

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

PÂMELLA JUREVES ESTEVES

**INFLUÊNCIA DA NATUREZA DO CONTRA CORPO, DA DISTRIBUIÇÃO DO
TAMANHO DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS E DA VELOCIDADE NO ENSAIO DE
MICROABRASÃO.**

**VITÓRIA
2018**

PÂMELLA JUREVES ESTEVES

INFLUÊNCIA DA NATUREZA DO CONTRA CORPO, DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS E DA VELOCIDADE NO ENSAIO DE MICROABRASÃO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Martins Souza.

VITÓRIA

2018

PÂMELLA JUREVES ESTEVES

INFLUÊNCIA DA NATUREZA DO CONTRA CORPO, DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS E DA VELOCIDADE NO ENSAIO DE MICROABRASÃO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovado em 06 de julho de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Roberto Martins Souza
Universidade de São Paulo
Coorientador

Prof. Dr. Antônio Cesar Bozzi
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador interno

Prof. Dr. Amilton Sinatora
Universidade de São Paulo
Examinador externo

Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello
Universidade Federal de Uberlândia
Examinador externo

À minha mãe, Hilda, mulher guerreira,
responsável por tudo que sou.

AGRADECIMENTOS

A Deus, “Porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; Glória, pois, a Ele eternamente” Romanos 11:36.

À minha família por todo o amor e suporte.

Ao professor Cherlio Scandian pelos desafios propostos, a amizade e os ensinamentos.

Ao professor Roberto Martins Souza pelos ensinamentos e serenidade ao transmitir o conhecimento. Por abrir, solícitamente, as portas de seu laboratório.

Ao professor Marcelo C. S. de Macêdo por todas as horas de discussão e conhecimento.

Ao técnico do laboratório TRICORRMAT, Carlos Alberto Rosa Neto, por toda ajuda e amizade.

À equipe do LFS – POLI-USP por me receberem e serem solícitos. Ao Raphael Oliveira e ao Rodnei Santos por me auxiliarem na utilização do MEV.

Aos meus amigos, feitos nesses anos de UFES e laboratório, por alegrarem os meus dias.

À minha amiga, Maysa Pacheco, por me fazer companhia no laboratório em muitos finais de semana.

À minha amiga, Manuelle Curbani, por todo o companheirismo e por estar comigo em todos os momentos.

À empresa Saint Gobain Brasil pelo fornecimento dos pós abrasivos utilizados neste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos, e à secretária do PPGEM, Andréia Guzi Eyng, pela disposição em auxiliar os alunos.

RESUMO

Foram realizados ensaios de microabrasão com intuito de observar a influência de dois parâmetros no coeficiente de desgaste: a distribuição do tamanho das partículas abrasivas empregando diferentes contra corpos e a velocidade de rotação da esfera. Para obter diferentes distribuições do tamanho foram misturados dois pós abrasivos com tamanho médio de partícula de $5,97 \mu\text{m}$ (0 G) e $14,39 \mu\text{m}$ (100 G). Os ensaios foram realizados utilizando amostras de aço AISI 1020 e contra corpos esféricos de aço martensítico AISI 52100, aço inoxidável austenítico AISI 304, borracha poliuretano e zircônia-alumina. A mudança na natureza da esfera resultou em diferentes comportamentos do coeficiente de desgaste com a variação da distribuição granulométrica. Ao utilizar esfera de aço martensítico AISI 52100, no geral, os menores coeficientes de desgaste foram obtidos em 50% em massa do pó com maior diâmetro médio de partículas, resultado que já havia sido encontrado por Gomez *et al.* (2015). Aplicando o contra corpo de aço inoxidável austenítico AISI 304, os menores coeficientes de desgaste foram obtidos em 20% em massa do pó com maior diâmetro médio de partículas. Empregando esfera de borracha poliuretano, altamente elástica, não houve variações dos coeficientes de desgaste para as diferentes distribuições granulométricas. Já com esferas de zircônia-alumina, foi observado uma relação linear entre o coeficiente de desgaste e o aumento da fração mássica do pó com maior tamanho de partícula abrasiva. Para o estudo da velocidade de rotação do contra corpo, foram realizados ensaios com 40, 80 e 150 rpm, empregando amostras de aço AISI 1020 e esferas de aço martensítico AISI 52100. Além disso, utilizou-se abrasivo de SiC, de $2,11 \mu\text{m}$ (A) e $6,57 \mu\text{m}$ (B), com concentração de solução abrasivas fixa ($0,1 \text{ g/cm}^3$) ou com uma concentração que diminuiu em função da velocidade de rotação, para manter constante a quantidade de abrasivo durante um único teste. A tendência geral das curvas foi de diminuição do coeficiente de desgaste com o aumento da velocidade. Por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi possível observar que os micromecanismos de desgaste foram predominantemente riscamento nas superfícies de desgaste com microrolamento entre os sulcos, com exceção da borracha, que produziu calota apenas com riscamento. Em ensaios variando a velocidade, os micromecanismos foram riscamento com microrolamento.

Palavras-chave: Microabrasão; Natureza do contra corpo; Distribuição do tamanho da partícula abrasiva; Velocidade de rotação; Micromecanismos.

ABSTRACT

Micro-abrasion tests were carried out to analyze the influence of two parameters on the wear coefficient: the abrasive particle size distribution using different counter bodies and the ball rotation speed. To obtain different size distributions, two abrasive powders having an average particle size of 5.97 μm (0 G) and 14.39 μm (100 G) were mixed. The tests were conducted using AISI 1020 steel samples and balls made of AISI 52100 martensitic steel, AISI 304 austenitic stainless steel, polyurethane rubber and zirconia-alumina. The change in ball material resulted in different behaviors of the wear coefficient with the variation of particle size. When using the AISI 52100 martensitic steel ball, the lowest wear coefficients were mainly obtained with the mixture with 50%, in mass, of the powder with the largest average particle diameter, a result that has already been reported by Gomez et al. (2015). When using the AISI 304 austenitic stainless steel ball, the lowest wear coefficients were obtained with the mixture with 20%, in mass, of the powder with the largest average particle diameter. The use of a highly elastic polyurethane rubber ball resulted in no changes in the wear coefficient with the different grain sizes. On the other hand, with zirconia-alumina balls, a linear relationship between the wear coefficient and the increase of the mass fraction of the powder with the largest abrasive particle size was observed. For the study of ball rotation speed, tests were conducted with 40, 80 and 150 rpm, using AISI 1020 steel samples and AISI 52100 martensitic steel balls. In addition, the abrasive slurry was prepared with silicon carbide (SiC) particles with average sizes of 2.11 μm (A) or 6.57 μm (B), with a fixed abrasive concentration (0.1 g/cm³) or with a concentration that decreased as a function of the rotation speed, to maintain constant the amount of abrasive during one single test. A general trend of decrease in wear coefficient with the increase in speed was observed. Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses allowed observing that tests with different particle size distributions resulted, mainly, in grooving abrasion with microlling, except for rubber, which resulted only in grooving abrasion. In the tests varying the rotation speed, the micro mechanism was grooving abrasion with microlling.

Keywords: Micro-abrasion; Abrasive particle size distribution; Different ball material; Rotation speed; Modes wear.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Cratera esférica de desgaste em amostra de aço revestido TiN. Tornando visível o desgaste no substrato e no revestimento (40x) (THOMPSON, 1979)..... | 25 |
| Figura 2 - Vista esquemática do <i>dimple grinder</i> (KASSAMAN <i>et al.</i> , 1991) | 25 |
| Figura 3 - Princípio ensaio de microabrasão para a) configuração esfera livre e b) configuração esfera fixa. Figura modificada do GANT e GEE, 2011..... | 26 |
| Figura 4 - a) diâmetro (MARQUES <i>et al.</i> , 2011) e b) profundidade da calota de desgaste (COZZA, 2011). | 28 |
| Figura 5 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos e b) desgaste abrasivo a três corpos (ZUM GAHR, 1987)..... | 29 |
| Figura 6 - Imagem de MEV para corpo de prova de aço ferramenta com desgaste abrasivo por: a) riscamento - para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,0009 (0,003 g/cm ³) do abrasivo (diamante 3 µm) na lama abrasiva e b) rolamento - para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,237 (1,0 g/cm ³) do abrasivo (SiC) na lama abrasiva (TREZONA <i>et. al.</i> , 1999). | 30 |
| Figura 7 - Única partícula de desgaste descrita pelo ângulo β e diâmetro D_p (WILLIAMS e HYNICICA, 1992)..... | 31 |
| Figura 8 - a) Modelo da zona de contato entre a esfera, amostra e abrasivo; b) indentação por uma única partícula abrasiva (ADACHI e HUTCHINGS, 2003)..... | 33 |
| Figura 9 - Mapa dos modos de desgaste como uma função da severidade de contato e da razão de dureza entre esfera e amostra (ADACHI e HUTCHINGS, 2003)..... | 35 |
| Figura 10 - Deslocamento esfera-amostra durante ensaios de desgaste microabrasivo em alumínio usando a) esfera condicionada (superfície rugosa) e b) esfera nova (superfície lisa) (ALLSOPP <i>et al.</i> , 1998)..... | 36 |
| Figura 11 - Imagens de MEV de marcas de desgaste em aço após 10 segundos de ensaio na presença de solução abrasiva de sílica com a) esfera nova (superfície lisa) e b) esfera condicionada (superfície rugosa) (STACHOWIAK e STACHOWIAK, 2006). | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 12 - Ilustração esquemática do mecanismo de arrastamento de partícula angulares: a) partícula indenta amostra e permanece estacionária e b) partícula é arrastada pela rugosidade na superfície da esfera (ALLSOPP <i>et al.</i> , 1998). | 38 |
| Figura 13 - Influência do material da esfera na relação entre volume e o produto da carga normal pela distância deslizada. Resultados obtidos para esferas de PP, bronze e aço condicionada, com amostras de PMMA e alumínio. As calotas de desgaste produzidas em alumínio com esfera de bronze são todas não esféricas (TREZONA e HUTCHINGS, 1999). | 39 |
| Figura 14 - Mapa dos micromecanismos de desgaste em função da carga normal aplicada e da fração volumétrica de abrasivos em amostras de aço ferramenta a) SiC, b) diamante e c) alumina (TREZONA <i>et al.</i> , 1999). | 40 |
| Figura 15 - Variação do volume desgastado após 30 m deslizados em função da fração volumétrica de abrasivos. Amostra de aço ferramenta e abrasivo de F1200 SiC (TREZONA <i>et al.</i> , 1999). | 41 |
| Figura 16 - Evolução da severidade de ensaio em função do tempo de ensaio. Os ensaios foram conduzidos em a) metal duro ISO P20 e b) aço ferramenta M2, nas configurações esfera livre e fixa (COZZA <i>et al.</i> , 2007)). | 42 |
| Figura 17 - Análise da evolução da severidade de contato, mostrando a diminuição da severidade durante o ensaio, tendendo ao rolamento, segundo mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003) (GOMEZ <i>et al.</i> , 2015). | 42 |
| Figura 18 - Imagem de MEV das partículas abrasivas de SiO ₂ com tamanho médio de 50 µm (IMBENI <i>et al.</i> , 2003). | 43 |
| Figura 19 - Distribuição de tamanho das partículas dos diferentes pós de SiC (0 G e 100 G) (GOMEZ <i>et al.</i> , 2015). | 44 |
| Figura 20 - Comportamento do coeficiente de desgaste em função da fração mássica do abrasivo maior (100 G) na lama abrasiva (GOMEZ <i>et al.</i> , 2015). | 45 |
| Figura 21 - Comportamento do volume desgastado em função da fração mássica das partículas efetivas no contato (GOMEZ <i>et al.</i> , 2015). | 46 |
| Figura 22 - Imagens de 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) 100G (GOMEZ <i>et al.</i> , 2015). | 47 |
| Figura 23 - Coeficiente de desgaste para vidro determinado com uma suspensão abrasiva de carbeto de silício em glicerol variando a velocidade de deslizamento (RUTHERFORD e HUTCHINGS, 1996)..... | 48 |
| Figura 24 - Volume de desgaste em função da variação da rotação da esfera de ensaio. Revestimento de DLC e partículas de diamante (BETHKE e SCHIFFMANN <i>apud</i> GEE <i>et al.</i> , 2003)..... | 49 |
| Figura 25 - Volume desgastado em função da variação da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio. Corpo de prova de aço-ferramenta e partículas abrasivas de carbeto de silício (ALLSOPP <i>apud</i> GEE <i>et al.</i> , 2003). | 49 |
| Figura 26 - Comportamento do coeficiente de desgaste em função da variação da velocidade periférica da esfera de ensaio (BELLO e WOOD, 2003)..... | 50 |
| Figura 27 - Incrustação de partículas abrasivas para diferentes valores de velocidade a) 0,12 m/s b) 0,13 m/s e c) 0,143 m/s. N = 6N e S = 100 m (BELLO e WOOD, 2003). | 51 |
| Figura 28 - MEV e perfilometria ótica na calota de alumínio (TREZONA e HUTCHINGS, 1999)..... | 52 |
| Figura 29 - Diagrama esquemático mostrando o arrastamento da partícula e vários diâmetros no ensaio de microabrasão. Diâmetro médio da partícula assumido como 4,25 µm (TREZONA e HUTCHINGS, 1999)..... | 53 |
| Figura 30 - a) Atuação de ridge em uma cratera de desgaste, b) seção transversal da amostra com ridge, c) desgaste abrasivo por rolamento ao redor do ridge e d) saída da cratera de desgaste (SHIPWAY, 1999)..... | 54 |
| Figura 31 - Volume desgastado em função do produto da carga normal (0,25 N) pela distância deslizada para amostras de PMMA, alumínio, aço ferramenta e alumina; os volumes foram obtidos utilizando esferas de aço com superfícies lisas e superfícies condicionadas. Os pontos onde obteve-se <i>ridge</i> estão marcados com 'R' (TREZONA e HUTCHINGS, 1999)..... | 55 |
| Figura 32 - Superfície em 3D e corte da seção transversal da cratera de desgaste com formação de <i>pile-up</i> (SCHIFFMANN <i>et al.</i> , 2005). | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 33 – a) gral e pistilo de porcelana e b) misturas pela técnica de diluição geométrica (FERREIRA e BRANDÃO, 2008)..... | 58 |
| Figura 34 - Distribuição granulométrica das misturas abrasivas. | 64 |
| Figura 35 – Distribuição do pó a) pequeno (A) e b) grande (B)..... | 65 |
| Figura 36 – Imagem de MEV dos abrasivos utilizados nos ensaios de variação da distribuição granulométrica, a) Pequeno (P) e b) Grande (G). | 66 |
| Figura 37 - Imagem de MEV dos abrasivos utilizados nos ensaios de variação velocidade do contra corpo, a) Pequeno (A) e b) Grande (B). | 66 |
| Figura 38 – Coeficientes de desgaste em função da fração mássica com maior tamanho (G), para carga de 0,2 N..... | 68 |
| Figura 39 - Coeficientes de desgaste em função da fração mássica com maior tamanho (G), para carga de 0,4 N..... | 68 |
| Figura 40 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,2 N..... | 71 |
| Figura 41 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,4 N..... | 72 |
| Figura 42 - Borda difusa gerada pelas partículas grandes, imagem óptica estereoscópica. a) 0G – não apresenta borda difusa, b) 50G e c)100G – apresentam borda difusa..... | 73 |
| Figura 43 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304, 0,2 N..... | 75 |
| Figura 44 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304, 0,4N..... | 76 |
| Figura 45 - Mapa composicional (EDS) da trilha de desgaste na superfície da esfera de aço inox AISI 304, ressaltando, em verde, a presença de silício (SiC) na superfície. | 77 |
| Figura 46 – Região de abrasivos atuantes no contato inicial no ensaio com a esfera de zircônia – alumina. | 78 |
| Figura 47 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera zircônia – alumina, 0,2N. | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 48 – Formação de <i>ridge</i> na condição 0G, carga 0,2N. a) imagem de MEV, elétrons secundários, 100x e b) imagem obtida analisador 3D de superfície..... | 79 |
| Figura 49 – Mapa composicional (EDS) das calotas de desgaste (aço AISI 1020) produzidas com esfera de zircônia – alumina nas condições de 0G para as cargas de a) 0,2 N e b) 0,4 N, onde veem-se abrasivos impregnados (silício – regiões amarelas) nas superfícies desgastadas. | 80 |
| Figura 50 – Imagens realizadas através do analisador 3D de superfícies mostrando o material acumulado na borda da cratera. a) vista superior da cratera de desgaste, b) vista 3D e c) perfil transversal de desgaste..... | 81 |
| Figura 51 – Imagens de MEV da superfície da esfera de borracha após ensaios, com aumentos de a) 30x, b) 500x, c) 500x e d) 1000x. | 82 |
| Figura 52 – Presença de abrasivos impregnados nos riscos da superfície esférica, a) abrasivos menores de 5 μm e b) abrasivos maiores de 12 μm | 82 |
| Figura 53 – a) Mapa composicional (EDS) da superfície da esfera de borracha mostrando elementos químicos encontrados, b) carbono – composição da borracha, c) silício – presente no SiC e d) ferro - debris. | 83 |
| Figura 54 – Dificuldade na formação de calota esférica utilizando o contra corpo de borracha poliuretano na condição de 0,4 N e 100G, a) vista superior da cratera de desgaste, b) vista 3D e c) perfil transversal de desgaste. | 84 |
| Figura 55 – Coeficiente de desgaste em função da velocidade angular para abrasivos de tamanho médio de 6,57 μm | 85 |
| Figura 56 – Coeficiente de desgaste em função da velocidade angular para abrasivos de tamanho médio de 2,11 μm | 86 |
| Figura 57 - Espessura da camada hidrodinâmica em função da velocidade angular. | 87 |
| Figura 58 – Micrografias obtidas pelo MEV indicando o aumento de abrasivos incrustados na superfície desgastada com o aumento da velocidade para concentração de 0,1 $\text{g}_{\text{SiC}}/\text{cm}^3_{\text{água}}$. Para carga de 0,2N, a) 40 rpm, b) 80 rpm e c) 150 rpm. Para carga de 0,4N, d) 40 rpm, e) 80 rpm e f) 150 rpm. | 88 |

| | |
|---|----|
| Figura 59 – Micrografias via MEV das crateras de desgaste mostrando o aumento da quantidade de pequenas regiões escuras (partículas abrasivas de SiC incrustadas) na superfície desgastada, principalmente na região de entrada. a) 40 rpm e b) 150 rpm. | 88 |
| Figura 60 – Imagens de MEV, elétrons retroespalhado, mostrando a diferença entre abrasivos (pontos escuros) engastados na amostra: região de entrada e no meio da calota de desgaste. | 89 |
| Figura 61 - Distância de separação em função do número de rotações para ensaios variando a velocidade mantendo a concentração da solução abrasiva fixa. | 90 |
| Figura 62 - Distância de separação em função do número de rotações para ensaios variando a velocidade com concentração da solução abrasiva variável. | 91 |
| Figura 63 – Micrografias obtidas pelo MEV mostrando os micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 20G, c) 50G, d) 80G e e) 100G com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,2 N com esfera de aço martensítico 52100. | 92 |
| Figura 64 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G e b) 100G, com carga de 0,4N. | 93 |
| Figura 65 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 20G, c) 50G, d) 80G e e) 100G com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,4N com esfera de aço inoxidável austenítico 304. | 93 |
| Figura 66 - Imagens de MEV, elétrons secundários, dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 100G, com carga de 0,2N e c) 0G, d) 100G, com carga de 0,4N, aumentos de 2000x, utilizando esfera de aço inoxidável austenítico 304. | 94 |
| Figura 67 – Micrografias via MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 20G, b) 50G, c) 80G e d) 100G. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,2N com esfera de zircônia-alumina. | 95 |
| Figura 68 – Micrografias via MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 20G, b) 50G, c) 80G e d) 100G. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,4N com esfera de zircônia-alumina. | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 69 - Imagens de MEV, elétrons secundários, dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 20G, c) 50G, d) 80G e e) 100G. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,4N com esfera de borracha poliuretano. | 97 |
| Figura 70 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 40 rpm, b) 80 rpm e c) 150 rpm. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500 e 2000x, para carga de 0,2N com concentração da solução fixa..... | 98 |
| Figura 71 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 40 rpm, b) 80 rpm e c) 150 rpm. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500 e 2000x, para carga de 0,4N com concentração da solução variada..... | 98 |
| Figura 72 - Análise da evolução da severidade de contato para 0G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina (cerâmica), segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003)..... | 99 |
| Figura 73 - Análise da evolução da severidade de contato para 50G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina (cerâmica), segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003)..... | 100 |
| Figura 74 - Análise da evolução da severidade de contato para 100G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina (cerâmica), segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003)..... | 100 |
| Figura 75 - Análise da evolução da severidade de contato para ensaios variando a velocidade e com concentração da solução abrasiva constante, com carga normal de 0,4N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003). | 101 |
| Figura 76 - Análise da evolução da severidade de contato para ensaios variando a velocidade e a concentração da solução abrasiva, com carga normal de 0,2N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003). | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Porcentagem em massa de abrasivos grandes (G) e pequenos (P) utilizados nas misturas. | 58 |
| Tabela 2 - Rotina de condicionamento superficial das esferas de diferentes materiais. | 60 |
| Tabela 3 - Parâmetros dos ensaios com diferente distribuição do tamanho abrasivo e contra corpos..... | 60 |
| Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios variando a velocidade angular da esfera de aço martensítico AISI 52100, mantendo a concentração da solução abrasiva constante nos ensaios..... | 61 |
| Tabela 5 - Parâmetros utilizados em ensaios variando a velocidade angular da esfera de aço martensítico AISI 52100 e a concentração de forma proporcional ao aumento do tempo de ensaio..... | 61 |
| Tabela 6 – Variação da concentração da solução abrasiva com o tempo de ensaio. | 61 |
| Tabela 7 - Diâmetros médios das partículas abrasivas das misturas e as larguras das distribuições. | 65 |
| Tabela 8 - Diâmetros médio e larguras da distribuição dos pós A e B. | 66 |
| Tabela 9 – Fator de esfericidade dos pós abrasivos. | 67 |
| Tabela 10 – Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,2 N..... | 70 |
| Tabela 11 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,4 N..... | 70 |
| Tabela 12 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para aço inoxidável austenítico AISI 304, 0,2 N..... | 74 |
| Tabela 13 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de aço inox 304, 0,4 N..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Tabela 14 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de zircônia - alumina, 0,2N..... | 78 |
| Tabela 15 – Volume total de SiC durante os ensaios..... | 86 |
| Tabela 16 – Percentual de partículas ativas no contato e diâmetros médio. | 90 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| b | diâmetro da calota de desgaste |
| h | profundidade da calota de desgaste (TREZONA et al., 1999) |
| R | raio da esfera |
| N | carga normal (TREZONA et al., 1999) |
| S | distância deslizada (TREZONA et al., 1999) |
| k | coeficiente de desgaste dimensional |
| h_l | distância determinada pela condição de lubrificação |
| D_p | diagonal maior da partícula modelo de Williams e Hyncica (1992) |
| β | ângulo da partícula |
| W | carga aplicada |
| H_a | dureza da amostra |
| H_e | dureza da esfera |
| P | carga por partícula modelo de Adachi e Hutchings (2003) |
| d_e | profundidade de indentação na esfera |
| d_a | profundidade de indentação na amostra |
| D | diâmetro das partículas abrasivas esféricas modelo de Adachi e Hutchings (2003) |
| H | distância de separação modelo de Adachi e Hutchings (2003) |
| N | número de partículas no contato modelo de Adachi e Hutchings (2003) |
| A | área de interação |
| ϑ | fração volumétrica de abrasivo na lama |
| c | constante de proporcionalidade |
| A_0 | área de contato inicial |
| a | raio da área de contato Hertiziano |

