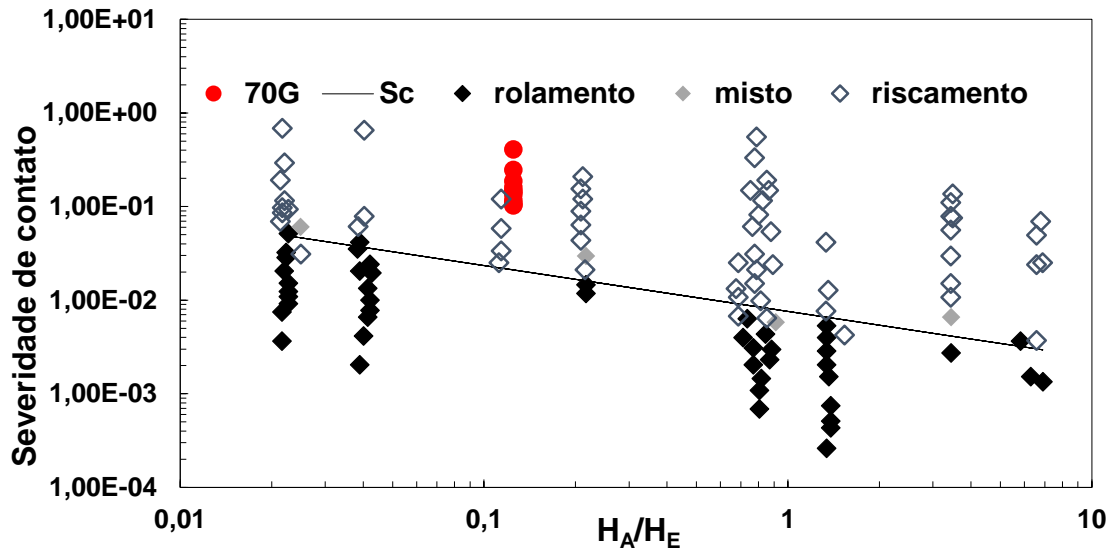


Figura E5. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 70G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

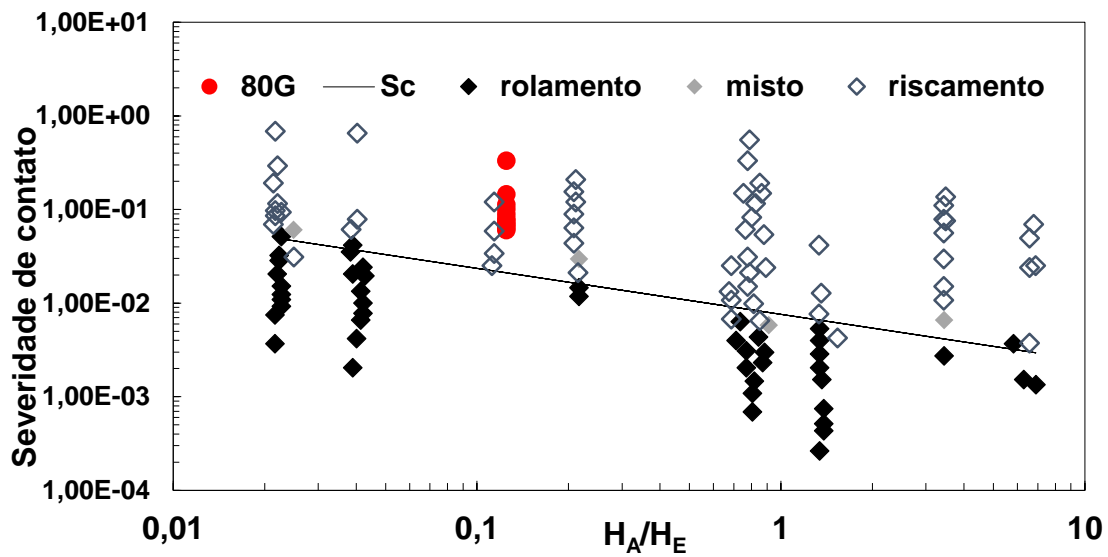


Figura E6. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 80G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