S_{ensaio} Severidade de ensaio

P pressão de contato dada pela relação entre a carga normal aplicada pela área da superfície esférica

v velocidade de deslizamento

η viscosidade do fluido

U velocidade tangencial

h_0 espessura do filme hidrodinâmico

S severidade de contato Adachi e Hutchings (2003)

S^* severidade de contato crítica

b' tamanho do diâmetro

a distância de separação (TREZONA e HUTCHINGS, 1999)

α e β constantes empíricas calculadas para o análises de Severidade de contato de Adachi e Hutchings (2003)

0 P partículas abrasivas de diâmetro 5,97 μm

100 G partículas abrasivas de diâmetro 14,39 μm

A partículas abrasivas de diâmetro para ensaio de velocidade 2,11 μm

B partículas abrasivas de diâmetro para ensaio de velocidade 6,57 μm

LISTA DE SIGLAS

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

TRICORRMAT – Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais

POLI - USP – Escola politécnica da Universidade de São Paulo

LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

PNB - Produto Nacional Bruto

MET - Microscópio Eletrônico de Transmissão

SiC - Carbetto de Silício

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 22 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 24 |
| 2.1 | TRIBOLOGIA E SEUS CONTEXTOS..... | 24 |
| 2.2 | INTRODUÇÃO AO ENSAIO DE MICROABRASÃO | 24 |
| 2.2.1 | Histórico | 24 |
| 2.2.2 | Princípio do Ensaio de Microabrasão | 26 |
| 2.3 | CÁLCULO DO VOLUME DESGASTADO | 27 |
| 2.4 | CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE DESGASTE..... | 28 |
| 2.5 | MODELO DE TRANSIÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE | 30 |
| I. | Modelo Williams e Hyncica | 30 |
| II. | Modelo de Adachi e Hutchings | 32 |
| 2.6 | SEVERIDADE DE CONTATO..... | 34 |
| 2.7 | INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA TRANSIÇÃO DO MICROMECHANISMO DE DESGASTE | 36 |
| 2.7.1 | Influência da Velocidade | 47 |
| 2.8 | PROBLEMAS ASSOCIADOS À MEDIÇÃO DA CALOTA..... | 51 |
| 2.8.1 | Scuffing | 51 |
| 2.8.2 | Ridge | 53 |
| 2.8.3 | Pile-up | 55 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 57 |
| 3.1 | MATERIAIS..... | 57 |
| 3.1.1 | Amostras | 57 |
| 3.1.2 | Esferas | 57 |
| 3.1.3 | Abrasivo | 57 |
| 3.1.4 | Análise da distribuição das partículas abrasivas | 59 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2 | MÉTODOS..... | 59 |
| 3.2.1 | Ensaio Microabrasão..... | 59 |
| 3.2.2 | Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV | 62 |
| 3.2.3 | Analizador Topográfico | 63 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 64 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E MORFOLÓGICA DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS..... | 64 |
| 4.2 | COEFICIENTES DE DESGASTE PARA ENSAIOS VARIANDO AS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA DIFERENTES CONTRA CORPOS | |
| | 67 | |
| 4.2.1 | Modelo de fração de abrasivos ativos no contato..... | 69 |
| 4.2.2 | Comportamento do desgaste com a distância de separação (h) para esfera de Aço Martensítico AISI 52100..... | 70 |
| 4.2.3 | Comportamento do desgaste com a distância de separação (h) para esfera de esfera de Aço Inoxidável Austenítico AISI 304 | 73 |
| 4.2.4 | Comportamento do desgaste com a distância de separação (h) para esfera de esfera de Zircônia – Alumina..... | 77 |
| 4.2.5 | Esfera de Borracha Poliuretano | 81 |
| 4.3 | COEFICIENTES DE DESGASTE PARA ENSAIOS VARIANDO A VELOCIDADE..... | 84 |
| 4.3.1 | Cálculo da distância de separação para diferentes velocidades de rotação da esfera | 89 |
| 4.4 | MICROMECHANISMOS DE DESGASTE | 91 |
| 4.4.1 | Esfera de aço martensítico AISI 52100 | 92 |
| 4.4.2 | Esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304 | 93 |
| 4.4.3 | Esfera de zircônia-alumina | 95 |
| 4.4.4 | Esfera de borracha poliuretana..... | 96 |
| 4.4.5 | Variação da velocidade | 97 |
| 4.5 | SEVERIDADE DE CONTATO..... | 99 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 4.5.1 | Variando a velocidade de rotação..... | 101 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 103 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 105 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 106 |
| 8 | APÊNDICE..... | 109 |

1 INTRODUÇÃO

O desgaste microabrasivo pode ser encontrado em inúmeras situações. No setor industrial, por exemplo, este desgaste é comum na extração e produção do óleo e gás natural, onde uma mistura de fluido e areia é transportada por diversos equipamentos e dutos antes de ser estocada em tanques. O transporte do produto junto com a areia ocorre devido aos reservatórios fósseis brasileiros serem, em sua maioria, areníticos, acarretando que o desgaste nas tubulações seja por erosão, erosão-corrosão ou abrasão/microabrasão (MARQUES *et al.*, 2011).

No setor mineral, o desgaste microabrasivo está presente, por exemplo, na sondagem com ferramentas diamantadas. No processo de extração do mineral, o metal ligante da ferramenta é desgastado pela rocha e expõe novos diamantes que estão dispersos na matriz. Contudo, o desgaste não pode acontecer muito rapidamente, para que os diamantes não sejam arrancados precocemente, mas também não deve ocorrer de forma lenta a ponto de cegar a ferramenta (DWAN, 1998; LOZZER, 2008).

Uma outra área que também desenvolve pesquisas e aplica a microabrasão de forma positiva é a dentística, onde o desgaste microabrasivo pode causar perdas não prejudiciais ao tecido dental, mas pode propiciar correções definitivas de irregularidades e manchas do esmalte dental (SUNDFELD *et al.*, 2013).

Portanto, é comum encontrar desgaste microabrasivo não só em meios industriais, mas em diversas áreas, podendo influenciar negativamente, de tal forma em que leve à falhas e substituições de equipamentos, ou de forma positiva, como em processos de usinagem, lixamento e outros.

As perdas econômicas causadas pelo desgaste foram estudadas inicialmente por Jost, em 1966, e, posteriormente, estimativas foram feitas para diferentes países no decorrer dos anos, baseadas no Produto Nacional Bruto (PNB). Como exemplo, têm-se as perdas relativas ao desgaste no Brasil, que em 2004, foram estimadas entre 17 e 104 bilhões de reais por ano. Segundo Jost (1990), com investimentos no estudo da tribologia, poderiam ocorrer reduções em tais perdas de aproximadamente 20% (SINATORA, 2005).

Para que seja possível prolongar a vida útil de uma ferramenta ou minimizar os problemas relacionados ao desgaste, faz-se necessário antecipar a forma e a intensidade com as quais irão ocorrer. Por ser sistêmico, para impedir ou reduzir o desgaste, não basta somente fazer a seleção correta de materiais, precisa ser feito um estudo do movimento (deslizamento, rolamento, oscilatório ou de impacto) e dos mecanismos (abrasão, erosão, adesão, etc.), que em muitos casos, ocorre ação combinada, agindo no desgaste (LEITE, 2009).

Logo, conseguir reproduzir os mecanismos que agem no ambiente de desgaste em laboratório é de suma importância para a total compreensão dos fenômenos que estão ocorrendo no campo de desgaste e torna possível minimizar ou evitar os danos decorrentes.

Como foi mostrado, o desgaste microabrasivo está presente em muitos meios e fatores tais como a velocidade de desgaste e a distribuição do tamanho das partículas abrasivas são variáveis comuns nos ambientes de desgaste, porém pouco exploradas na literatura.

Este trabalho tem como objetivo entender a influência da distribuição do tamanho das partículas abrasivas no coeficiente de desgaste quando empregados contra corpos de diferentes naturezas no ensaio de microabrasão. Além disso, também possui o intuito de elucidar o comportamento do coeficiente de desgaste com o aumento da velocidade de rotação da esfera.

Em todos os casos, para melhor compreender o contato abrasivo, foram observados os micromecanismos de desgaste e a evolução no mapa da severidade de contato.

O trabalho foi organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, apresentam-se uma revisão bibliográfica para entender o movimento do abrasivo no contato e os principais parâmetros que influenciam na transição do micromecanismo de desgaste. O Capítulo 3 descreve os materiais utilizados e a metodologia adotada. Os resultados estão apresentados no Capítulo 4 e são discutidos fundamentados na literatura. O Capítulo 5, mostram-se as conclusões e, por fim, no Capítulo 6, estão dispostas as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRIBOLOGIA E SEUS CONTEXTOS

A tribologia foi definida, em 1966, como a ciência que agrupa o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação das superfícies em contato com movimento relativo, apoiando-se na mecânica, física, química e ciências dos materiais (DOWSON, 1998). Portanto, o desgaste constitui um dos três pilares da tribologia e, dentro dos tipos existentes, encontra-se o desgaste abrasivo, que, por definição, ocorre devido às partículas ou protuberâncias duras forçadas a moverem-se contra uma superfície sólida (ASTM G 40). Ressalta-se que, no caso de partículas duras da ordem de poucos micrometros (até aproximadamente 15 μm), o desgaste será denominado de microabrasivo.

2.2 INTRODUÇÃO AO ENSAIO DE MICROABRASÃO

2.2.1 Histórico

O conceito básico do ensaio de microabrasão surgiu pela necessidade de determinar perfis de profundidade química (composição) na espectroscopia Auger¹. A técnica de bombardeamento de elétrons, utilizada para obter tais perfis, era muito longa para retirada de poucos micrometros de material (GEE e GANT, 2011). Thompson (1979), com objetivo de obter perfis de profundidade precisos (maiores do que 1 μm) de forma mais simples, realizou um ensaio constituído de uma esfera de aço revestida com pasta diamantada padrão, que foi rotacionada contra uma amostra. As partículas de diamante geraram uma marca de desgaste, deixando evidente o substrato e o revestimento desgastados, conforme Figura 1.

¹ Espectroscopia Auger é uma técnica de estudo da superfície que consiste na análise da energia cinética de elétrons emitidos por uma amostra, originários das camadas internas dos átomos.

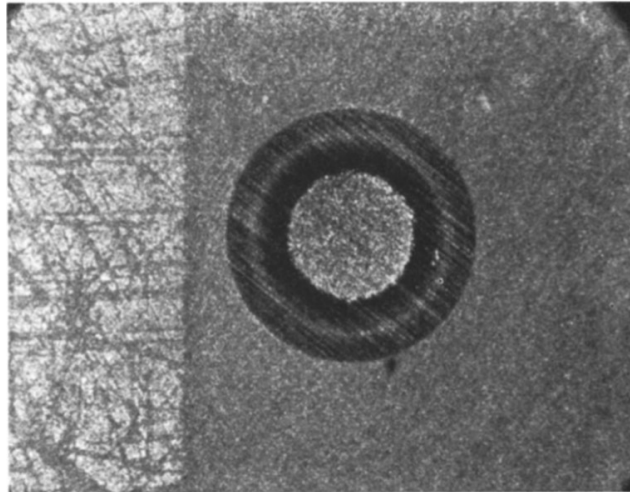


Figura 1 - Cratera esférica de desgaste em amostra de aço revestido TiN. Tornando visível o desgaste no substrato e no revestimento (40x) (THOMPSON, 1979).

Em 1991, Kassaman *et al.* propuseram um novo modelo de ensaio baseado na necessidade de estudar a resistência à abrasão das finas camadas de revestimentos. Para isso, foram realizados ensaios de microabrasão em um *Dimple Grinder*, que tem por finalidade original desbastar amostras para análise no microscópio eletrônico de transmissão (MET), utilizando partículas duras de diamante da ordem de poucos micrometros. O novo método, além de rápido, simples e reproduzível, forneceu a resistência ao desgaste, tanto do revestimento, quanto do material do substrato.

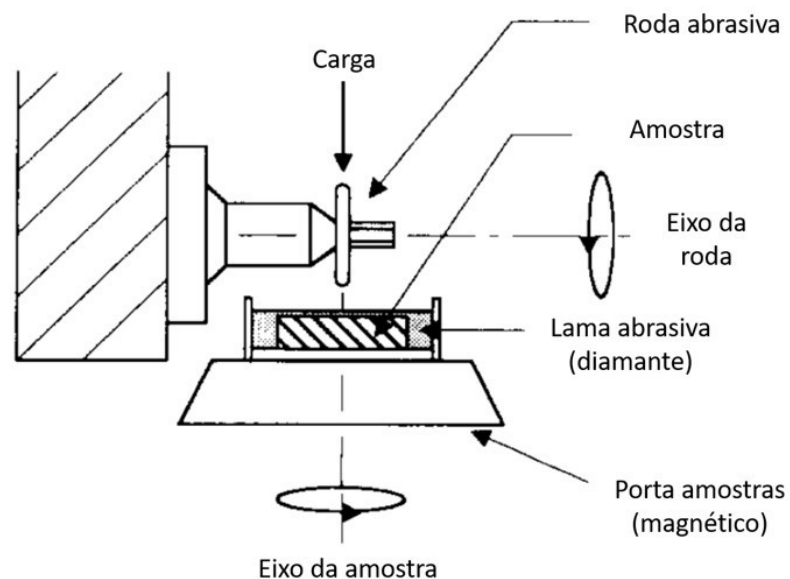


Figura 2 - Vista esquemática do *dimple grinder* (KASSAMAN *et al.*, 1991)

Já Rutherford e Hutchings (1996), baseados nos métodos desenvolvidos anteriormente, elaboraram um equipamento, constituído de uma esfera rotativa, para determinar o coeficiente de desgaste do substrato e da camada de revestimento pela equação apresentada por Rabinowicz *et al.*, (1961), derivada da equação de Archard para o deslizamento. Hoje em dia, o micro-abrasômetro, além do estudo de revestimentos, tem sido empregado para diversas finalidades.

2.2.2 Princípio do Ensaio de Microabrasão

O princípio do ensaio de microabrasão consiste em uma esfera que é rotacionada contra uma amostra, sendo adicionada uma lama abrasiva à região de contato. Ao tribossistema é atribuído uma carga normal.

Os principais parâmetros de ensaio definidos são a carga normal, a velocidade de rotação da esfera e a distância deslizada.

Existem dois tipos mais usuais de configuração para o micro-abrasômetro: a) esfera livre e b) esfera fixa, como mostra a Figura 3.

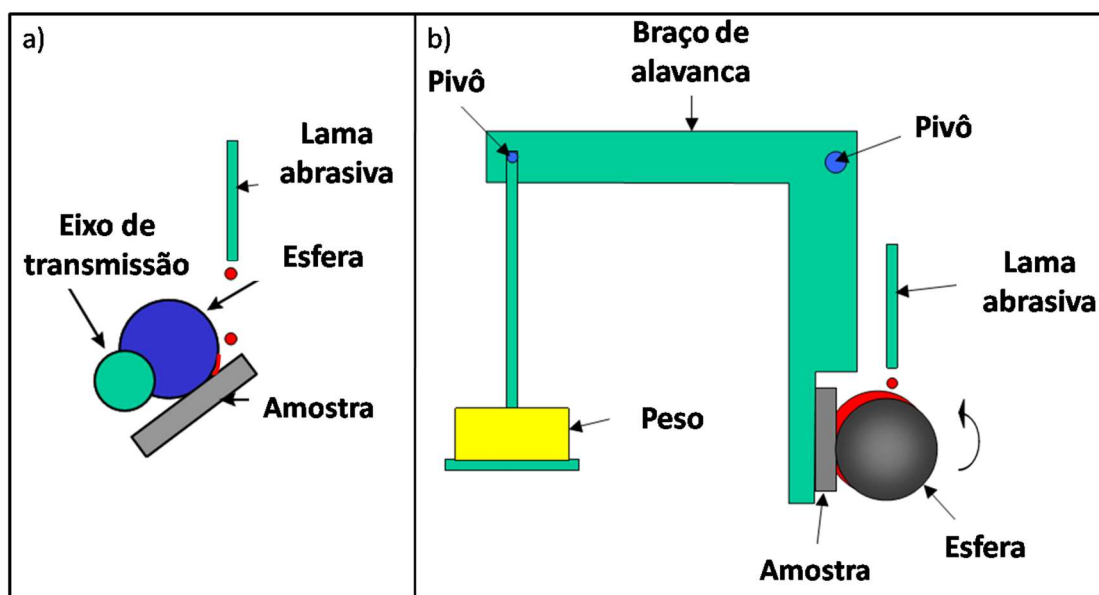


Figura 3 - Princípio ensaio de microabrasão para a) configuração esfera livre e b) configuração esfera fixa. Figura modificada do GANT e GEE, 2011.

Esfera livre: a esfera é apoiada sobre um eixo que irá transmitir a velocidade de rotação. A desvantagem dessa configuração é que há uma variação pequena de carga normal que pode ser adicionada ao tribossistema, pois a carga fica limitada a uma fração do peso da esfera. Para aumentar o carregamento aplicado é necessário alterar a inclinação da amostra, mas de forma que ainda gere calotas esféricas (GEE *et al.*, 2003).

Outra desvantagem está no fato da esfera não ser acionada diretamente, o que gera alguma incerteza na velocidade da esfera, podendo deslizar sobre o eixo de transmissão. A aderência da esfera ao eixo pode ser melhorada com a utilização de elementos de borracha no eixo (GEE *et al.*, 2003).

Esfera fixa: a esfera é fixada ao eixo de transmissão e pressionada contra a amostra através de uma carga normal que é adicionada ao sistema por meio de um peso morto. Portanto, o carregamento não fica restrito ao peso da esfera. Esse tipo de configuração supera as limitações da esfera livre (GANT e GEE, 2011).

2.3 CÁLCULO DO VOLUME DESGASTADO

A calota de desgaste produzida por um contra corpo esférico, de raio R , pode ser aproximada como sendo de geometria esférica. O volume desgastado pode ser dado pelas Equações 1 e 2, sendo b o diâmetro da calota de desgaste e h a profundidade, para b e $h \ll R$ (TREZONA *et al.*, 1999).

$$V \approx \frac{\pi b^4}{64R} \quad (\text{eq. 1})$$

$$V \approx \pi h^2 R \quad (\text{eq. 2})$$

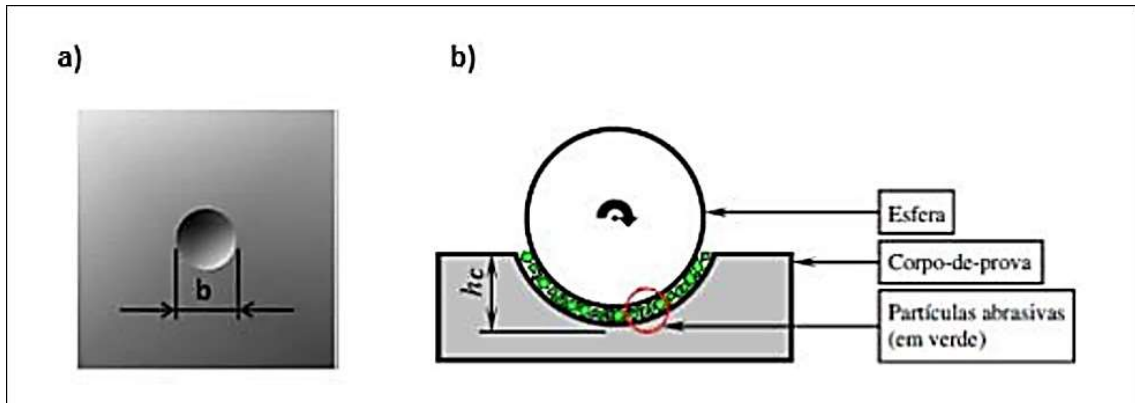


Figura 4 - a) diâmetro (MARQUES et al., 2011) e b) profundidade da calota de desgaste (COZZA, 2011).

Para materiais homogêneos, o volume desgastado pode ser relacionado com a distância deslizada (S) pela esfera durante o ensaio e a carga normal (N) aplicada por meio da equação de Archard (TREZONA e HUTCHINGS, 1999):

$$V = kSN \quad (\text{eq. 3})$$

O coeficiente de desgaste dimensional, $k [m^3(Nm)^{-1}]$, pode ser calculado utilizando o diâmetro ou a profundidade da calota de desgaste:

$$k = \frac{\pi b^2}{64RNS} \quad (\text{eq. 4})$$

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE DESGASTE

A classificação inicial dos modos de desgaste foi dada observando-se as variáveis de entrada do sistema. Desgaste abrasivo a dois corpos, do inglês “*two-body abrasive wear*”, ocorre quando há protuberâncias duras no contra corpo, portanto as variáveis de entrada são o primeiro corpo, sendo a face a ser desgastada, e o segundo corpo, como sendo o contra corpo, contabilizando-se dois corpos. Já o desgaste abrasivo a três corpos, do inglês “*three-body abrasive wear*”, ocorre quando partículas duras estão livres para rotacionar ou deslizar entre a face e o contra corpo, sendo as

variáveis de entrada a face desgastada, o contra corpo e a partícula dura, contabilizando-se três corpos, de acordo com a Figura 5 (HUTCHINGS, 1992).

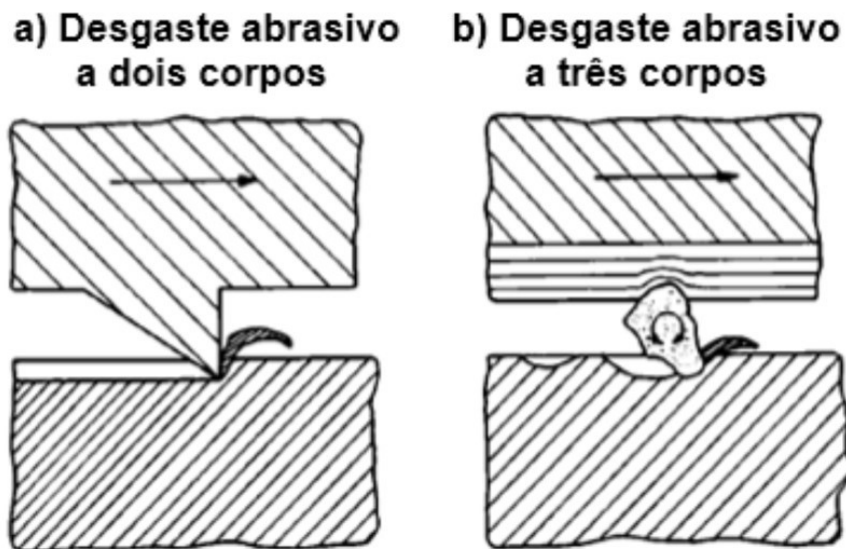


Figura 5 - a) Desgaste abrasivo a dois corpos e b) desgaste abrasivo a três corpos (ZUM GAHR, 1987).