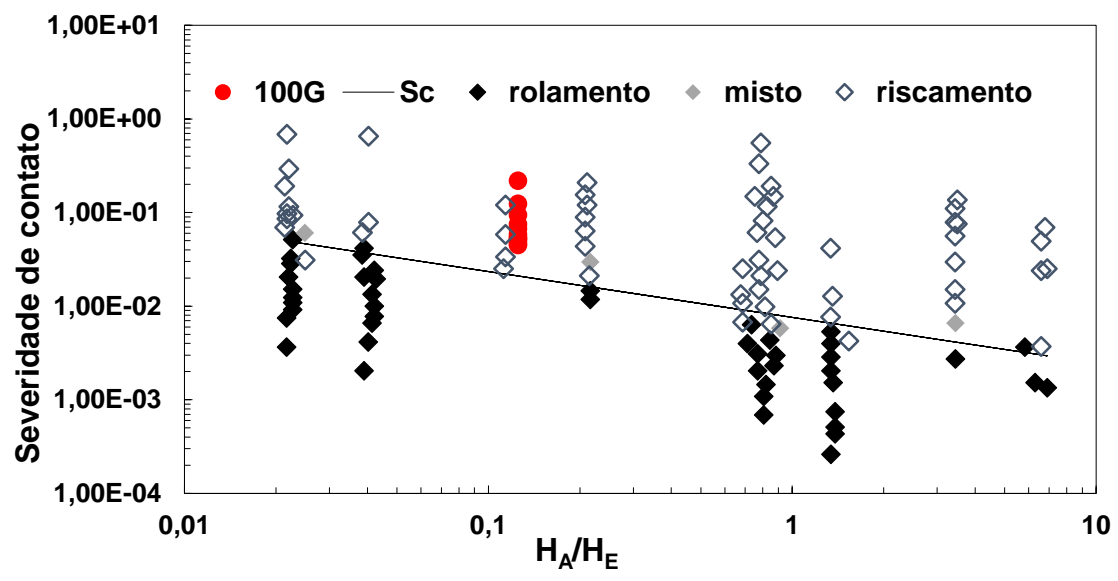


Figura E6. Análise da evolução da severidade de contato para a condição testada com a mistura 100G, e com carga normal de 0,4 N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003, 2005).

**ANEXO F- IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ESFÉRICO PARA CRATERAS DE
DESGASTE COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,2 N.**

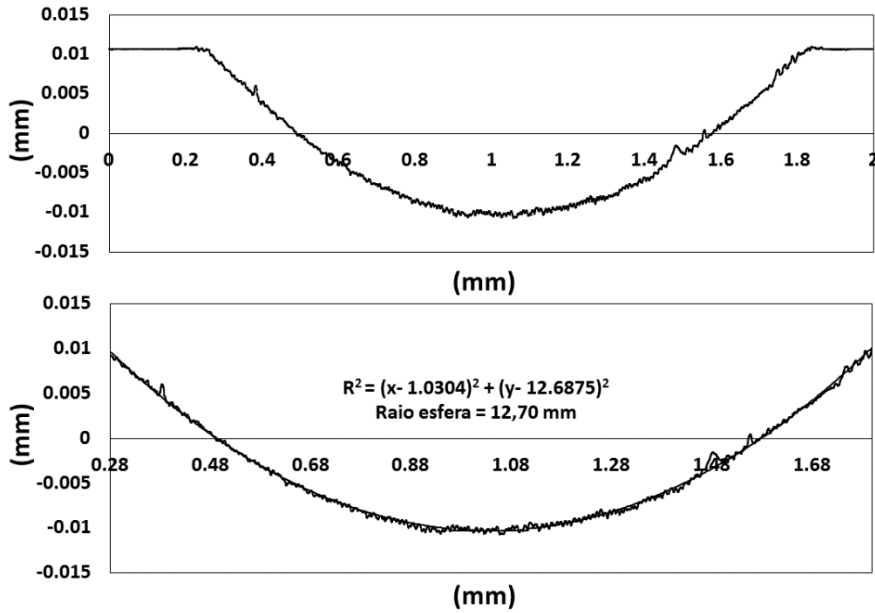


Figura F1. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,2 N.