Com a necessidade de se obter uma padronização da classificação, Trezona *et. al.*, em 1999, sugerem uma nova nomenclatura baseando-se no comportamento da partícula abrasiva. Desgaste abrasivo por riscamento refere-se ao processo onde as partículas abrasivas são engastadas ao contra corpo e as marcas de desgaste na amostra são riscos paralelos na direção do deslizamento, enquanto que desgaste abrasivo por múltiplas indentações refere-se ao processo onde as partículas abrasivas são livres para rotacionar ou deslizar entre a face e o contra corpo, causando na amostra múltiplas indentações com pouca ou nenhuma direcionalidade. Ressalta-se que existe ainda a possibilidade de ocorrer os dois modos de desgaste durante o processo, caso em que será classificado como 'modo-misto'.

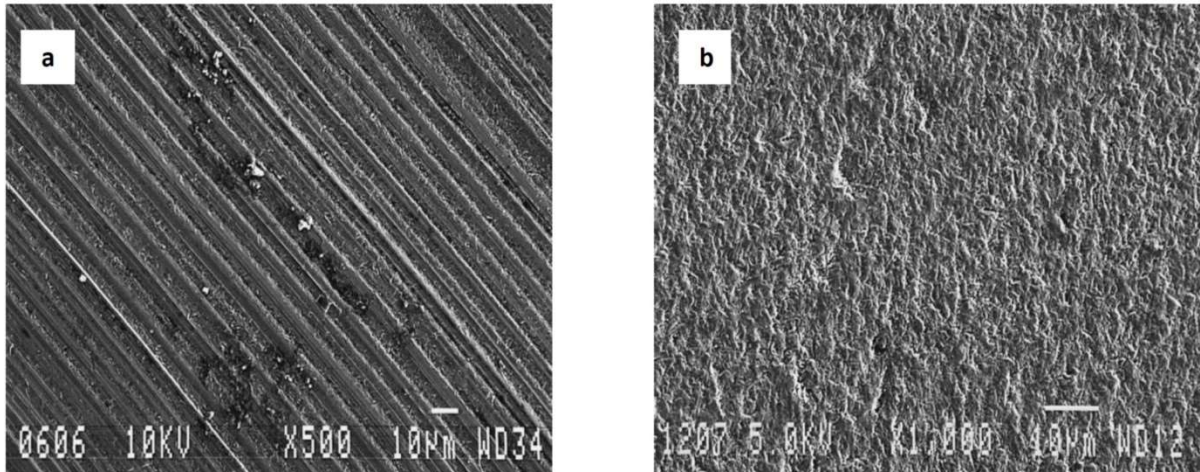


Figura 6 - Imagem de MEV para corpo de prova de aço ferramenta com desgaste abrasivo por: a) riscamento - para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,0009 (0,003 g/cm³) do abrasivo (diamante 3 µm) na lama abrasiva e b) rolamento - para uma carga normal de 0,25 N e fração volumétrica de 0,237 (1,0 g/cm³) do abrasivo (SiC) na lama abrasiva (TREZONA *et al.*, 1999).

2.5 MODELO DE TRANSIÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE

O modo dominante de desgaste está relacionado com a movimentação das partículas. Trabalhos anteriores (ALLSOPP *et al.*, 1998; TREZONA e HUTCHINGS, 1999; TREZONA *et al.*; 1999; ADACHI e HUTCHINGS, 2003) mostraram que as condições de ensaio, tais como carga aplicada, fração volumétrica de abrasivo, material abrasivo, material da amostra e do contra corpo e condição superficial da esfera, influenciam diretamente na transição do modo de desgaste (ADACHI e HUTCHINGS, 2003). Assim, dois modelos foram propostos para descrever a teoria da movimentação das partículas abrasivas no ensaio: Modelo de Williams e Hyncica (1992) e Modelo de Adachi e Hutchings (2003).

I. Modelo Williams e Hyncica

O modelo surgiu por meio do trabalho de investigação dos mecanismos de desgaste abrasivo em contatos lubrificados, publicado em 1992 (WILLIAMS e HYNICICA). Apesar das inúmeras partículas abrasivas que existem na região de contato, apenas o movimento de uma partícula foi considerado. A distância h_t é determinada pela

condição de lubrificação e a partícula abrasiva idealizada como piramidal de base triangular, com diagonal maior D_p e ângulo β (fixado como 55°).

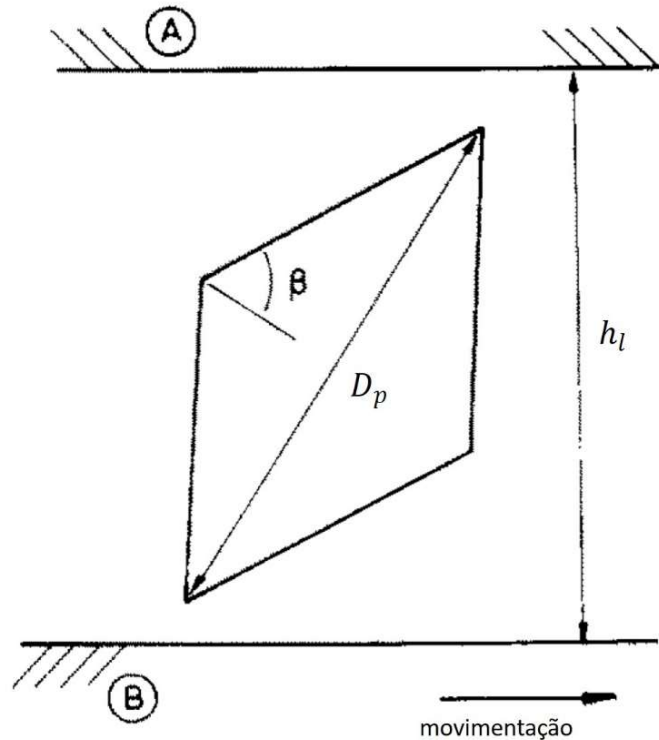


Figura 7 - Única partícula de desgaste descrita pelo ângulo β e diâmetro D_p (WILLIAMS e HYNICICA, 1992).

O equacionamento do modelo é fornecido através da relação entre os parâmetros geométricos, dado por:

$$\frac{D_p}{h_l} > \sec \beta \quad - \text{Desgaste abrasivo por riscamento (eq. 5)}$$

$$\frac{D_p}{h_l} < \sec \beta \quad - \text{Desgaste abrasivo por múltiplas indentações (eq. 6)}$$

Lembrando que β é fixado como 55° , quando a partícula está a uma distância $D_p / h_l > 1,74$, o modo de desgaste atuante será o de riscamento. E para o valor de $D_p / h_l \leq 1,74$, o modo de desgaste encontrado será o de múltiplas indentações.

II. Modelo de Adachi e Hutchings

Considerando que as partículas abrasivas são esféricas, com um diâmetro D , não fraturam e que a carga aplicada (W) é dividida igualmente para todos os abrasivos no contato, Adachi e Hutchings (2003) desenvolveram um modelo teórico para o movimento da partícula, baseado no que fora proposto anteriormente por Williams e Hyncica (1992).

Dada uma partícula no contato entre a esfera e a amostra (Figura 8), sob uma carga aplicada (W), a profundidade de indentação, na esfera (d_e) e na amostra (d_a), pode ser estimada considerando que toda carga aplicada pela partícula (P) é suportada pela deformação plástica da superfície, em uma pressão igual à sua dureza. Para uma amostra de dureza H_a , a carga atua sobre a parte frontal da partícula esférica sobre uma área projetada aproximadamente igual a:

$$A_{proj} = \frac{\pi D d_a}{2} \quad (\text{eq. 7})$$

Sendo $d_a \ll D$.

A profundidade de indentação será dada por:

Amostra:

$$d_a = 2 \frac{P}{\pi D H_a} \quad (\text{eq. 8})$$

Esfera:

$$d_e = 2 \frac{P}{\pi D H_e} \quad (\text{eq. 9})$$

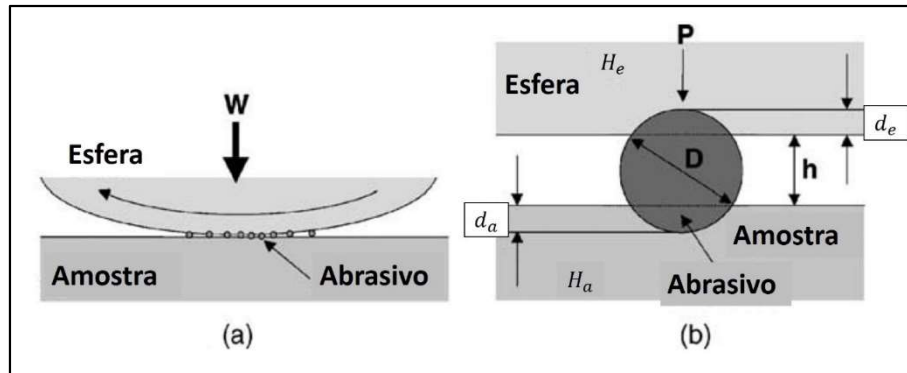


Figura 8 - a) Modelo da zona de contato entre a esfera, amostra e abrasivo; b) indentação por uma única partícula abrasiva (ADACHI e HUTCHINGS, 2003).

Pela Figura 8, a distância de separação h , pode calculada como:

$$h = D - d_a - d_e \quad (\text{eq. 10})$$

Substituindo os termos,

$$h = D - \left(\frac{2P}{\pi DH} \right) \quad (\text{eq. 11})$$

Onde,

$$H' = \frac{1}{H_a} + \frac{1}{H_e} \quad (\text{eq. 12})$$

P é a carga por partícula, dada pela razão entre a carga normal aplicada (W) e o número de partículas no contato (N). Considerando que, o número de partículas no contato é proporcional à fração volumétrica de abrasivos na solução, para uma área de interação A , entre a esfera e a amostra, N é dado por:

$$N = \frac{Ac\vartheta}{\pi D^2} \quad (\text{eq. 13})$$

Onde ϑ é a fração volumétrica de abrasivo na lama e c uma constante de proporcionalidade. A carga aplicada por cada partícula no contato será:

$$P = \frac{\pi W D^2}{A c \vartheta} \quad (\text{eq. 14})$$

Assim, a distância de separação é dada por:

$$h = D \left(1 - \frac{2W}{A c \vartheta H'} \right) \quad (\text{eq. 15})$$

Sendo a área de contato inicial, A_0 :

$$A_0 = \pi(a^2 + 2RD) \quad (\text{eq. 16})$$

Onde a é o raio da área de contato Hertiziano e R o raio da esfera.

A relação entre $(W/A\vartheta H')$ é definida como a severidade de contato. Para um dado valor de (D/h) , a transição entre deslizamento e rolamento das partículas abrasivas acontecerá quando o valor da severidade de contato for crítico.

2.6 SEVERIDADE DE CONTATO

Adachi e Hutchings (2003) produziram um mapa de desgaste, considerando diversos ensaios, que pode ser usado para garantir as condições necessárias para obter o deslizamento ou o rolamento da partícula abrasiva.

Os resumos dos modos de desgaste observados nos trabalhos foram plotados em função da severidade de contato (S) e da razão de dureza entre a amostra e a esfera (H_a/H_e). A severidade de contato é definida pela Equação 18, e é influenciado pelas condições dos ensaios.

$$S = \frac{W}{A\vartheta H'} \quad (\text{eq. 17})$$

Para condições críticas de ensaio, onde ocorre a transição do movimento de riscamento para múltiplas indentações, existe um valor crítico de severidade de contato, S^* .

$$S^* = \alpha(H_a/H_e)^\beta \quad (\text{eq. 18})$$

$$\alpha = 0,0076 \text{ e } \beta = -0,49$$

Para obtenção do regime de rolamento, é necessário garantir que:

$$S = \frac{W}{A\vartheta H'} \leq \alpha \left(\frac{H_a}{H_e} \right)^\beta \quad (\text{eq. 19})$$

A Figura 9 representa o mapa dos modos de desgaste.

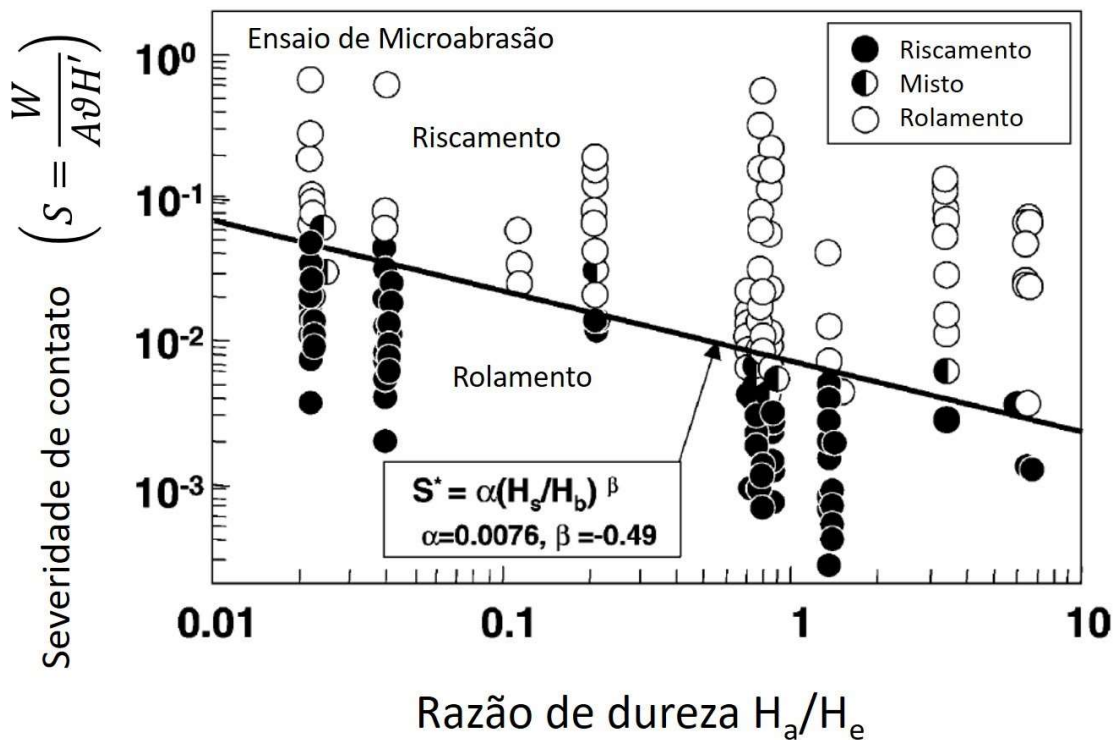


Figura 9 - Mapa dos modos de desgaste como uma função da severidade de contato e da razão de dureza entre esfera e amostra (ADACHI e HUTCHINGS, 2003).

É importante salientar que, apesar de considerar o tamanho médio das partículas de desgaste nos cálculos da severidade de contato, o Modelo teórico de Adachi e

Hutchings (2003) idealiza as partículas como esféricas, portanto não inclui a morfologia dos abrasivos nos resultados.

2.7 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA TRANSIÇÃO DO MICROMECHANISMO DE DESGASTE

Muitos são os parâmetros que podem ser explorados no ensaio de microabrasão como carga normal, distância deslizada, materiais e condições superficiais da esfera e da amostra, assim como as propriedades e morfologia do abrasivo.

Em 1998, Allsopp *et al.* estudaram a influência da condição superficial da esfera. Para isso, foram escolhidos contra corpos de aço martensítico AISI 52100 (1080 ± 50 HV) com diferentes tratamentos superficiais (como recebida, já utilizada e com superfície exposta ao processo corrosivo). Utilizaram amostras macias (alumínio 41 ± 1 HV) e amostras com dureza próxima à da esfera (aço carbono temperado 970 ± 20 HV).

A esfera condicionada por corrosão apresentou a condição superficial parecida com a já utilizada. Para essas, com rugosidade prévia, os ensaios são altamente reproduzíveis, para os dois tipos de material do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 10 - (a), entretanto o mesmo comportamento não foi observado para o contra corpo como recebido (liso), Figura 10 - (b).

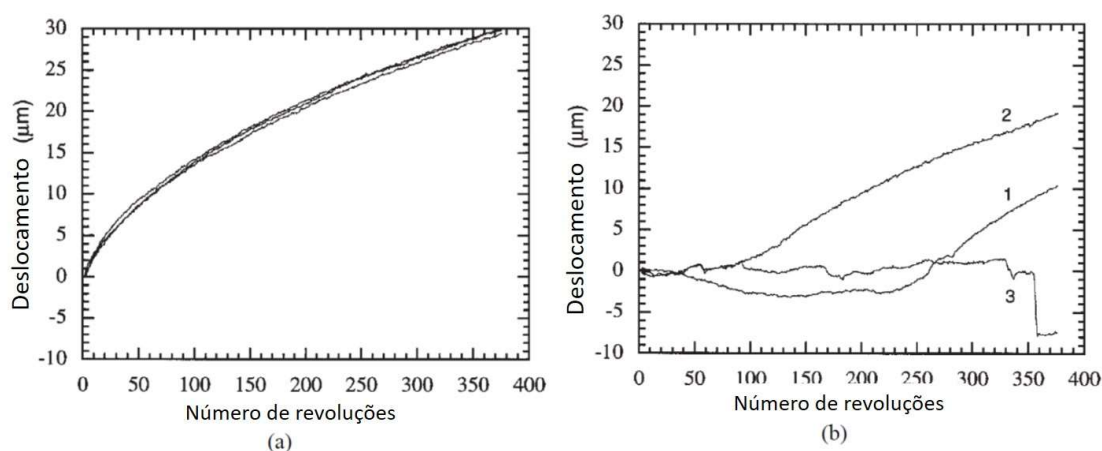


Figura 10 - Deslocamento esfera-amostra durante ensaios de desgaste microabrasivo em alumínio usando a) esfera condicionada (superfície rugosa) e b) esfera nova (superfície lisa) (ALLSOPP *et al.*, 1998).

Contudo, os pites formados no processo de condicionamento ou de uso das esferas, mostraram-se capazes de influenciar apenas no arrastamento inicial das partículas. Após a formação da camada de abrasivos que separa o contato, torna-se fácil a entrada das partículas duras (TREZONA e HUTCHINGS, 1999). Stachowiak e Stachowiak (2006), também, mostraram que a condição superficial da esfera influencia de forma mais evidente no início dos ensaios (Figura 11) e que um aumento da distância de deslizamento proporciona um aumento na rugosidade superficial do contra corpo.

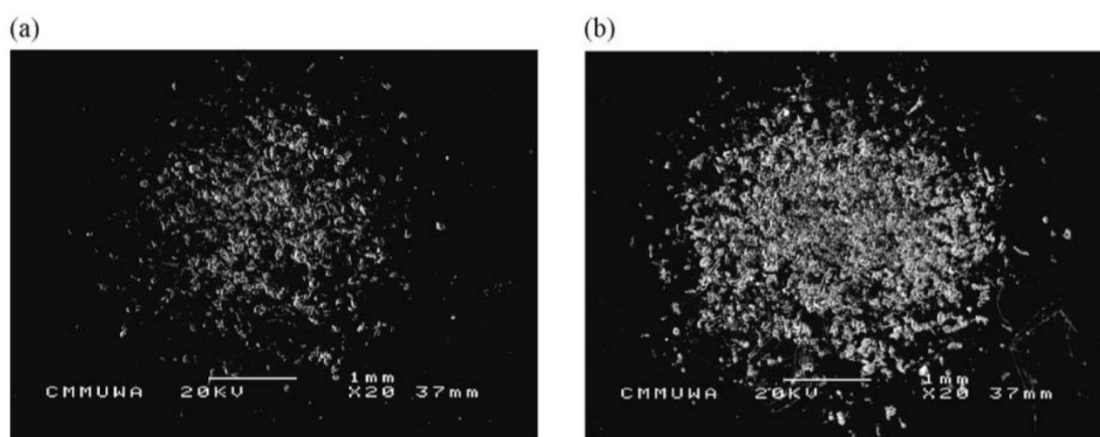


Figura 11 - Imagens de MEV de marcas de desgaste em aço após 10 segundos de ensaio na presença de solução abrasiva de sílica com a) esfera nova (superfície lisa) e b) esfera condicionada (superfície rugosa) (STACHOWIAK e STACHOWIAK, 2006).

Mas, para que os abrasivos consigam se movimentar na zona de contato, é necessário que haja uma rugosidade na superfície da esfera. Partículas angulares podem engastar no contra corpo e no corpo de prova. Para esfera lisa, observou-se que os abrasivos podem indentar na entrada da zona de contato e permanecerem estacionários, pois não há rugosidade suficiente na esfera para que consiga arrastar as partículas para a zona de contato (Figura 12 - a). Já para as esferas condicionadas, os abrasivos podem fixar na superfície rugosa e, então, serem arrastados (Figura 12- b) (ALLSOPP *et al.*, 1998). A rugosidade do contra corpo favorece o regime de riscamento das partículas duras (STACHOWIAK e STACHOWIAK, 2006).

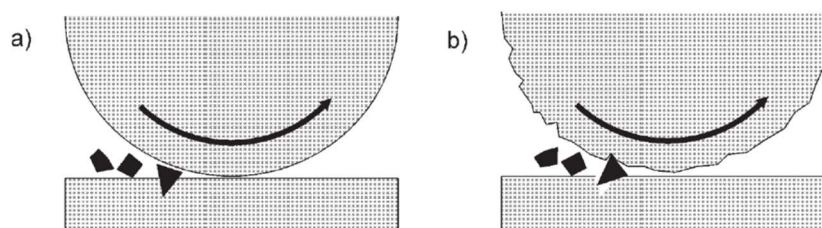


Figura 12 - Ilustração esquemática do mecanismo de arrastamento de partícula angulares: a) partícula indenta amostra e permanece estacionária e b) partícula é arrastada pela rugosidade na superfície da esfera (ALLSOPP *et al.*, 1998).

Em 2015, Costa *et. al.* (2015) observaram que, ao realizarem ensaios de microabrasão com esferas de cerâmica e amostras macias, a rugosidade superficial da esfera influenciou tanto no aumento do coeficiente de desgaste quanto no comportamento da partícula dura no contato. O aumento da rugosidade da esfera de zircônia proporcionou a mudança na dinâmica da partícula de deslizamento para rolamento, os autores atribuíram o comportamento ao fato de que um aumento da rugosidade superficial da esfera ajuda os abrasivos a entrarem no contato, gerando um maior número de abrasivos naquela região, diminuindo a carga suportada por cada partícula e alterando o mecanismo.

A influência da condição superficial da esfera fica ainda mais evidente quando utilizadas amostras macias (ALLSOPP *et al.*, 1998).

Em 1999, Trezona e Hutchings fizeram um estudo sobre o desgaste microabrasivo em diferentes combinações de corpo e contra corpo (variando a dureza), para entender o comportamento de materiais macios sujeitos a microabrasão. Para amostras mais duras do que os contra corpos, a rugosidade inicial da esfera não influencia no desgaste, pois as partículas indentam-na significativamente, e são arrastadas para a zona de contato. O mesmo não ocorre para amostras com dureza inferior à do contra corpo, podendo levar até mesmo a formação de *ridges* (seção 2.8.2).

O uso de esferas e amostras de diferentes naturezas conduz a uma mudança no comportamento das partículas na região de contato, podendo alterar de riscamento para rolamento, de acordo com as combinações de durezas (Figura 13). Outro fator importante para a dinâmica do abrasivo na retirada do material é a carga normal aplicada (TREZONA e HUTCHINGS, 1999). Tal parâmetro, influencia de forma direta

na relação entre a distância de separação e o tamanho da partícula abrasiva, podendo tornar os abrasivos mais ou menos engastados, mudando o micromecanismo de desgaste (WILLIAMS e HYNICICA, 1992).

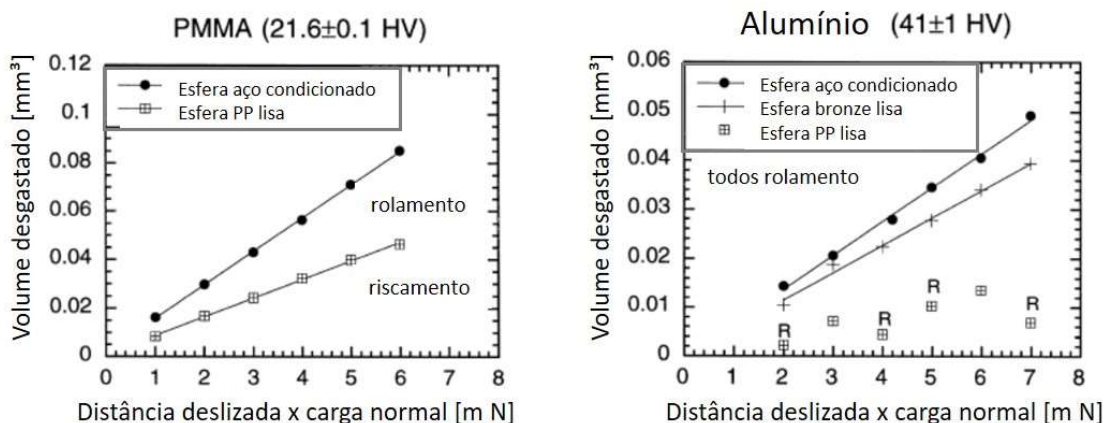


Figura 13 - Influência do material da esfera na relação entre volume e o produto da carga normal pela distância deslizada. Resultados obtidos para esferas de PP, bronze e aço condicionada, com amostras de PMMA e alumínio. As calotas de desgaste produzidas em alumínio com esfera de bronze são todas não esféricas (TREZONA e HUTCHINGS, 1999).

Trezona *et al.* (1999) estudaram como as condições de ensaio microabrasivo influenciam na transição entre riscamento e rolamento da partícula dura. Além da carga, foram variados, também, a concentração da solução abrasiva e o tipo de material abrasivo.

Os mapas de desgaste estão representados na Figura 14, os resultados para diferentes abrasivos não foram possíveis de serem agrupados. Com isso, cada material abrasivo gerou um mapa de mecanismos de desgaste. O aumento da fração volumétrica de abrasivos conduziu ao mecanismo de rolamento das partículas e, em contrapartida, o aumento da carga, favoreceu o riscamento. Existe ainda, uma região de transição em que foram encontrados os dois tipos de mecanismos, para todos os materiais.

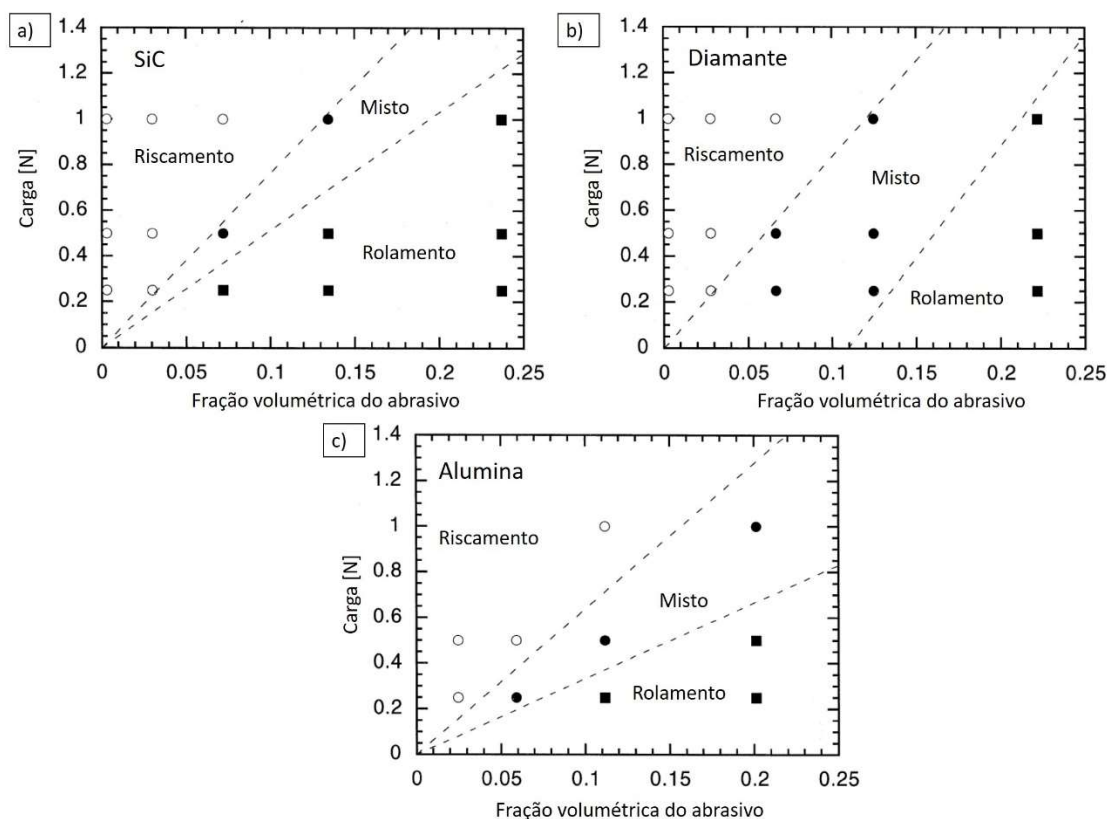


Figura 14 - Mapa dos micromecanismos de desgaste em função da carga normal aplicada e da fração volumétrica de abrasivos em amostras de aço ferramenta a) SiC, b) diamante e c) alumina (TREZONA *et al.*, 1999).

Pelo modelo de Adachi e Hutchings (2003), o fator determinante para que ocorra a transição está relacionado com a distribuição da carga aplicada pelo número de partículas atuantes no contato, chamada de carga por partícula. Para cargas elevadas e baixas concentrações, Trezona *et al.* (1999), a carga por partícula será maior, resultando em indentações mais profundas, conduzindo ao riscamento. O aumento do número de partículas no contato (aumento da fração volumétrica), faz com que a carga que cada partícula tenha que suportar seja menor, gerando indentações mais superficiais, favorecendo o rolamento dos abrasivos.

A relação entre a carga normal e a fração volumétrica de abrasivos, também, foi observada em termos do volume desgastado, exibindo um comportamento não linear (Figura 15).

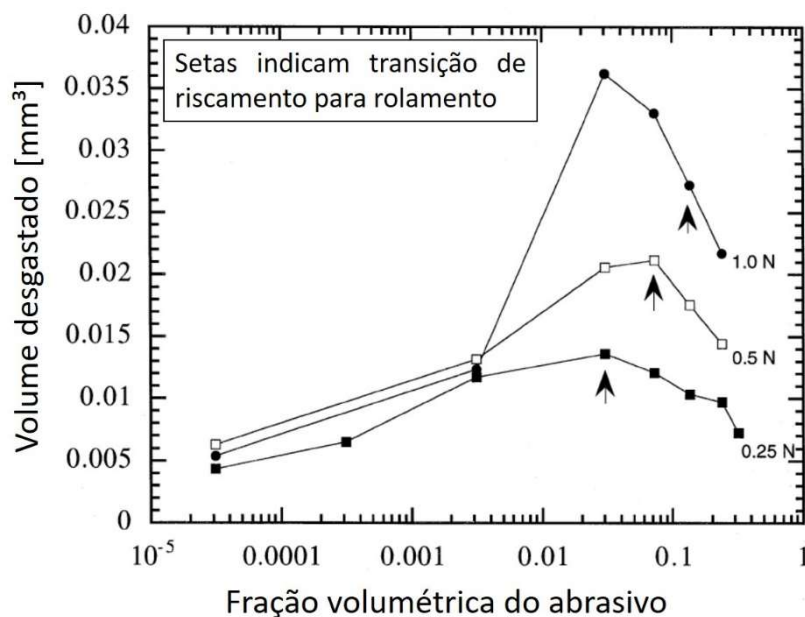


Figura 15 - Variação do volume desgastado após 30 m deslizados em função da fração volumétrica de abrasivos. Amostra de aço ferramenta e abrasivo de F1200 SiC (TREZONA *et al.*, 1999).

Para baixas concentrações abrasivas, alta carga por partícula, o volume desgastado foi praticamente independente da carga. Existe um limite em que a carga aplicada a cada partícula é tão alta que acabam incrustando-se totalmente na amostra e/ou na esfera, fazendo com que qualquer carga adicional seja suportada pelo filme hidrodinâmico ou pelas asperezas da superfície do corpo e contra corpo. Para que ocorra o aumento do volume desgastado, é necessário um aumento no número de abrasivos atuantes e, então, torna-se possível observar o aumento do volume de desgaste com o incremento da carga normal. As setas (Figura 15) indicam, no geral, o momento de transição, onde as partículas começam a rolar, devido a diminuição da carga por partícula, diminuindo o desgaste (TREZONA *et al.*, 1999).

A pressão de contato durante o ensaio, também, influencia na transição entre os micromecanismos. Cozza *et al.* (2007) utilizando relação para a severidade do ensaio ($S_{\text{ensaio}} = Pv$, onde P é a pressão de contato dada pela relação entre a carga normal aplicada pela área da superfície esférica e v é a velocidade de deslizamento) e mantendo carga constante, observaram uma diminuição da severidade, visto que a evolução do ensaio resulta em um aumento da área de contato, diminuindo a pressão.

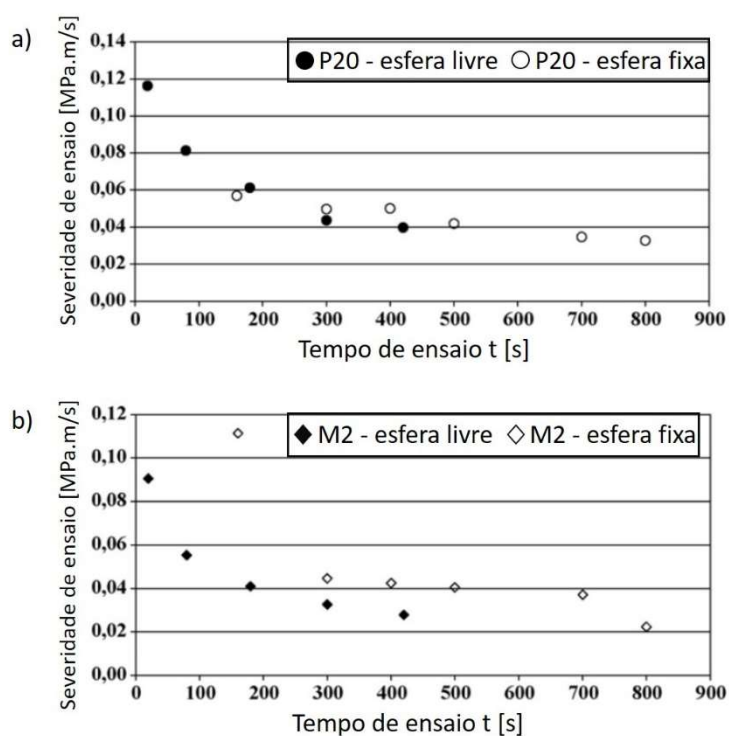


Figura 16 - Evolução da severidade de ensaio em função do tempo de ensaio. Os ensaios foram conduzidos em a) metal duro ISO P20 e b) aço ferramenta M2, nas configurações esfera livre e fixa (COZZA *et al.*, 2007).

No contato inicial, a pressão é maior, indicando mecanismo de riscamento, com a diminuição progressiva da severidade, as partículas tendem a rolar, como foi visto por Gomez *et al.* (2015), Figura 17. Portanto, para baixas pressões de contato, é alta tendência de ocorrer rolamento puro das partículas.

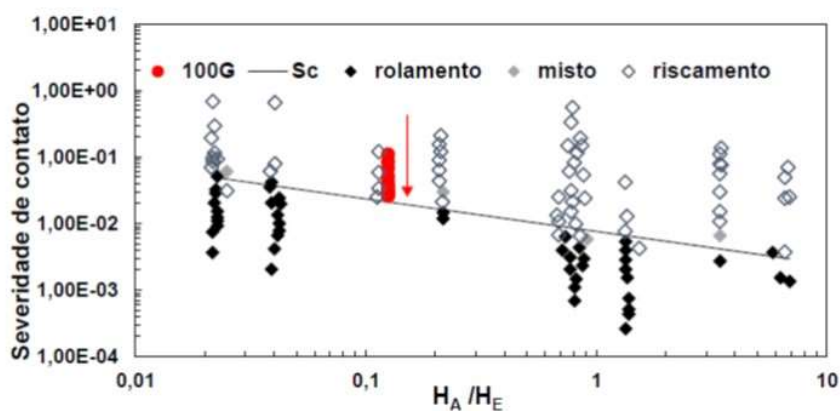


Figura 17 - Análise da evolução da severidade de contato, mostrando a diminuição da severidade durante o ensaio, tendendo ao rolamento, segundo mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003) (GOMEZ *et al.*, 2015).

Seguindo o modelo de Williams e Hyncica (1992), outros parâmetros importantes a serem considerados são as características das partículas abrasivas (TREZONA *et al.*, 1999). Imbeni *et al.* (2003) investigaram o efeito do tamanho, angulosidade e dureza dos abrasivos. Tanto o tamanho como a angulosidade influenciaram na taxa de desgaste, Partículas mais angulosas forneceram maior taxa de desgaste. Um outro aspecto, também, avaliado pelos pesquisadores foi a condição superficial das calotas de desgaste. O aumento do tamanho das partículas abrasivas e a diminuição do fator de arredondamento, proporcionam superfícies desgastadas com maior rugosidade. Superfícies mais lisas e homogêneas são obtidas com o uso de partículas menores e mais arredondadas.

Imbeni *et al.* (2003) garantiram o mecanismo de rolamento, que era o desejado pelos pesquisadores, segundo os mapas de desgaste de Trezona *et al.* (1999). Foi limitado um valor baixo de carga normal e uma maior concentração abrasiva, resultando em baixas cargas por partículas. Porém, para abrasivos de SiO_2 , não foram encontradas condições onde apresentassem apenas rolamento. As partículas mostraram uma larga distribuição de tamanho (Figura 19), resultando no modo misto de retirada de material, riscamento no centro e rolamento nas laterais da calota. Portanto, para gerar uma superfície de desgaste uniforme é necessário garantir que não haja uma grande distribuição no tamanho de partícula (IMBENI *et al.*, 2003).

Gava *et al.* (2013), ao estudarem microabrasão em materiais compósitos, também, observaram que uma larga distribuição do tamanho de partícula causa uma alteração no micromecanismos de desgaste, encontrando modo misto de desgaste.

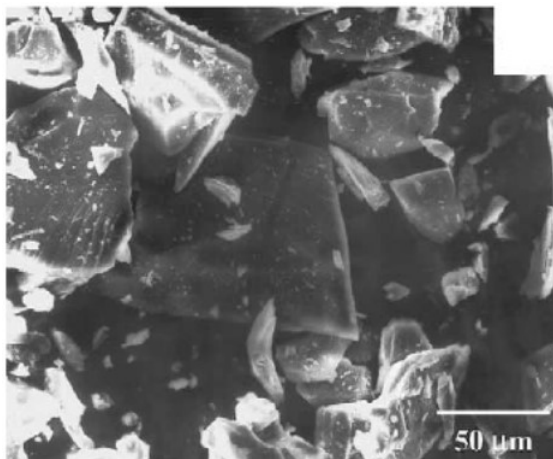


Figura 18 - Imagem de MEV das partículas abrasivas de SiO_2 com tamanho médio de 50 μm (IMBENI *et al.*, 2003).

Para melhor entender, Gomez *et al.*, em 2015, estudaram efetivamente o efeito da distribuição do tamanho das partículas na taxa de desgaste e no micromecanismo. Para isso, foram misturados dois pós abrasivos de carbeto de silício com tamanho médio de 2,11 μm (denominado, 0G) e 6,57 μm (denominado, 100G). As distribuições são mostradas na Figura 19.

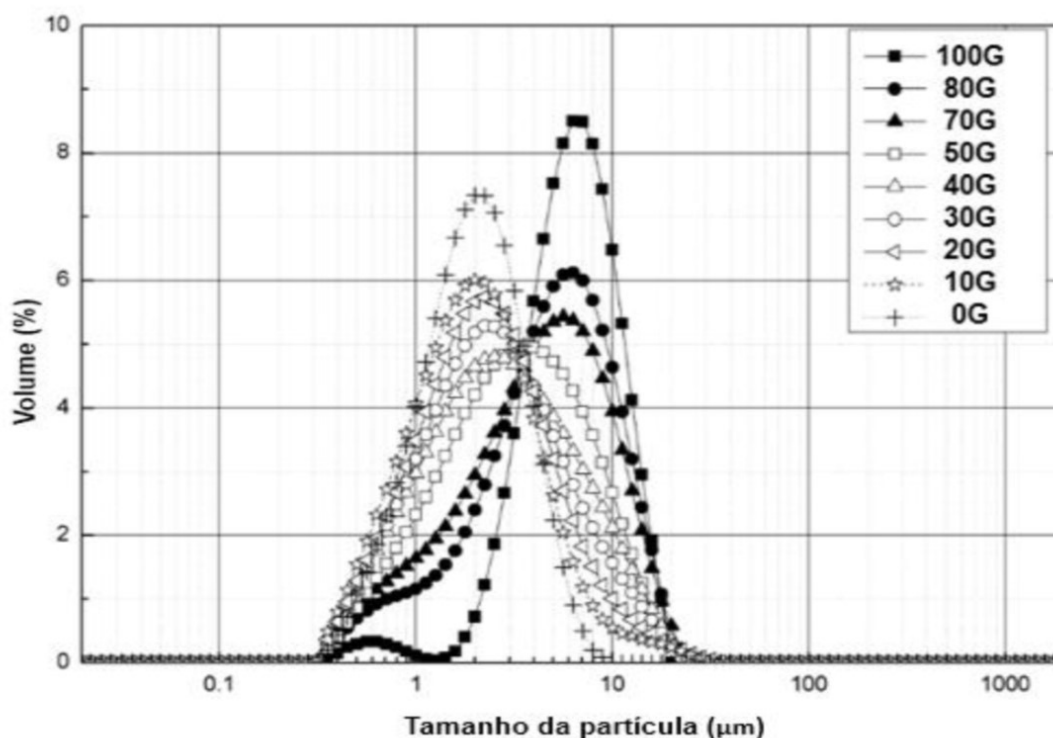


Figura 19 - Distribuição de tamanho das partículas dos diferentes pós de SiC (0 G e 100 G) (GOMEZ *et al.*, 2015).

Os ensaios de microabrasão foram realizados com duas cargas (0,2 N e 0,4 N) em uma amostra de aço AISI 1020 contra uma esfera de aço martensítico AISI 52100, com diâmetro de 25,4 mm. O resultado dos coeficientes de desgaste pela porcentagem em massa do abrasivo de maior tamanho (100G) é dado pela Figura 20.

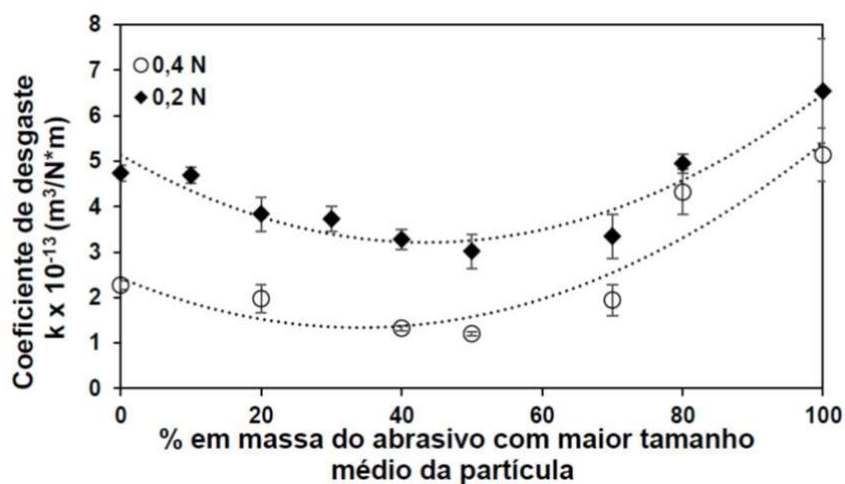


Figura 20 - Comportamento do coeficiente de desgaste em função da fração mássica do abrasivo maior (100 G) na lama abrasiva (GOMEZ *et al.*, 2015).

Menores coeficientes de desgaste foram obtidos quando a solução abrasiva foi composta por 50% dos abrasivos grandes (100G) e 50% de abrasivos pequenos (0G). Justificado pelo fato de as partículas maiores sustentarem o contato inicial, quando existem apenas 10 % de partículas grandes no contato, a carga aplicada nas partículas grandes será maior, fazendo com que indentem mais na amostra e na esfera, diminuindo a distância de separação até o tamanho das partículas em maior quantidade (0G). Portanto, até que se tenha um equilíbrio entre a quantidade de abrasivo grande e pequeno, caso de 50%, as partículas pequenas (0G), que são as efetivas no contato, diminuem, reduzindo, também, o desgaste. Em 50 %, as partículas grandes suportam a carga e passam a ser efetivas no contato, fazendo com que o desgaste aumente conforme a fração de partículas grandes é aumentada.

O volume desgastado foi relacionado com a fração volumétrica de partículas atuantes, sendo possível observar que o volume desgastado para partículas ativas correspondentes às frações volumétricas do abrasivo pequeno (0G a 50G) foi independente da carga, já para partículas ativas correspondentes às frações volumétricas do abrasivo grande (50G a 100G) o volume de desgaste aumentou significativamente com o aumento da carga, resultado que já havia sido observado por Trezona *et al.* (1999).