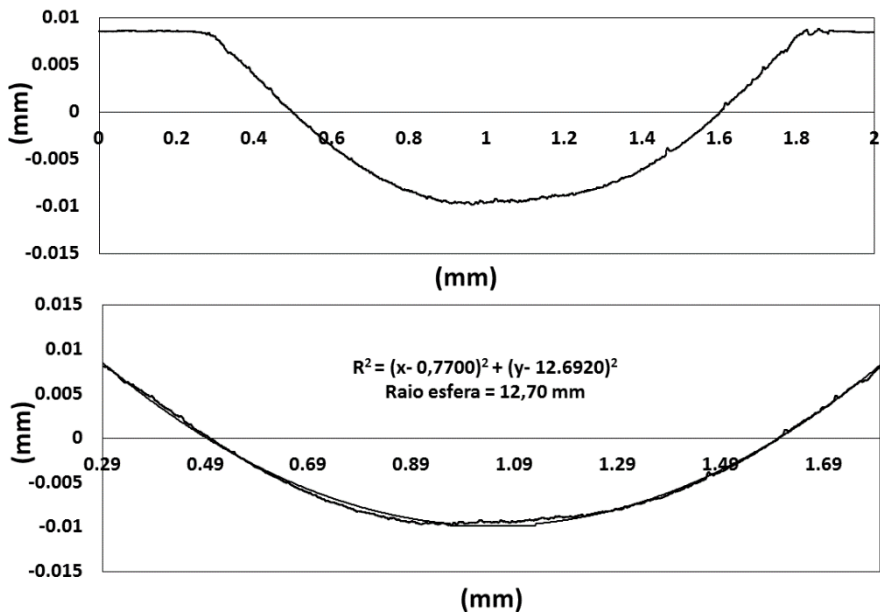


Figura F2. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 50G com carga normal de 0,2 N.

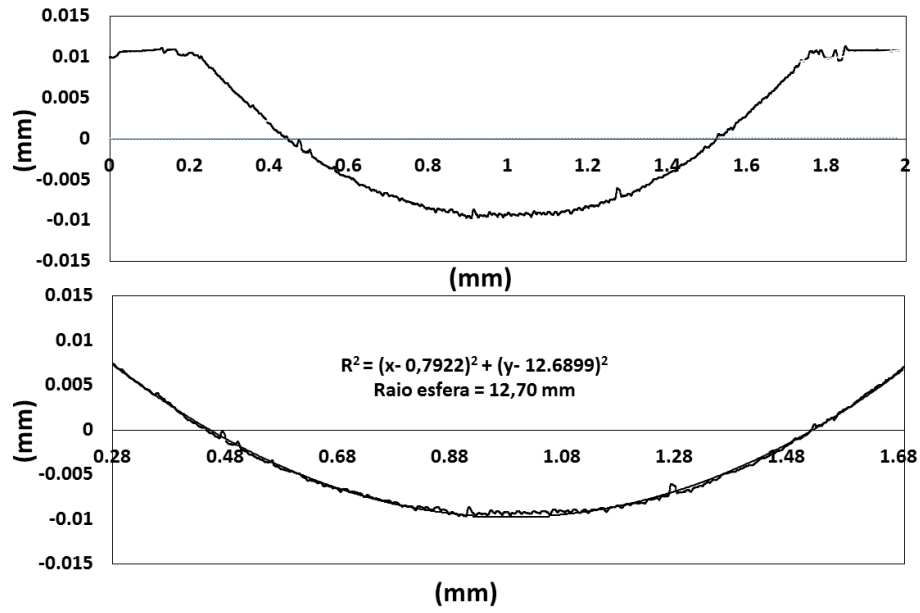


Figura F3. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 0G com carga normal de 0,2 N.

**ANEXO G- IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ESFÉRICO PARA CRATERAS DE
DESGASTE COM CARGA NORMAL APLICADA DE 0,4. N**

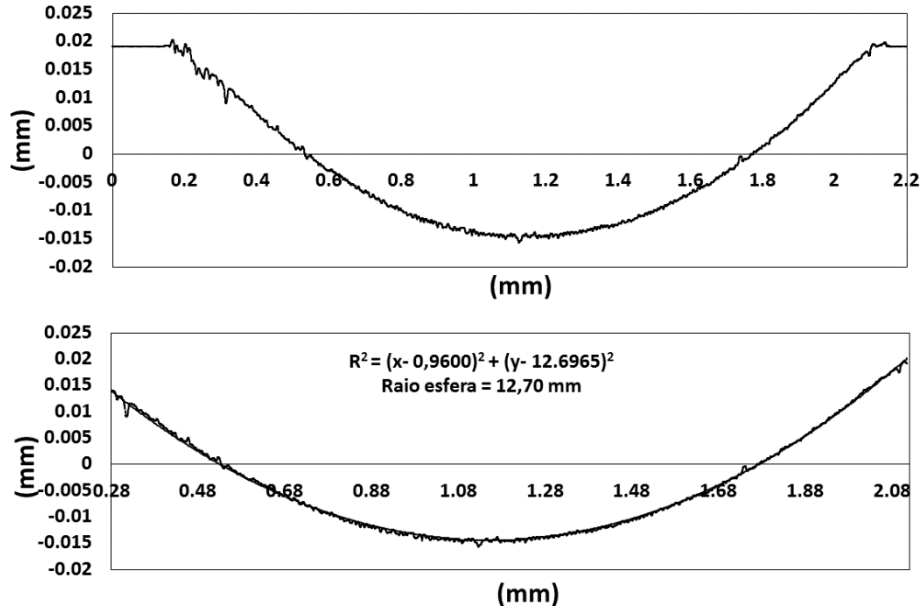


Figura G1. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 100G com carga normal de 0,4 N.