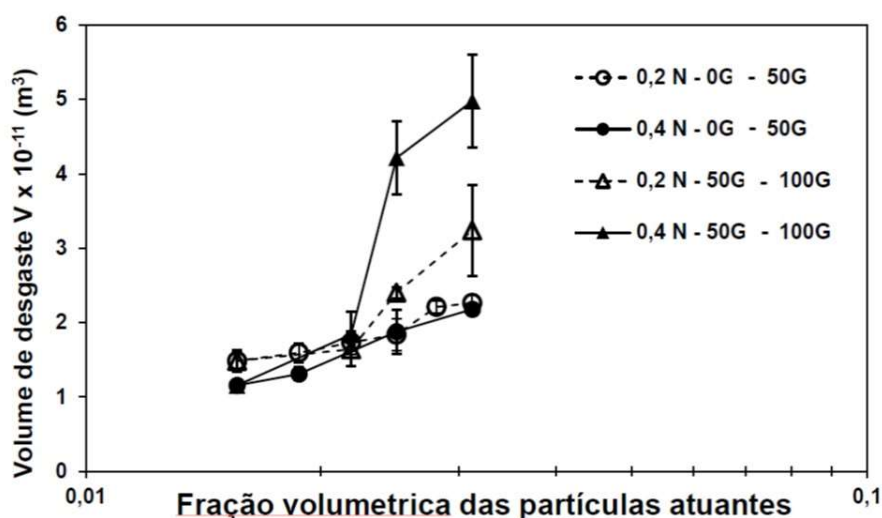


Figura 21 - Comportamento do volume desgastado em função da fração mássica das partículas efetivas no contato (GOMEZ *et al.*, 2015).

Os micromecanismos encontrados foram riscamento com rolamento entre os riscos, para todas as condições, como mostra a Figura 22. Cozza (2014) sugere que o regime, onde existe a sinergia entre o rolamento de partículas pequenas e riscos formados por abrasivos maiores, seja chamado de abrasão por microrolamento. Esse mesmo aspecto da superfície desgastada foi mostrado por Imbeni *et al.* (2003), quando as partículas abrasivas tinham uma larga distribuição de tamanho.

Em resumo, pelas referências citadas, a dinâmica e eficiência do abrasivo no contato é basicamente dependente de fatores como:

- Condição superficial da esfera
- Relação de dureza entra amostra e esfera
- Carga por partícula
- Angulosidade, tamanho e distribuição granulométrica dos abrasivos

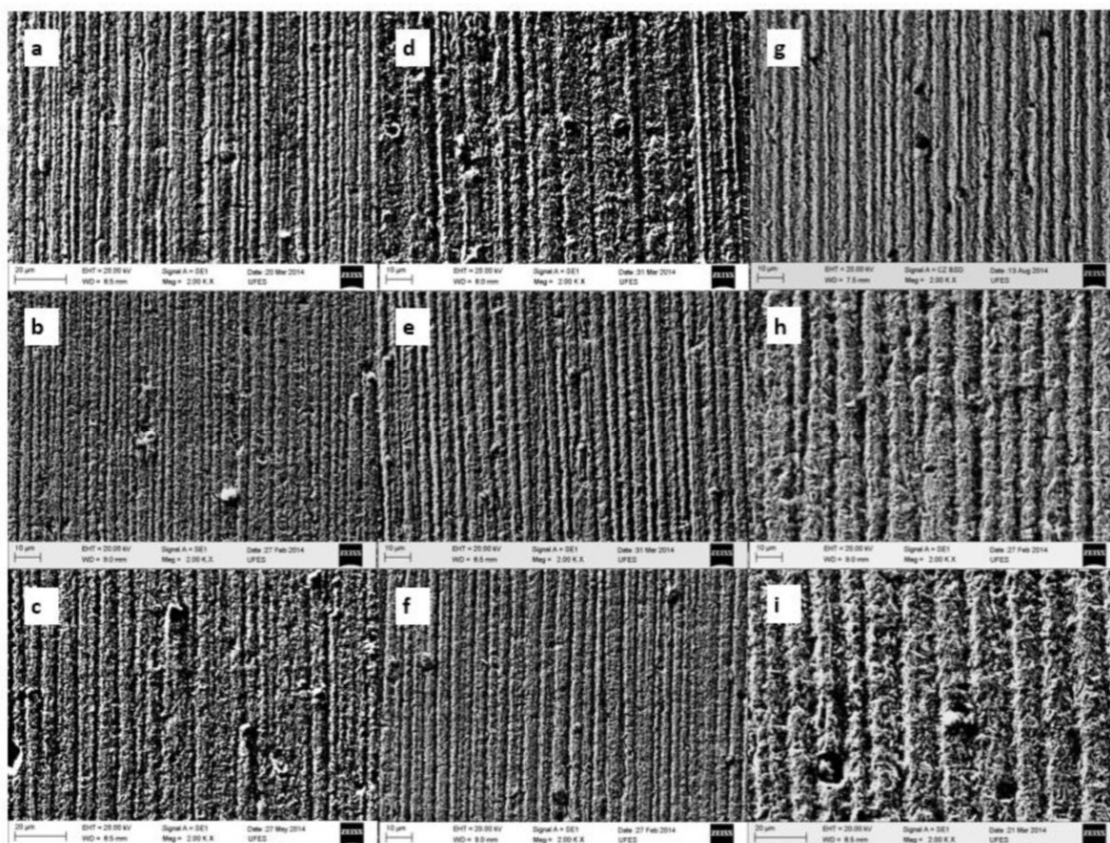


Figura 22 - Imagens de MEV, detector secundário, 2000X, das crateras de desgaste correspondentes aos ensaios realizados com cada fração mássica do abrasivo com o maior tamanho médio da partícula para a condição da carga normal de 0,2 N a) 0G; b) 10G; c) 20G; d) 30G; e) 40G; f) 50G; g) 70G; h) 80G; i) 100G (GOMEZ *et al.*, 2015).

2.7.1 Influência da Velocidade

Na literatura, alguns trabalhos são encontrados sobre o efeito da velocidade de rotação da esfera, sugerindo que ocorre uma influência no atrito entre a esfera e as partículas abrasivas.

Rutherford e Hutchings (1996), observaram que o aumento da velocidade do contra corpo influencia na espessura de um filme hidrodinâmico, formado pela lama abrasiva e, combinado com o efeito do tamanho da partícula abrasiva, pode levar a uma diminuição do volume desgastado.

O cálculo da espessura do filme hidrodinâmico é feito por meio da equação de Reynolds em duas dimensões, para uma esfera de raio R deslizando contra um plano, na presença de um fluido de viscosidade η , com uma carga normal aplicada W (RUTHERFORD e HUTCHINGS, 1996):

$$h_0 = 2R^3 \left(\frac{6\pi U \eta}{5W^2} \right) \quad (\text{eq. 20})$$

Onde U é a velocidade tangencial e h_0 a espessura do filme.

A Figura 23 mostra o coeficiente de desgaste em função da razão entre a espessura do filme hidrodinâmico e o tamanho médio da partícula abrasiva, para diferentes velocidades. Os ensaios foram realizados na configuração de ensaio esfera livre, com amostras de vidro, utilizando uma suspensão de carbeto de silício em glicerol, que possui viscosidade maior do que a água.

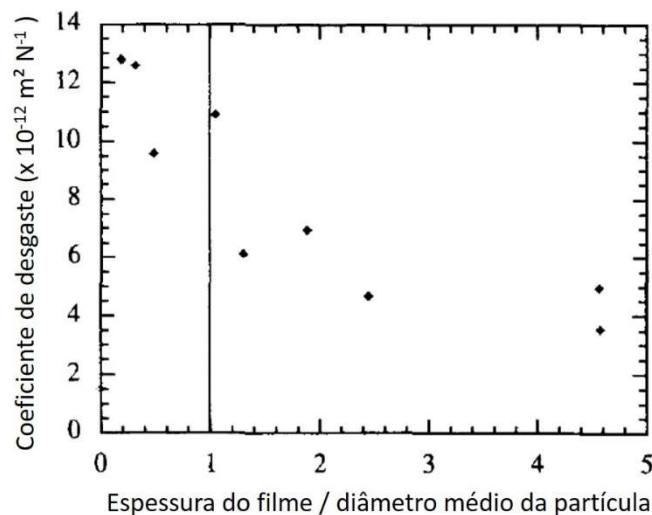


Figura 23 - Coeficiente de desgaste para vidro determinado com uma suspensão abrasiva de carbeto de silício em glicerol variando a velocidade de deslizamento (RUTHERFORD e HUTCHINGS, 1996).

O resultado sugere que a influência no coeficiente de desgaste ocorre quando a espessura do filme ultrapassa o tamanho médio da partícula abrasiva. Isso indica que existe um valor de viscosidade crítico e, abaixo dele, toda carga aplicada é suportada pelas partículas abrasivas. Além disso, foi considerado, também, que a entrada de partículas no contato deve ocorrer por um processo diferente de arrastamento na presença de uma camada hidrodinâmica. Contudo, os valores de espessura do filme hidrodinâmico são muito menores do que o tamanho médio das partículas abrasivas, sugerindo que, na prática, não ocorre a influência da espessura de filme.

Gee *et al.* (2003) afirmaram, em seu trabalho para padronizar o ensaio microabrasivo, que há influência da velocidade de rotação. Porém, não encontraram evidências

claras de como o filme lubrifica os contatos entre a esfera, a partícula abrasiva e a amostra.

Para os ensaios de microabrasão realizados na configuração esfera livre, Bethke e Schiffmann *apud* Gee *et al.* (2003) mostraram que o volume desgastado decresceu com o aumento da velocidade e justificaram que tal resultado ocorreu devido ao aumento da tendência da esfera escorregar no eixo, quando aumenta-se a velocidade.

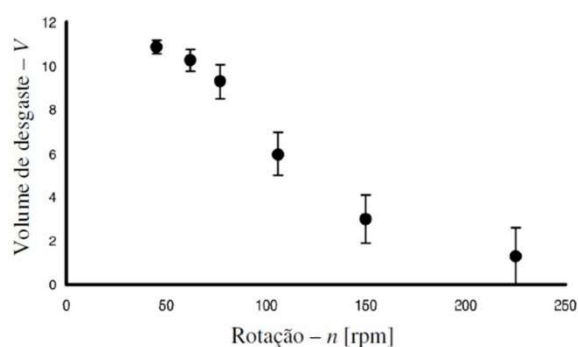


Figura 24 - Volume de desgaste em função da variação da rotação da esfera de ensaio. Revestimento de DLC e partículas de diamante (BETHKE e SCHIFFMANN *apud* GEE *et al.*, 2003).

Allsopp *apud* Gee *et al.* (2003) realizou ensaio de microabrasão na configuração esfera fixa para corpo de prova de aço-ferramenta e, segundo o autor, encontrou que o volume desgastado é independente da velocidade.

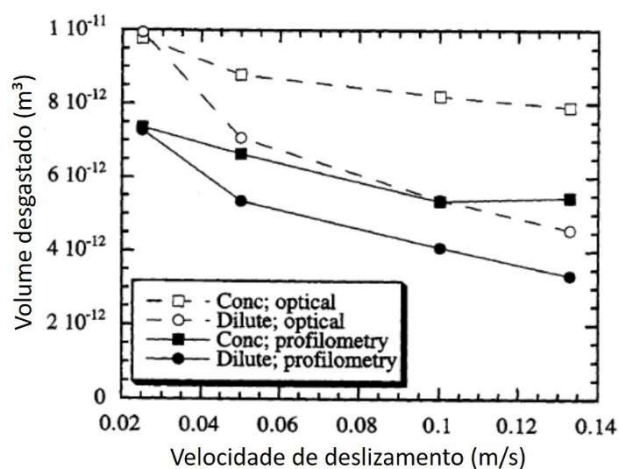


Figura 25 - Volume desgastado em função da variação da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio. Corpo de prova de aço-ferramenta e partículas abrasivas de carbeto de silício (ALLSOPP *apud* GEE *et al.*, 2003).

Bello e Wood (2003) realizaram um estudo sobre o comportamento tribológico de revestimentos de poliamida 11 e, dentre os parâmetros que foram variados, encontra-se a velocidade. Para as condições estudadas pelos pesquisadores, o aumento da velocidade gerou um comportamento complexo do coeficiente de desgaste, que ora aumentou com o aumento da velocidade e ora diminuiu. A justificativa dos autores é que o aumento da velocidade pode gerar um filme hidrodinâmico entre a esfera e o revestimento e resultar no comportamento observado, como já havia sido mostrado.

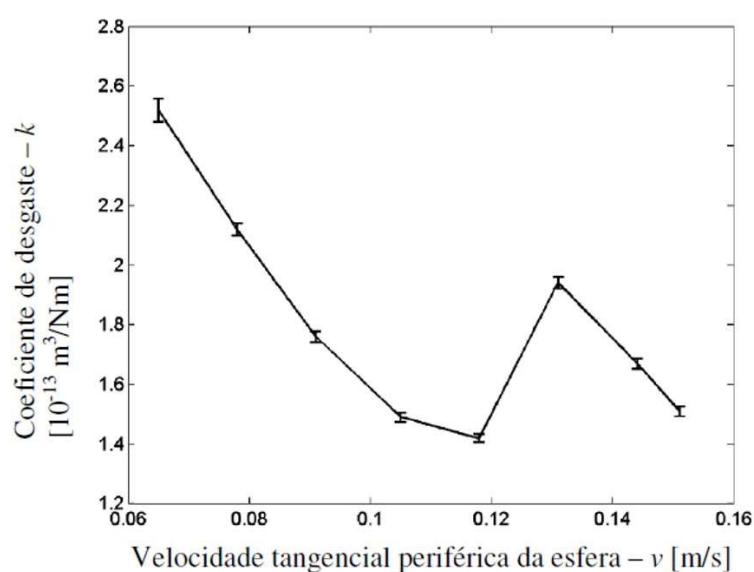


Figura 26 - Comportamento do coeficiente de desgaste em função da variação da velocidade periférica da esfera de ensaio (BELLO e WOOD, 2003).

Ainda foi sugerido, pelos autores acima, que pode ocorrer uma mudança no micromecanismo de desgaste quando o ensaio alcança uma velocidade crítica, por isso teria um aumento rápido do desgaste e, logo após, um decaimento. Porém, os autores não encontraram evidências da mudança dos mecanismos. Em uma análise das calotas de desgaste, foi observado um aumento no número de abrasivos incrustados na amostra, como mostra Figura 27.

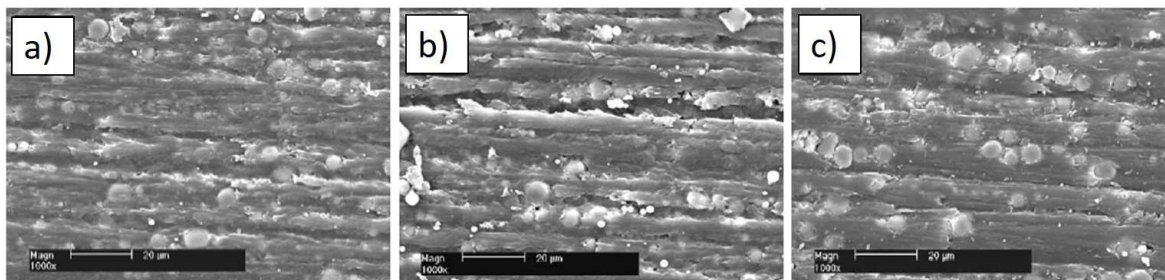


Figura 27 - Incrustação de partículas abrasivas para diferentes valores de velocidade a) 0,12 m/s b) 0,13 m/s e c) 0,143 m/s. $N = 6N$ e $S = 100\text{ m}$ (BELLO e WOOD, 2003).

Em resumo, não foi encontrado um estudo aprofundado sobre a velocidade de rotação da esfera. Não sendo encontrado referências conclusivas sobre a influência na taxa e no micromecanismo de desgaste.

2.8 PROBLEMAS ASSOCIADOS À MEDIÇÃO DA CALOTA

2.8.1 Scuffing

O *scuffing* consiste na formação de uma borda difusa na cratera de desgaste, muito difícil de ser detectada por microscópio óptico, que conduz a uma medição errônea do diâmetro da calota. Foi encontrado por Trezona e Hutchings (1999) quando investigavam o uso de materiais macios no ensaio de microabrasão.

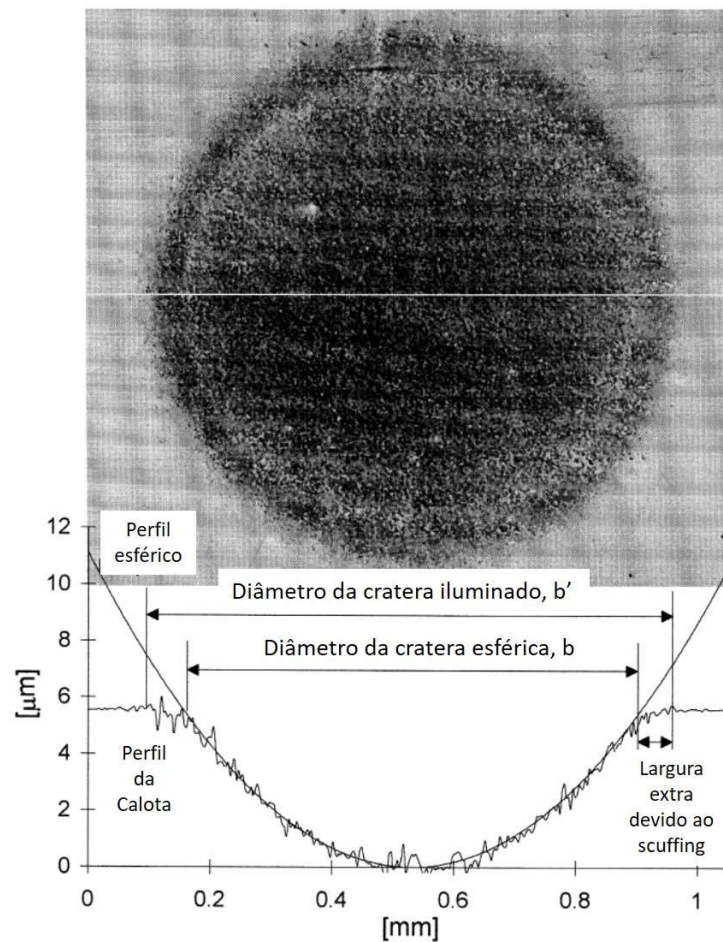


Figura 28 - MEV e perfilometria ótica na calota de alumínio (TREZONA e HUTCHINGS, 1999).

Foi proposto uma correção do diâmetro baseada na relação entre esfera/abrasivo na amostra. Se o processo de formação da borda difusa foi o mesmo encontrado na calota, é preciso considerar a borda, caso contrário, deve-se analisar o tamanho do diâmetro b' . Calotas maiores do que 2,2 mm não apresentaram *scuffing*, o aumento do tamanho da calota diminui a borda difusa, para crateras entre 0,5 e 2,2 mm, a correção é dada pela Equação 21 (TREZONA e HUTCHINGS, 1999):

$$b = \frac{(b' - 0,1407 \text{ mm})}{0,9358} \quad (\text{Eq. 21})$$

O *scuffing* ocorre apenas quando a amostra é mais macia do que a esfera, podendo ser causado por uma indentação significativa dos abrasivos na amostra, diminuindo a distância de separação (a), indicada na Figura 29, ou por partículas maiores do que o tamanho médio.

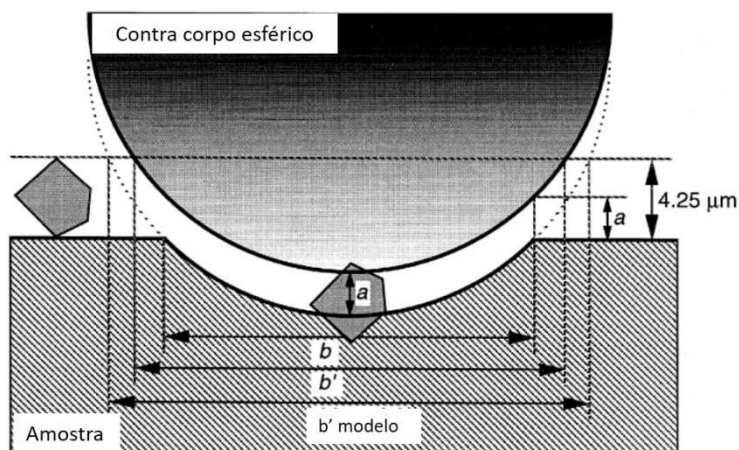


Figura 29 - Diagrama esquemático mostrando o arrastamento da partícula e vários diâmetros no ensaio de microabrasão. Diâmetro médio da partícula assumido como 4,25 μm (TREZONA e HUTCHINGS, 1999).

Kelly e Hutchings (2001) sugeriram que o scuffing nada mais é do que a dificuldade de partículas maiores entrarem imediatamente no contato, enquanto as partículas menores entram, as grandes ficam indentando a entrada, causando uma borda difusa até que consigam entrar.

2.8.2 Ridge

O fenômeno do *ridge surge* surge quando os abrasivos não suportam a carga normal aplicada, sendo sustentada pelas protuberâncias da amostra e esfera ou pelo filme hidrodinâmico, podendo haver contato entre material da amostra e esfera, Figura 30. A causa pode ser pelas partículas tornarem-se totalmente engastadas na amostra e/ou no contra corpo ou, até mesmo, por não conseguirem entrar na região de contato devido à alta pressão ou devido à falta de rugosidade na esfera.

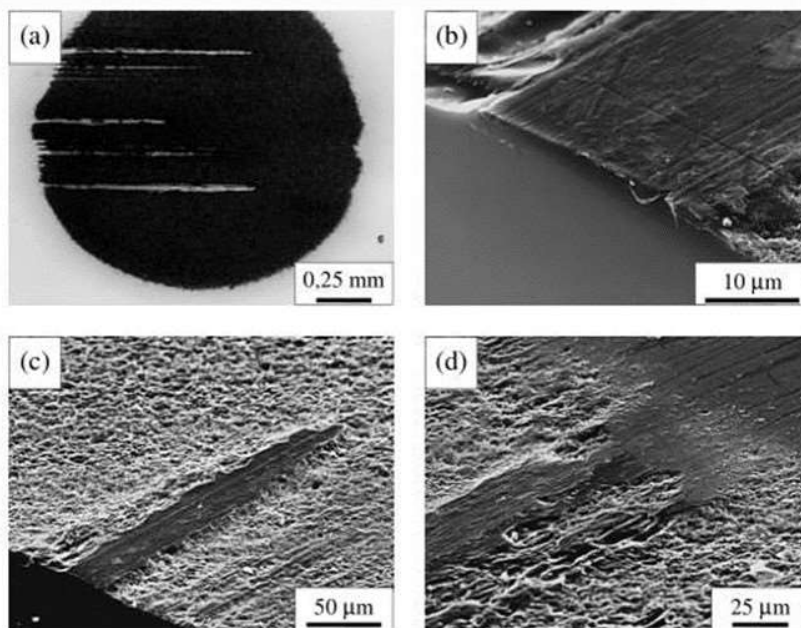


Figura 30 - a) Atuação de ridge em uma cratera de desgaste, b) seção transversal da amostra com ridge, c) desgaste abrasivo por rolamento ao redor do ridge e d) saída da cratera de desgaste (SHIPWAY, 1999).

Por consequência, o volume desgastado não pode ser medido por meio do microscópio óptico e o ensaio possui baixa repetibilidade. Alguns parâmetros de ensaio podem conduzir ao *ridge*, tal como carga elevada, baixa concentração de abrasivos, dureza da amostra e condição superficial da esfera, como visto na Figura 31 (TREZONA e HUTCHINGS, 1999).

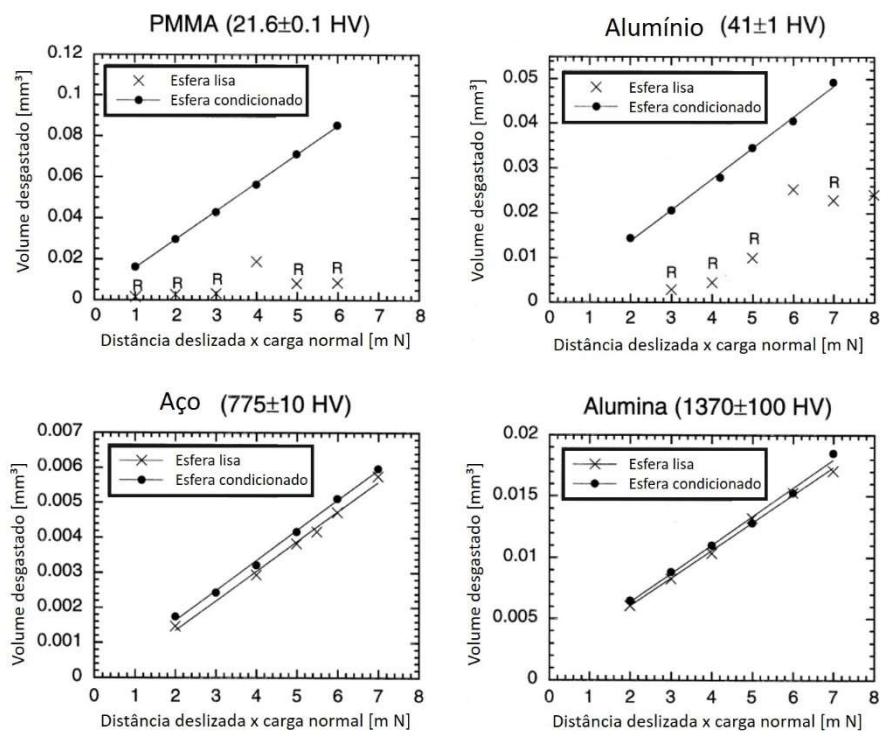


Figura 31 - Volume desgastado em função do produto da carga normal (0,25 N) pela distância deslizada para amostras de PMMA, alumínio, aço ferramenta e alumina; os volumes foram obtidos utilizando esferas de aço com superfícies lisas e superfícies condicionadas. Os pontos onde obteve-se *ridge* estão marcados com 'R' (TREZONA e HUTCHINGS, 1999).

Nos ensaios realizados por Trezona *et al.* (1999), foi observado que para amostras macias, o não condicionamento da esfera conduziu a formação de *ridge* e, para materiais com dureza elevada, a rugosidade do contra corpo não influenciou no volume desgastado.

2.8.3 Pile-up

Caracteriza-se pelo acúmulo de material ao redor da cratera, proveniente da deformação plástica de amostras macias. Segundo Schiffmann *et al.* (2005), *pile-up* foi observado em amostras com dureza muito inferior ao contra corpo.

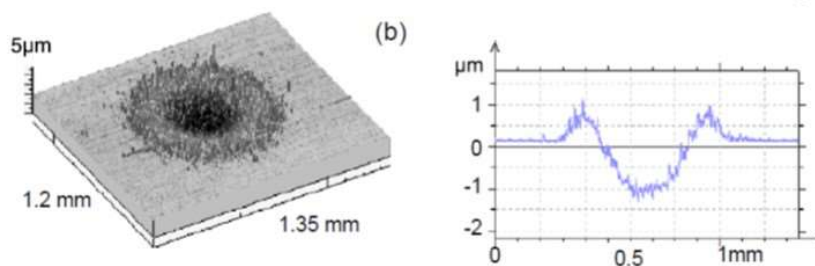


Figura 32 - Superfície em 3D e corte da seção transversal da cratera de desgaste com formação de *pile-up* (SCHIFFMANN *et al.*, 2005).

A dificuldade em identificar a verdadeira borda da calota gera uma superestimação dos valores dos coeficientes de desgaste, quando observados por microscopia óptica. Nesse caso, o volume desgastado é melhor observado por meio da perfilometria, onde os erros são reduzidos (SCHIFFMANN *et al.*, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Amostras

As amostras utilizadas foram de aço AISI 1020 (148 ± 7 HV), sendo escolhido por ser um material homogêneo e amplamente conhecido, com a finalidade de não comprometer o objetivo deste trabalho. Os corpos de prova foram cortados nas dimensões de 30 x 30 x 20 mm, em uma cortadeira metalográfica LABOTOM-3 de fabricação Struers, no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

As superfícies a serem ensaiadas foram preparadas com lixas de carbetto de silício na sequência granulométrica de: 80, 180, 220, 320, 500, 800 e 1200# e polidas em soluções de alumina (Al_2O_3) com tamanho de: 1 e 0,3 μm .

Após a preparação metalográfica, os corpos de prova foram identificados, limpos e acondicionados.

3.1.2 Esferas

Foram utilizados contra corpos esféricos de borracha poliuretano (80-100 shore A), aço inoxidável austenítico AISI 304 (300 ± 14 HV), aço martensítico AISI 52100 (938 ± 49 HV) e Zircônia-Alumina (1519 ± 61 HV) com diâmetros de 25,4 mm.

3.1.3 Abrasivo

3.1.3.1 Distribuição granulométrica

O abrasivo utilizado para a variação da distribuição granulométrica foi o carbetto de silício (SiC) (2300 – 2600 HV) fornecido pela empresa Saint Gobain Brasil. Com a

finalidade de obter diferentes distribuições granulométricas, as partículas de SiC (codificadas JIS 1200 e JIS 3000) foram misturadas, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Porcentagem em massa de abrasivos grandes (G) e pequenos (P) utilizados nas misturas.

| Mistura (nomenclatura) | Abrasivo G (JIS 1200) % | Abrasivo P (JIS 3000) % |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0 G | 0 | 100 |
| 20 G | 20 | 80 |
| 50 G | 50 | 50 |
| 80 G | 80 | 20 |
| 100 G | 100 | 0 |

3.1.3.2 Procedimento de Mistura das Partículas Duras

As misturas foram realizadas no laboratório de Farmacotécnica da UFES. Os pós foram pesados em uma balança semi-analítica e, com o auxílio de um gral e um pistilo de porcelana, misturados por intermédio da técnica de diluição geométrica (FERREIRA e BRANDÃO, 2008) para garantir maior homogeneidade.

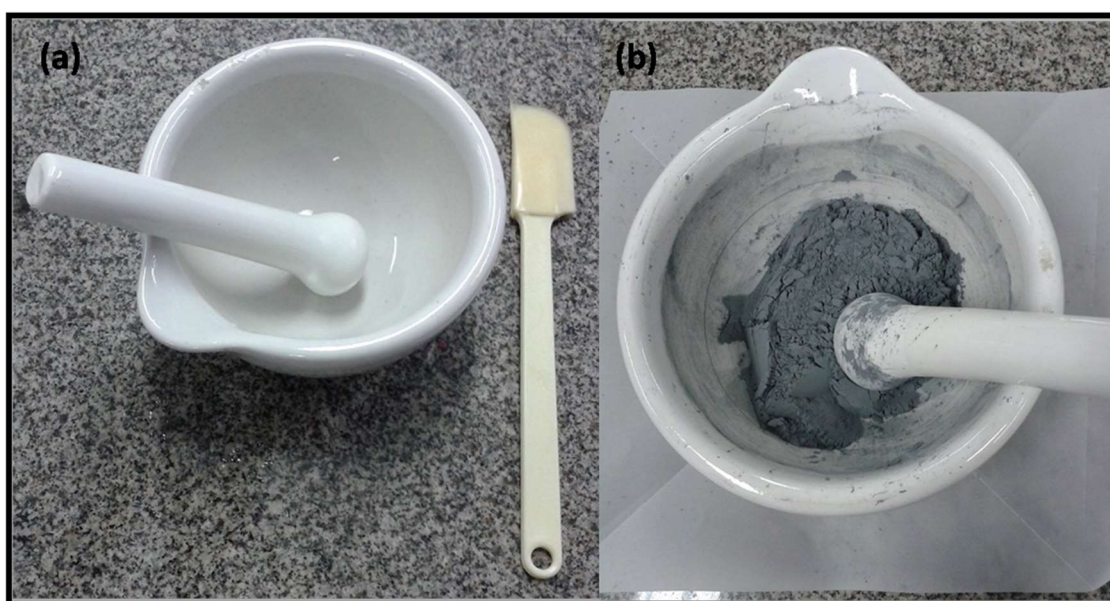


Figura 33 – a) gral e pistilo de porcelana e b) misturas pela técnica de diluição geométrica (FERREIRA e BRANDÃO, 2008).

3.1.3.3 Velocidade de rotação

Para os ensaios variando a velocidade, foram utilizados, sem misturar, outros dois pós de carbeto de silício, utilizados anteriormente por Gomez *et al.* (2015), com tamanhos médios de partículas de 2,11 μm (denominado A) e 6,57 μm (denominado B).

3.1.4 Análise da distribuição das partículas abrasivas

As distribuições do tamanho das partículas dos pós puros e das as misturas foram caracterizadas por um analisador a laser (faixa útil: 0,02 a 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 - Poli-USP.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ensaio Microabrasão

Os ensaios foram realizados, seguindo uma matriz de experimentos formada por uma sequência aleatória de ensaios, em um micro-abrasômetro TE 66 de fabricação Plint and Partners pertencente ao Laboratório TRICORRMAT da UFES.

O primeiro passo estabelecido foi a limpeza da amostra com acetona, realizada em um limpador ultrassônico, pelo tempo de 10 minutos. Depois, os contra corpos foram condicionados de acordo com a Tabela 2 e, logo após, levados ao limpador ultrassônico imersos em acetona por 10 minutos.

Tabela 2 - Rotina de condicionamento superficial das esferas de diferentes materiais.

| Material da esfera | Tipo de condicionamento superficial |
|-----------------------------|--|
| Borracha Poliuretano | Não condicionada antes dos ensaios |
| Aço inoxidável AISI 304 | Movimentos circulares sobre superfície áspera de poliuretano |
| Aço Martensítico AISI 52100 | Agitada em solução de água e areia |
| Zircônia-Alumina | Não condicionada antes dos ensaios |

Os ensaios foram divididos em três conjuntos:

I. Parâmetros utilizados em ensaios com diferente distribuição do tamanho abrasivo e diferentes contra corpos, Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros dos ensaios com diferente distribuição do tamanho abrasivo e contra corpos.

| | |
|---|--|
| Distância deslizada total | 239,39 m |
| Velocidade angular da esfera | 80 rpm |
| Carga normal | 0,2 e 0,4 N |
| Concentração da solução abrasiva | 0,1 g/cm ³ |
| Taxa de gotejamento | 1 gota a cada 3 segundos |
| Material do contra corpo | Borracha Poliuretano, Aço inoxidável AISI 304, Aço Martensítico AISI 52100, Zircônia-Alumina |

II. Parâmetros utilizados em ensaios variando a velocidade angular da esfera de aço martensítico AISI 52100 mantendo a concentração da solução abrasiva constantes nos ensaios, Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros dos ensaios variando a velocidade angular da esfera de aço martensítico AISI 52100, mantendo a concentração da solução abrasiva constante nos ensaios.

| | |
|---|--------------------------|
| Distância deslizada total | 239,39 m |
| Velocidade angular da esfera | 40, 80 e 150 rpm |
| Carga normal | 0,2 e 0,4 N |
| Concentração da solução abrasiva | 0,1 g/cm ³ |
| Taxa de gotejamento | 1 gota a cada 3 segundos |

III. Parâmetros utilizados em ensaios variando a velocidade angular da esfera de aço martensítico AISI 52100 e a concentração de forma proporcional ao tempo de ensaio, Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados em ensaios variando a velocidade angular da esfera de aço martensítico AISI 52100 e a concentração de forma proporcional ao aumento do tempo de ensaio.

| | |
|----------------------------------|--------------------------|
| Distância deslizada total | 239,39 m |
| Carga normal | 0,2 e 0,4 N |
| Taxa de gotejamento | 1 gota a cada 3 segundos |

A concentração da solução abrasiva foi variada de forma proporcional ao tempo de ensaio, conforme Tabela 6 (ver seção 4.3).

Tabela 6 – Variação da concentração da solução abrasiva com o tempo de ensaio.

| Velocidade (rpm) | Concentração da lama abrasiva (g/cm³) | Tempo total de ensaio (min) |
|-------------------------|---|------------------------------------|
| 40 | 0,1 | 75 |
| 80 | 0,2 | 37,5 |
| 150 | 0,38 | 20 |

Rotina geral de ensaios:

Para não ocorrer decantação do abrasivo na solução, implementou-se ao sistema um agitador magnético, onde a solução abrasiva permaneceu sendo agitada por 20

minutos antes de iniciar o ensaio, até terminá-lo. O gotejamento da lama abrasiva foi controlado através de uma bomba peristáltica e levado à região de contato por intermédio de uma mangueira.

O software Compend 2000 V2.23 foi responsável por controlar os parâmetros tais como a velocidade de rotação e o número de revoluções da esfera.

Para dar início ao ensaio, o corpo de prova foi posicionado no porta amostras e, mediante a um contra peso, o sistema foi equilibrado. Logo após, foi efetuada a fixação da esfera e adicionado ao tribossistema uma carga normal por meio de um peso morto.

Os ensaios foram interrompidos a cada 300 revoluções (23,93 m), totalizando 10 interrupções, e, com auxílio de um sistema de iluminação, lupa e os softwares Infinity Analyser®-v.4 e Capture®-v.4, mediu-se o diâmetro da calota de desgaste.

Com a Equação 4 e as medições feitas nas interrupções do ensaio, foi possível observar a evolução do coeficiente de desgaste com o tempo.

O ensaio evolui até atingir o regime permanente, observado pelos três últimos pontos de cada curva, coeficiente de desgaste com o tempo, para um erro relativo menor que 7%. Para cada condição, foram realizados no mínimo três ensaios aleatórios, o valor final do coeficiente de desgaste é dado pela média dos coeficientes em regime permanente.

3.2.2 Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

Para análises dos micromecanismos de desgaste, da superfície das esferas e dos pós abrasivos, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura - MEV modelo JSM-6010LA, JEOL BRASIL Instrumentos Científicos Ltda, pertencente ao Laboratório de Fenômenos de Superfície - LFS, da Poli-USP.

3.2.3 Analisador Topográfico

Para caracterizar a topografia da cratera de desgaste e obter um perfil transversal da região desgastada, passando pelo centro, foi utilizado o Analisador Topográfico 3D do fabricante TAYLOR HOBSON, modelo TALYSURF CCI v.8.7, do LFS, da Poli-USP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E MORFOLÓGICA DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS

As distribuições granulométricas das misturas abrasivas utilizadas no conjunto de ensaios I (Tabela 3) são mostradas na Figura 34.

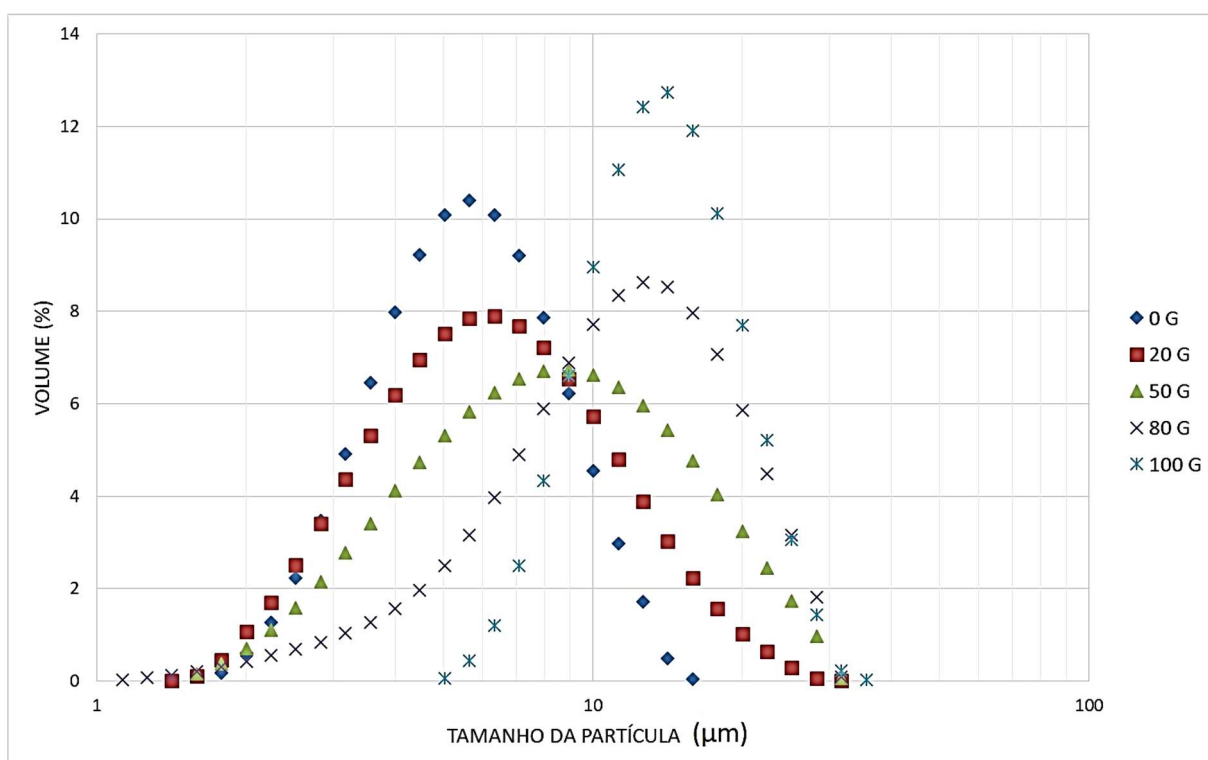


Figura 34 - Distribuição granulométrica das misturas abrasivas.

Na Tabela 7, encontram-se os valores dos diâmetros médios das partículas abrasivas das misturas e as larguras das distribuições.

Tabela 7 - Diâmetros médios das partículas abrasivas das misturas e as larguras das distribuições.

| Fração mássica de abrasivo grande (G) | Diâmetro médio da partícula (μm) | Largura da distribuição (μm) |
|---------------------------------------|---|---|
| 0G | 5,97 | 1,12 |
| 20G | 7,24 | 1,58 |
| 50G | 9,61 | 1,77 |
| 80G | 12,33 | 1,39 |
| 100G | 14,39 | 0,91 |

Para o conjunto de ensaios variando a velocidade (II e III), foram utilizados outros dois tamanhos de abrasivos de SiC, com distribuições granulométricas mostradas na Figura 35, e diâmetros médios e larguras de distribuição apresentados na Tabela 8 (GOMEZ *et al.*, 2015).

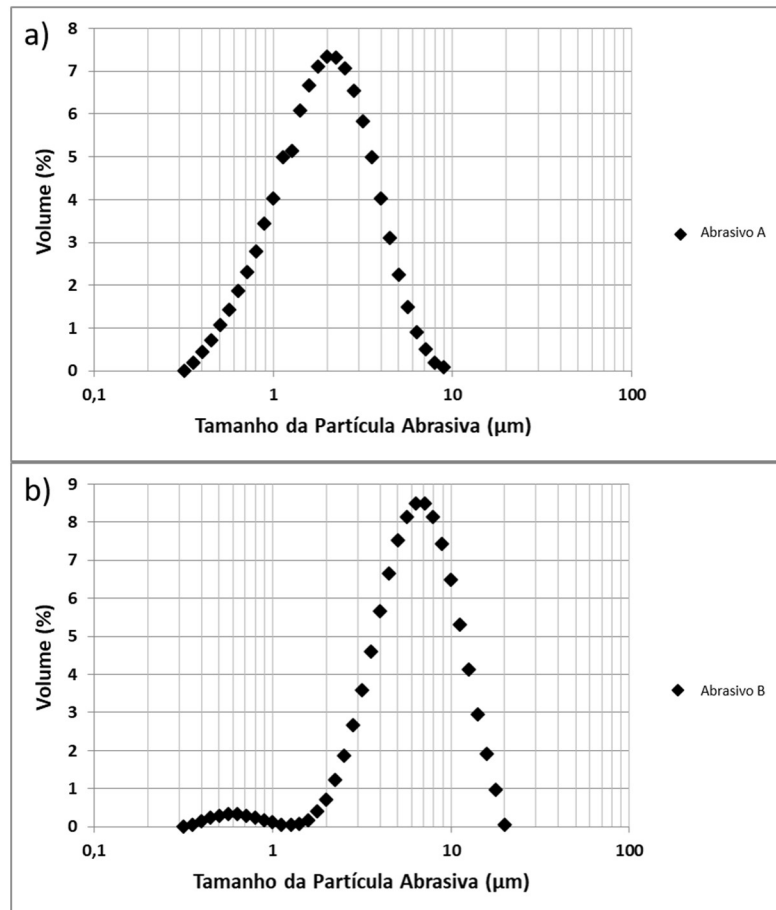


Figura 35 – Distribuição do pó a) pequeno (A) e b) grande (B).

É possível observar que o abrasivo B (Figura 35 - b) apresentou uma tendência bimodal.

Tabela 8 - Diâmetros médio e larguras da distribuição dos pós A e B.

| Abrasivo | Tamanho médio da partícula (μm) | Largura da distribuição (μm) |
|-----------------|--|---|
| Pequeno (A) | 2,11 | 1,66 |
| Grande (B) | 6,57 | 1,40 |

Além da caracterização através do analisador granulométrico a laser, foram realizadas imagens de MEV dos pós puros (0G e 100G) para observar a morfologia das partículas.