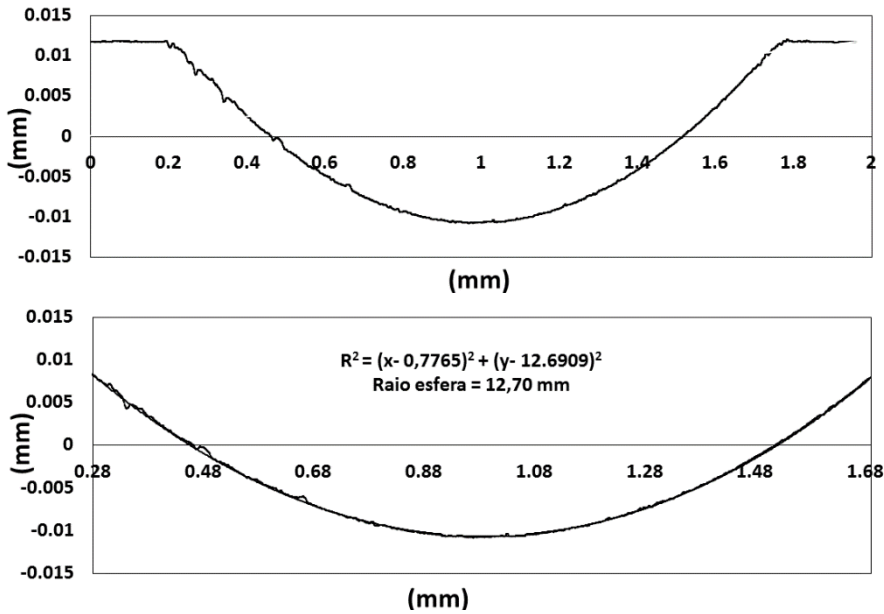


Figura G2. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 50G com carga normal de 0,4 N.

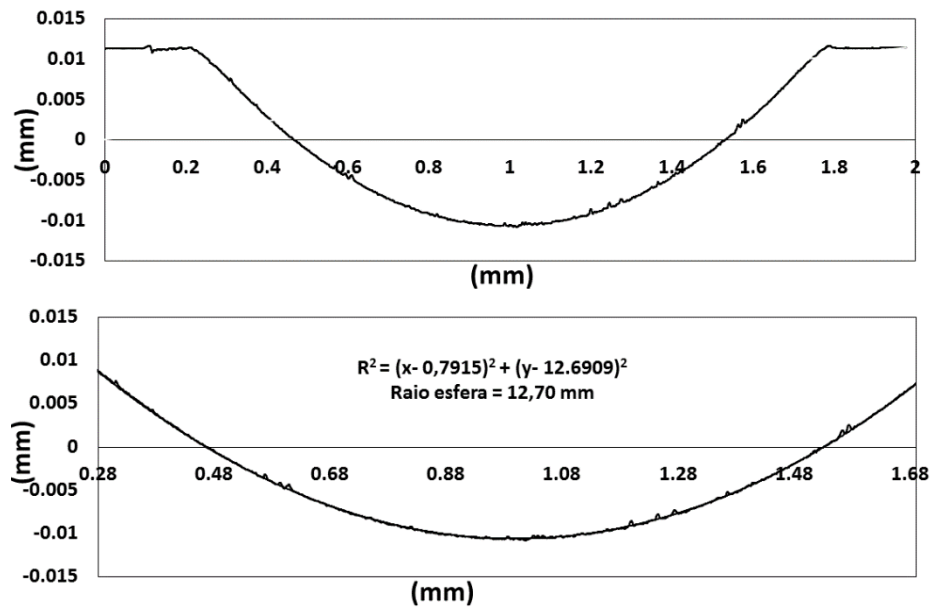


Figura G3. Perfil médio da cratera de desgaste esférica obtida para a condição de 0G com carga normal de 0,4 N.