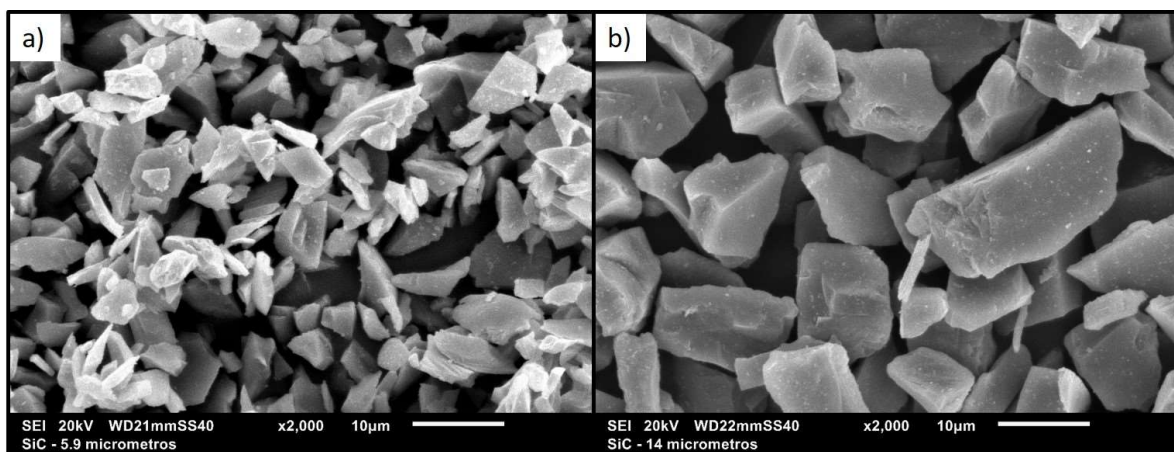


Figura 36 – Imagem de MEV dos abrasivos utilizados nos ensaios de variação da distribuição granulométrica, a) Pequeno (P) e b) Grande (G).

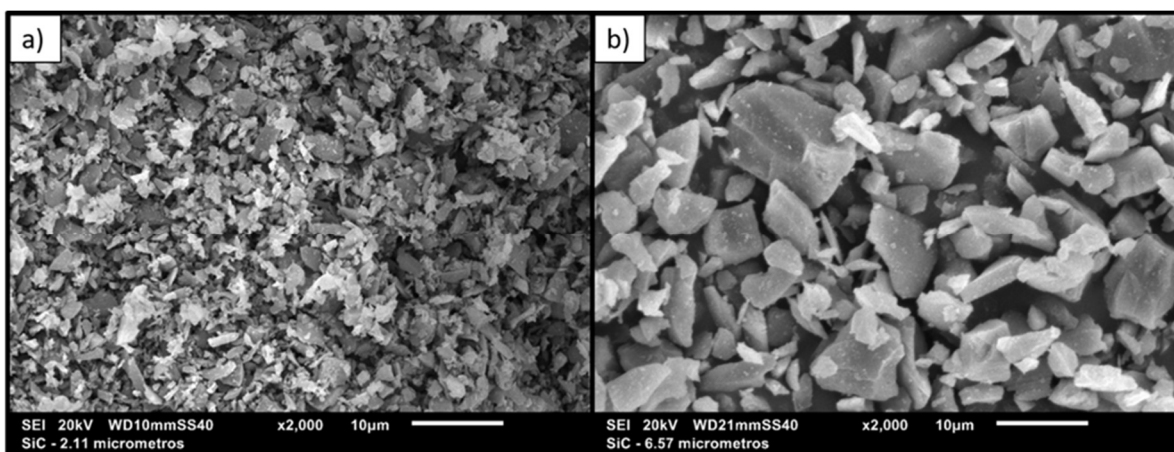


Figura 37 - Imagem de MEV dos abrasivos utilizados nos ensaios de variação velocidade do contra corpo, a) Pequeno (A) e b) Grande (B).

O cálculo do fator de esfericidade foi realizado através do software de domínio público imageJ, considerando cada pó abrasivo.

Tabela 9 – Fator de esfericidade dos pós abrasivos.

| Pós Abrasivos | Fator de Esfericidade |
|----------------------|------------------------------|
| 0G | 0,64 |
| 100G | 0,72 |
| A | 0,61 |
| B | 0,65 |

O abrasivo 100G apresentou maior fator de esfericidade em relação aos demais utilizados.

4.2 COEFICIENTES DE DESGASTE PARA ENSAIOS VARIANDO AS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS PARA DIFERENTES CONTRACORPOS

Os coeficientes de desgaste obtidos nos ensaios de microabrasão com diferentes contracorpos e distribuições granulométricas são mostrados nas Figura 38, para a carga de 0,2 N e, na Figura 39, para 0,4 N.

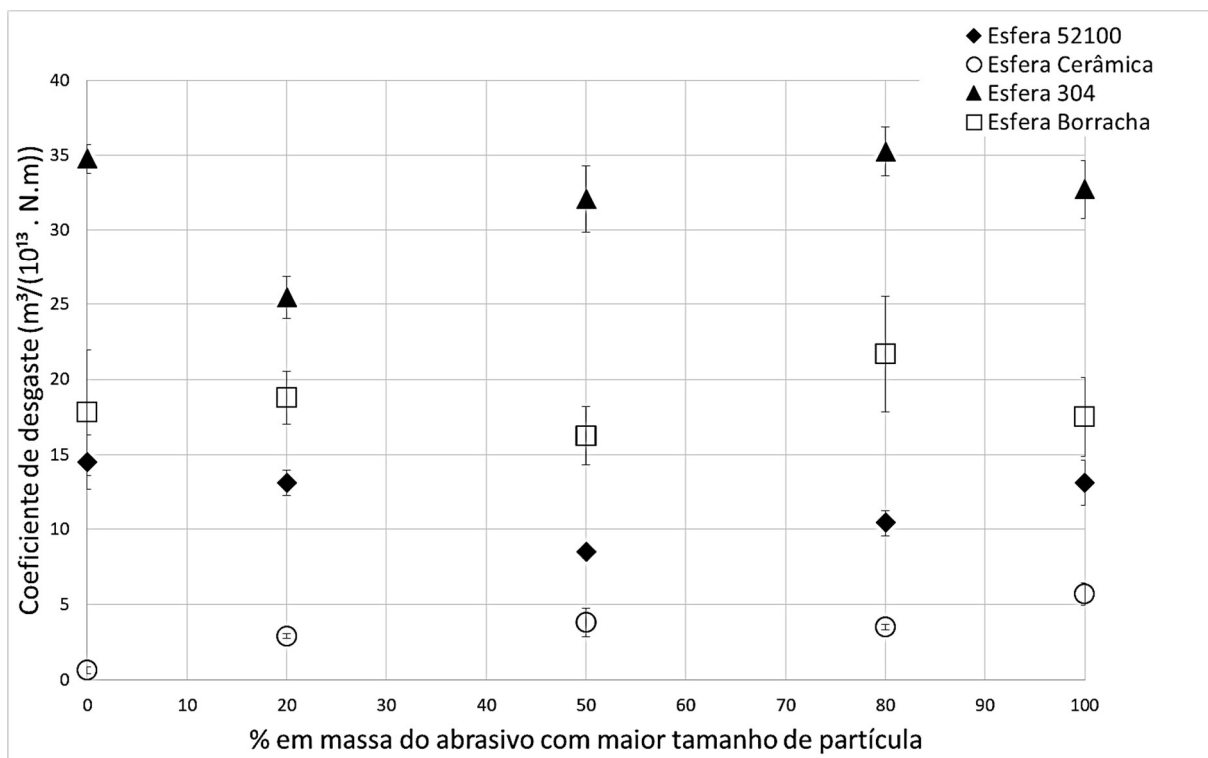


Figura 38 – Coeficientes de desgaste em função da fração mássica com maior tamanho (G), para carga de 0,2 N.

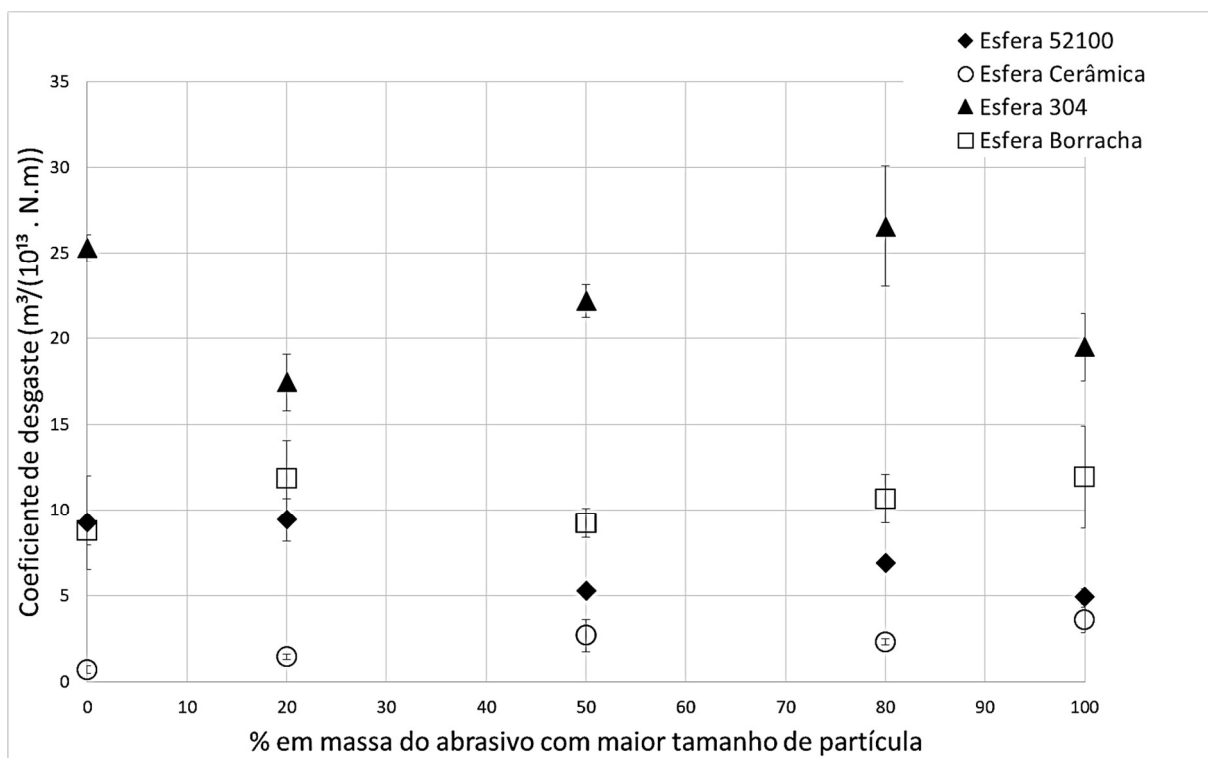


Figura 39 - Coeficientes de desgaste em função da fração mássica com maior tamanho (G), para carga de 0,4 N.

Os maiores valores de coeficientes são obtidos utilizando os contra corpos macios, provavelmente, devido à maior facilidade dos abrasivos engastarem na esfera e serem arrastados para o contato.

4.2.1 Modelo de fração de abrasivos ativos no contato

Para este trabalho foi assumido um modelo para estimar a fração de partículas atuantes no início do contato. Considerando que as partículas possuem uma distribuição Gaussiana, segundo Greenwood e Williamson (1966), para superfícies planas contendo asperezas com uma distribuição de alturas gaussianas, apenas 20% entram em contato com a superfície oposta. Szuder *apud* de Mello *et al.* (2017) e de Mello *et al.* (2017), também, propuseram que cerca de 15 a 20% das partículas maiores são capazes de causar deformação plástica considerável na superfície oposta. Baseado nisso, neste trabalho, considerando a distância de separação h (eq. 15), pode-se observar que o número de partículas grandes que suportam a carga normal é uma função do tamanho médio das partículas, portanto a porcentagem ativa de partículas grandes deve ser calculada para cada distribuição. Sendo assim, novos diâmetros médios foram calculados para as misturas abrasivas, onde, pela distribuição de partículas, foi possível estimar um fator de correção que foi considerado satisfatório ao cumprir duas hipóteses: h inicial positiva e a área inicial (calculada) menor que a primeira área real, garantindo assim, a menor quantidade de partículas atuantes no contato inicial e que não haja contato entre o corpo de prova e o contra corpo, isto é, obter um h positivo, utilizando a Equação 15 (seção 2.5).

Além disso, foram utilizados diferentes critérios de porcentagem ativa no contato para os diferentes contra corpos utilizados:

- Contra corpos metálicos (seção 4.2.2 e 4.2.3): maiores abrasivos da distribuição granulométrica abrasiva.
- Contra corpos cerâmicos (seção 4.2.4): uma faixa central da distribuição de cada mistura abrasiva, desconsiderando os maiores e os menores abrasivos.

4.2.2 Comportamento do desgaste com a distância de separação (h) para esfera de Aço Martensítico AISI 52100

Ao utilizar esfera de esfera de aço martensítico AISI 52100, os menores coeficientes de desgaste foram obtidos para a mistura de 50% de abrasivo com o maior tamanho (50G), o que já havia sido observado por Gomez *et al.*, em 2015, para as duas cargas utilizadas. Porém, o abrasivo 100G, também, apresentou uma redução do coeficiente Pelo modelo (seção 4.2.1), para o aço martensítico AISI 52100, em média, de 13,57% a 24,40% das maiores partículas são efetivas e suportam a carga no contato inicial, como mestrados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,2 N.

| Mistura | % de partículas atuantes consideradas | Diâmetro médio das maiores partículas (μm) |
|----------------|--|---|
| 100G | 12,92 | 20,99 |
| 80G | 10,34 | 21,06 |
| 50G | 12,03 | 17,64 |
| 20G | 13,94 | 13,00 |
| 0G | 18,64 | 8,79 |

O aumento da carga, faz com seja necessário um número maior de partículas no contato para garantir que ho seja positivo.

Tabela 11 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,4 N.

| Mistura | % de partículas atuantes consideradas | Diâmetro médio das maiores partículas (μm) |
|----------------|--|---|
| 100G | 23,03 | 19,60 |
| 80G | 17,4 | 19,75 |
| 50G | 17,45 | 16,56 |
| 20G | 26,19 | 11,34 |
| 0G | 37,94 | 7,72 |

O abrasivo de menor tamanho (0G) necessita de um número maior de partículas para que seja capaz de sustentar o contato e não gerar *ridge*. Na Figura 40, é mostrado a distância de separação em função do tempo de ensaio, foi utilizada a Equação 15.

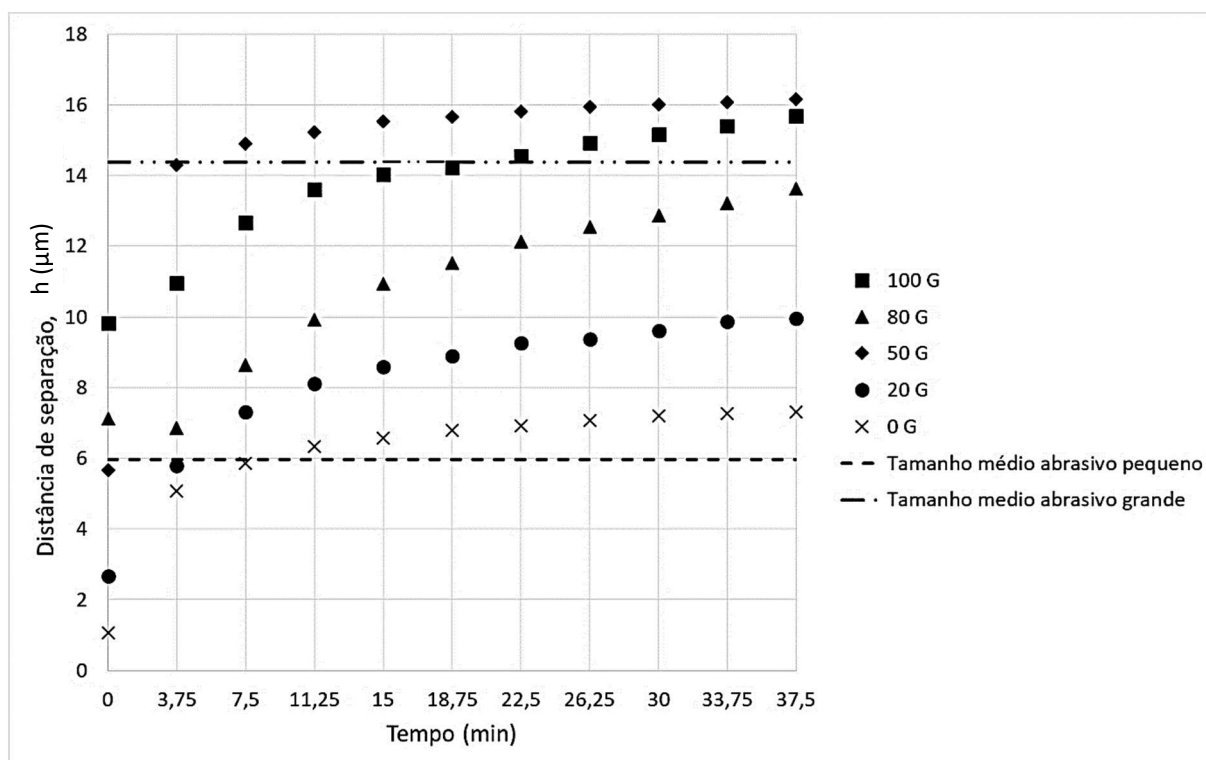


Figura 40 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,2 N.

É possível observar que 0G e 20G ficam próximos ao tamanho médio de abrasivo pequeno ($5,97 \mu\text{m}$). A introdução de 20% de abrasivos grandes no pó pequeno gerou um aumento na distância de separação para aproximadamente $10 \mu\text{m}$, fazendo com que abrasivos menores não participem do contato, diminuindo a fração atuante e reduzindo, assim, o desgaste quando comparado ao 0G. A partir de 50G, os abrasivos atuantes no contato são os maiores e, portanto, o desgaste aumenta conforme a fração de abrasivos grandes aumenta.

Para a carga de $0,4\text{N}$, segundo a Figura 39, ocorre, também, uma redução do coeficiente de desgaste em 100G. Ao plotar a distância de separação em função do tempo (Figura 41), observa-se uma redução da distância em 100G, indicando que a carga por partícula aumentou, diminuindo a distância de separação, fazendo com que os abrasivos grandes encontrem maior resistência para entrar no contato e uma fração menor de abrasivos acabe atuando na zona de desgaste, diminuindo o mesmo.

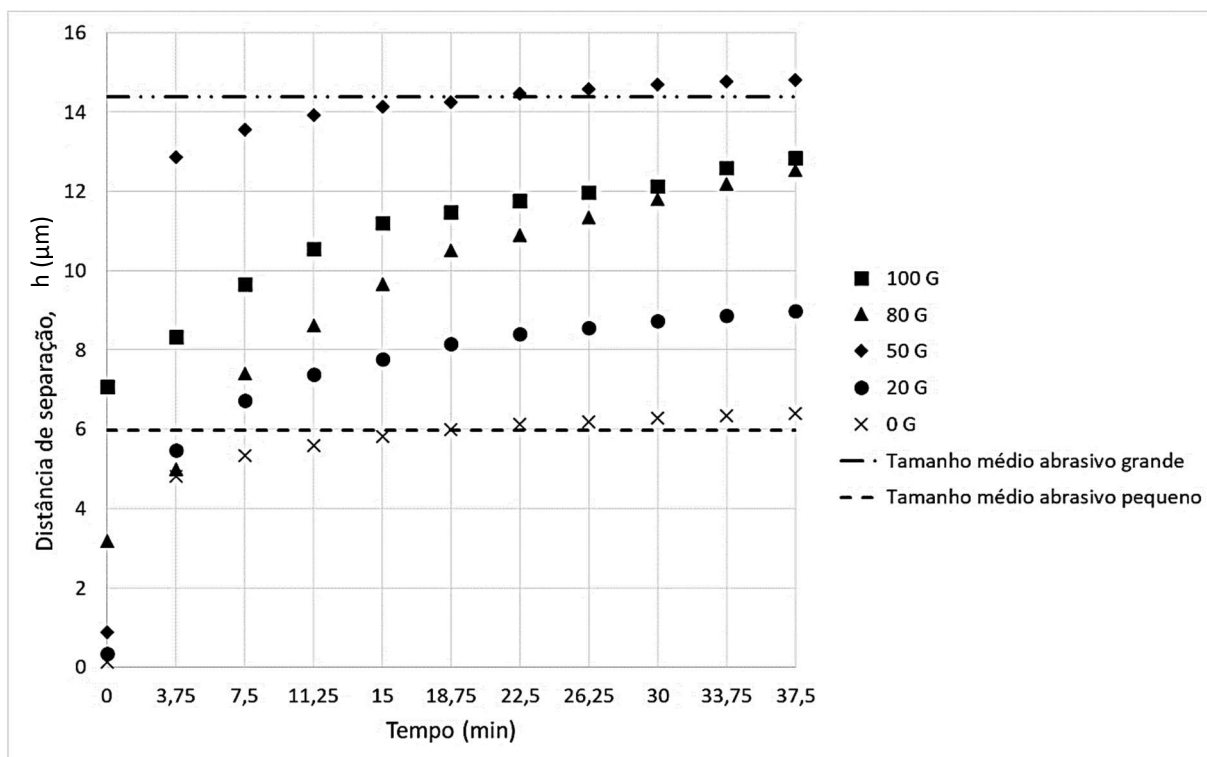


Figura 41 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço martensítico AISI 52100, 0,4 N.

Uma borda difusa, gerada pelas partículas grandes, pode ser observada na imagem da cratera de desgaste de 50G e 100G, Figura 42, que, quando comparadas com a calota obtida utilizando abrasivo 0G, apresenta uma borda menos definida e com mais indentações da região de entrada (KELLY e HUTCHINGS, 2001).

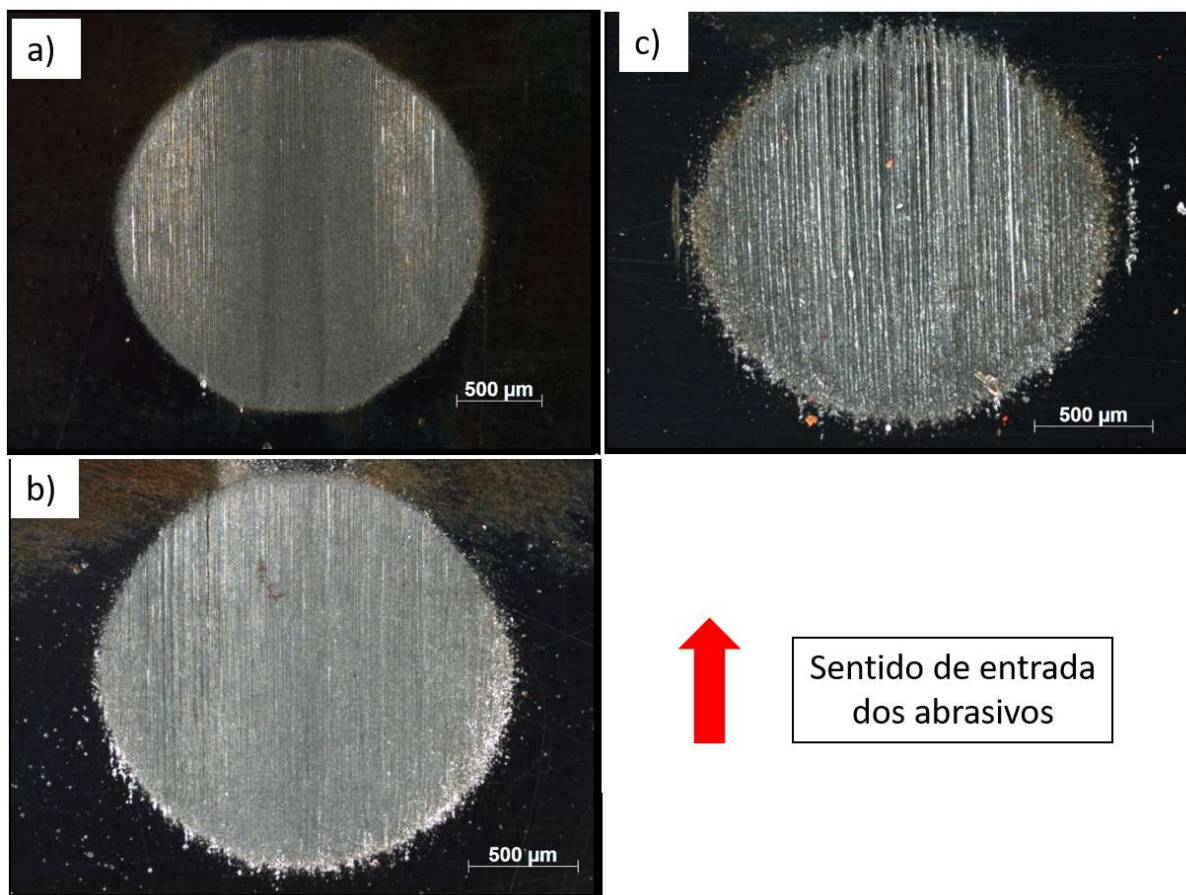


Figura 42 - Borda difusa gerada pelas partículas grandes, imagem óptica estereoscópica. a) 0G – não apresenta borda difusa, b) 50G e c) 100G – apresentam borda difusa.

4.2.3 Comportamento do desgaste com a distância de separação (h) para esfera de esfera de Aço Inoxidável Austenítico AISI 304

A utilização de esfera do aço inoxidável austenítico AISI 304 contra amostras de aço AISI 1020 foi a combinação de corpo e contra corpo que resultou nos maiores valores de coeficientes de desgaste que, por ser um contra corpo macio, faz com que as partículas possuam maior facilidade de entrar no contato e serem arrastadas (TREZONA e HUTCHINGS, 1999).

Diferente dos resultados encontrados para a esfera de aço martensítico AISI 52100, os menores valores do coeficiente de desgaste foram obtidos em 20% do abrasivo grande (20G), para as duas cargas.

Para estimar no número de partículas ativas no contato, novamente, segue-se o modelo (seção 4.2.1) baseado na teoria de Greenwood e Williamson (1966). A Tabela 12 mostra os valores de partículas atuantes no contato inicial.

Tabela 12 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para aço inoxidável austenítico AISI 304, 0,2 N.

| Mistura | % de partículas atuantes consideradas | Diâmetro médio das maiores partículas (μm) |
|----------------|--|---|
| 100G | 12,92 | 20,99 |
| 80G | 10,34 | 21,06 |
| 50G | 12,03 | 17,64 |
| 20G | 19,66 | 12,14 |
| 0G | 27,85 | 8,23 |

Por ser mais macio do que o aço martensítico AISI 52100, um número maior de partículas atua no contato, principalmente com as menores partículas (0G) e em maiores cargas, conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de aço inox 304, 0,4 N.

| Mistura | % de partículas atuantes consideradas | Diâmetro médio das maiores partículas (μm) |
|----------------|--|---|
| 100G | 23,03 | 19,60 |
| 80G | 25,37 | 18,53 |
| 50G | 25,37 | 15,56 |
| 20G | 41,09 | 9,95 |
| 0G | 58,43 | 6,89 |

A Figura 43 apresenta a distância de separação em função do tempo de ensaio. Onde a maior distância é encontrada para 50G.

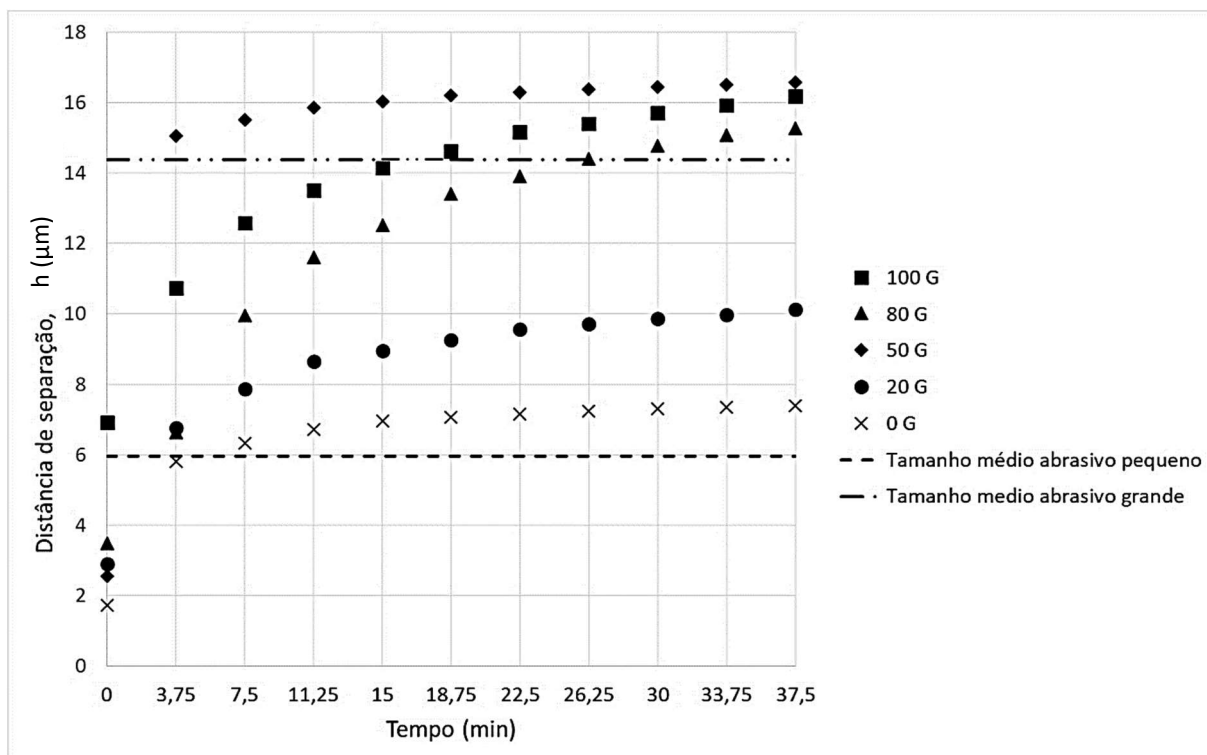


Figura 43 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304, 0,2 N.

Mais uma vez, em 20G, as partículas grandes aumentam a distância de separação e diminuem a fração atuante no contato, diminuindo o desgaste. Para 50G, a distância de separação é ainda maior, porém, pela facilidade em arrastar partículas, é possível que haja mais abrasivos agindo no contato. O que não é observado na Figura 44, onde o aumento da carga, reduz a distância de separação.

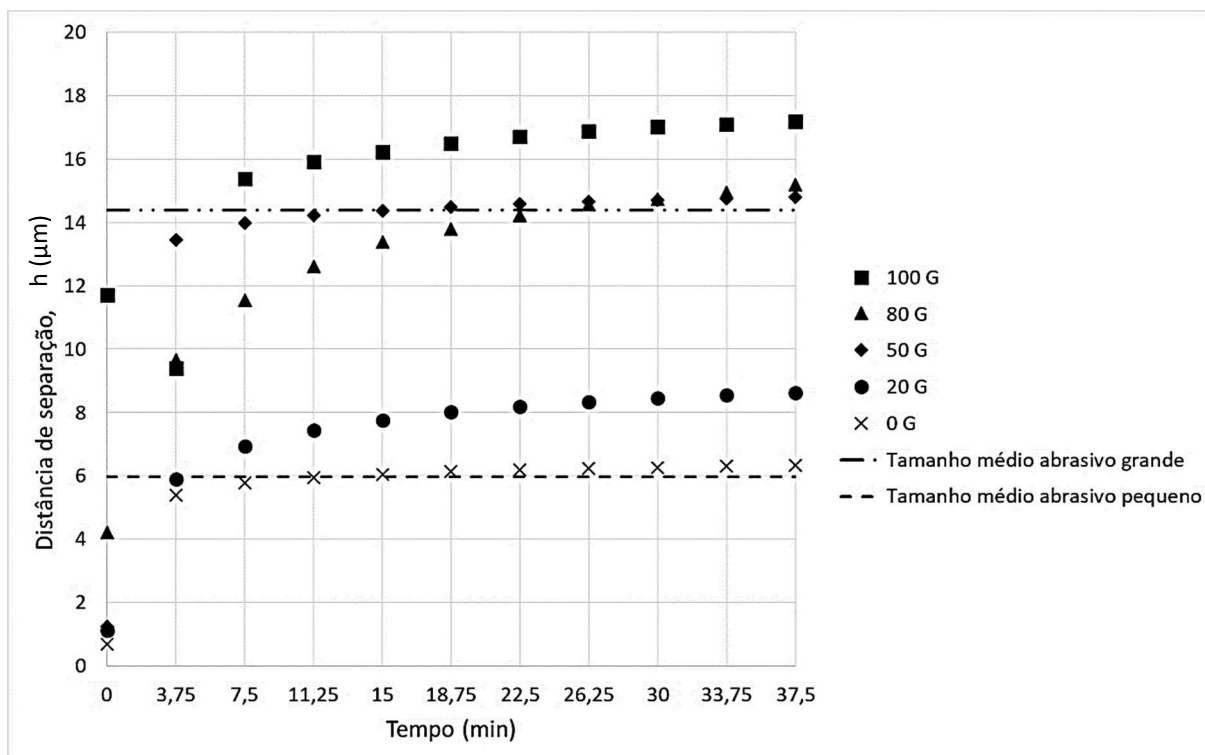


Figura 44 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304, 0,4N.

A redução no coeficiente de desgaste em 100G, para as duas cargas, pode ocorrer devido à morfologia das partículas, como foi visto na Tabela 9, as partículas maiores são menos angulosas. Segundo Imbeni *et al.* (2003), seção 2.6, partículas mais angulosas fornecem maior taxa de desgaste. Em 0,4 N, como mostrado na Figura 39, a combinação do aumento de carga, maior angulosidade e baixa dureza da esfera, resultaram em coeficientes de desgaste maiores para a condição 0G do que em 100G.

Através da análise de EDS da superfície de desgaste da esfera, foram observados abrasivos engastados na superfície, confirmando a maior facilidade de entrarem no contato.

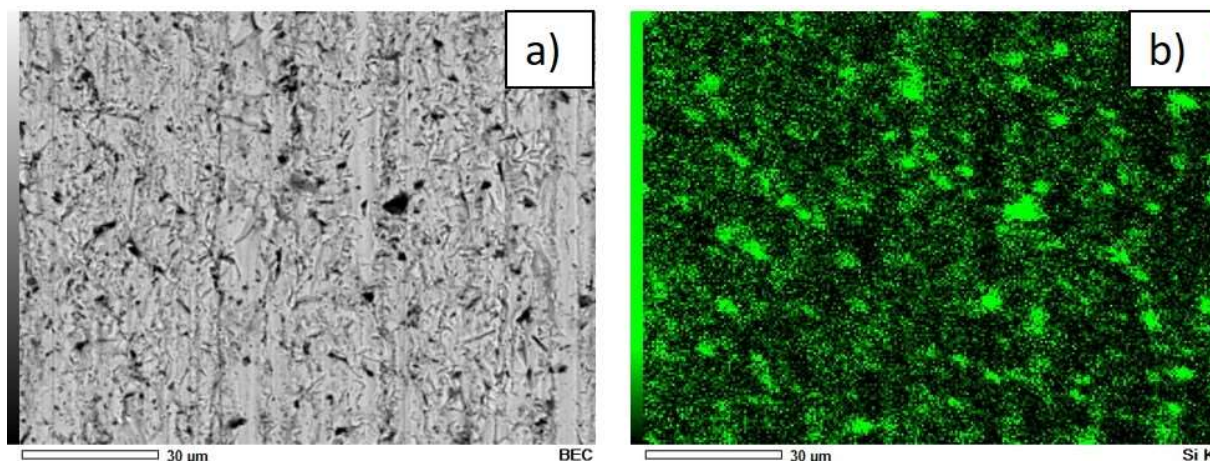


Figura 45 - Mapa composicional (EDS) da trilha de desgaste na superfície da esfera de aço inox AISI 304, ressaltando, em verde, a presença de silício (SiK) na superfície.

4.2.4 Comportamento do desgaste com a distância de separação (h) para esfera de esfera de Zircônia – Alumina

Os coeficientes de desgaste obtidos nos ensaios utilizando a esfera de zircônia-alumina mostraram-se proporcionais à fração volumétrica de abrasivos grandes (100G).

Seguindo o modelo (seção 4.2.1), considerando a elevada dureza e o acabamento superficial (esfera não condicionada – baixa rugosidade) da esfera de cerâmica, este contra corpo possui a maior dificuldade em arrastar os abrasivos para o contato, portanto, foi assumido que não participaram do mesmo os abrasivos que são muito pequenos (abaixo de 5 μm) e os muito grandes (acima de 15 μm), sendo considerada apenas uma faixa de partículas atuantes. Os abrasivos atuantes, provavelmente, estão na intersecção do gráfico da distribuição granulométrica, mostrado na Figura 46, entre 5 μm e 15 μm .

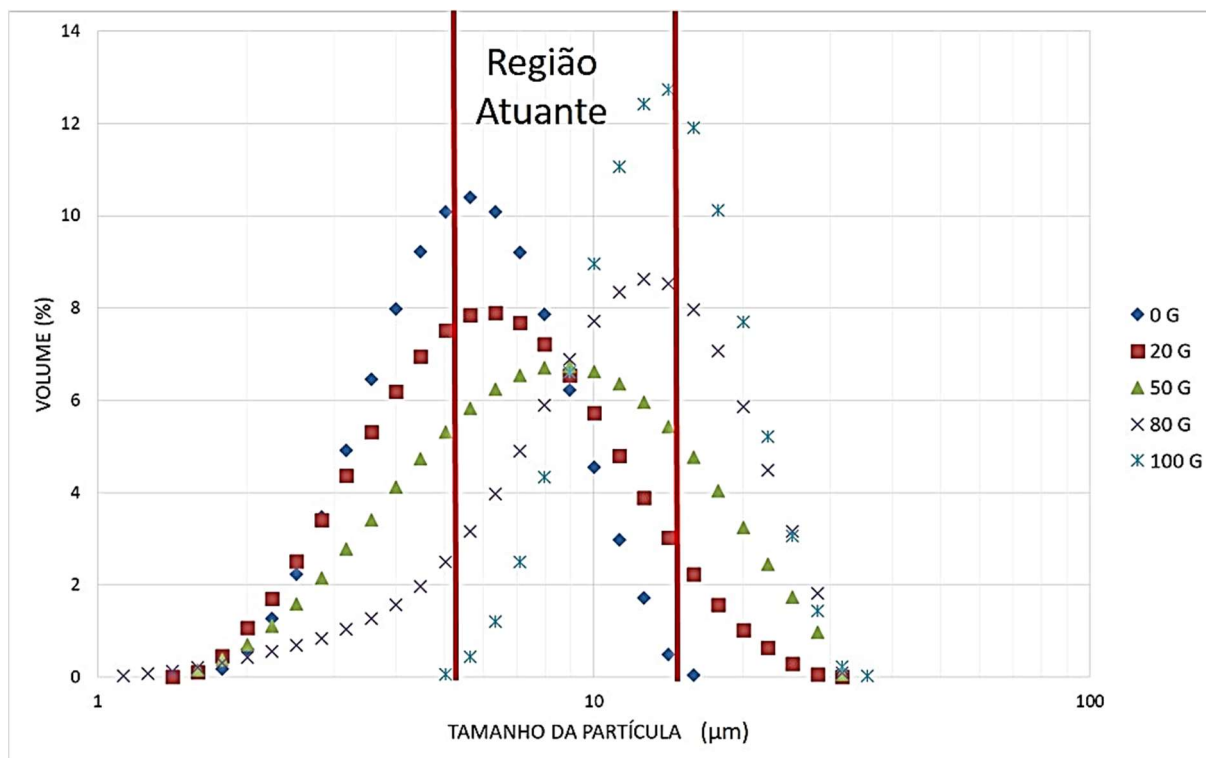


Figura 46 – Região de abrasivos atuantes no contato inicial no ensaio com a esfera de zircônia – alumina.

A Tabela 14 mostra o percentual de partículas atuantes no início do contato, possibilitando o posterior cálculo da distância de separação (h_0).

Tabela 14 - Percentual de partículas ativas no contato inicial e diâmetro médio para esfera de zircônia - alumina, 0,2N.

| Mistura | % de partículas atuantes consideradas | Diâmetro médio das maiores partículas (μm) |
|----------------|--|---|
| 100G | 72,17 | 11,94 |
| 80G | 65,99 | 10,60 |
| 50G | 61,14 | 9,40 |
| 20G | 56,83 | 8,40 |
| 0G | 53,57 | 7,31 |

Observando a Figura 47, a distância de separação aumenta à medida em que a fração ativa de abrasivos, neste caso, os grandes (100G), aumenta. Corroborando com os

resultados encontrados nas Figuras 38 e 39, isto é, à medida que aumenta a fração ativa de abrasivos 100G, há o incremento no coeficiente de desgaste.

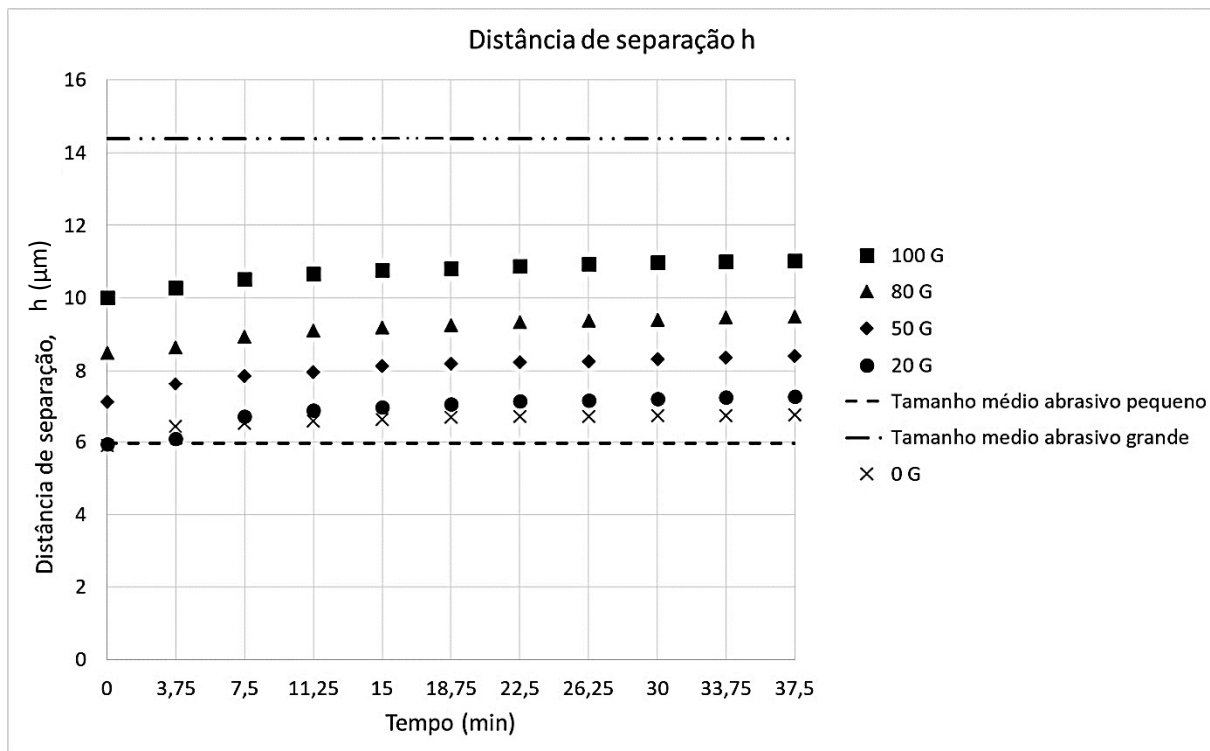


Figura 47 - Distância de separação em função do tempo de ensaio para esfera zircônia – alumina, 0,2N.

Nos ensaios realizados com o abrasivo pequeno (0G), foi observado a formação de *ridge*, como mostra a Figura 48, para as duas cargas.

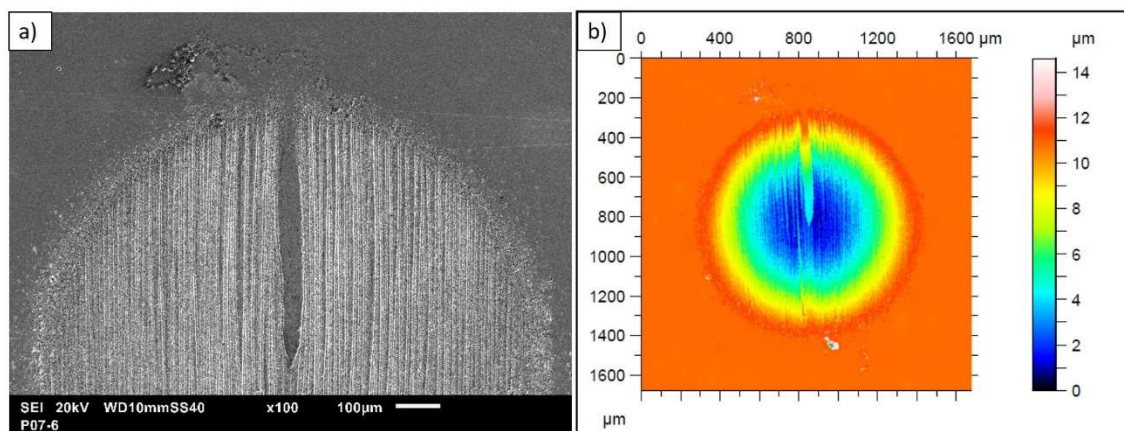


Figura 48 – Formação de *ridge* na condição 0G, carga 0,2N. a) imagem de MEV, elétrons secundários, 100x e b) imagem obtida analisador 3D de superfície.

A presença do *ridge* pode estar associada a um contra corpo com dureza muito superior à da amostra. Os abrasivos menores são completamente engastados no aço AISI 1020, não conseguindo separar as superfícies do corpo e contra corpo em áreas com maior pressão, como o centro da região de desgaste. Trezona *et al.* (1999), (seção 2.8.2), da mesma forma, observaram formação do *ridge* para amostras macias com uso de esferas não condicionadas.

Por meio do EDS, foi verificado uma grande quantidade de abrasivos impregnados na área desgastada, para todas as condições.

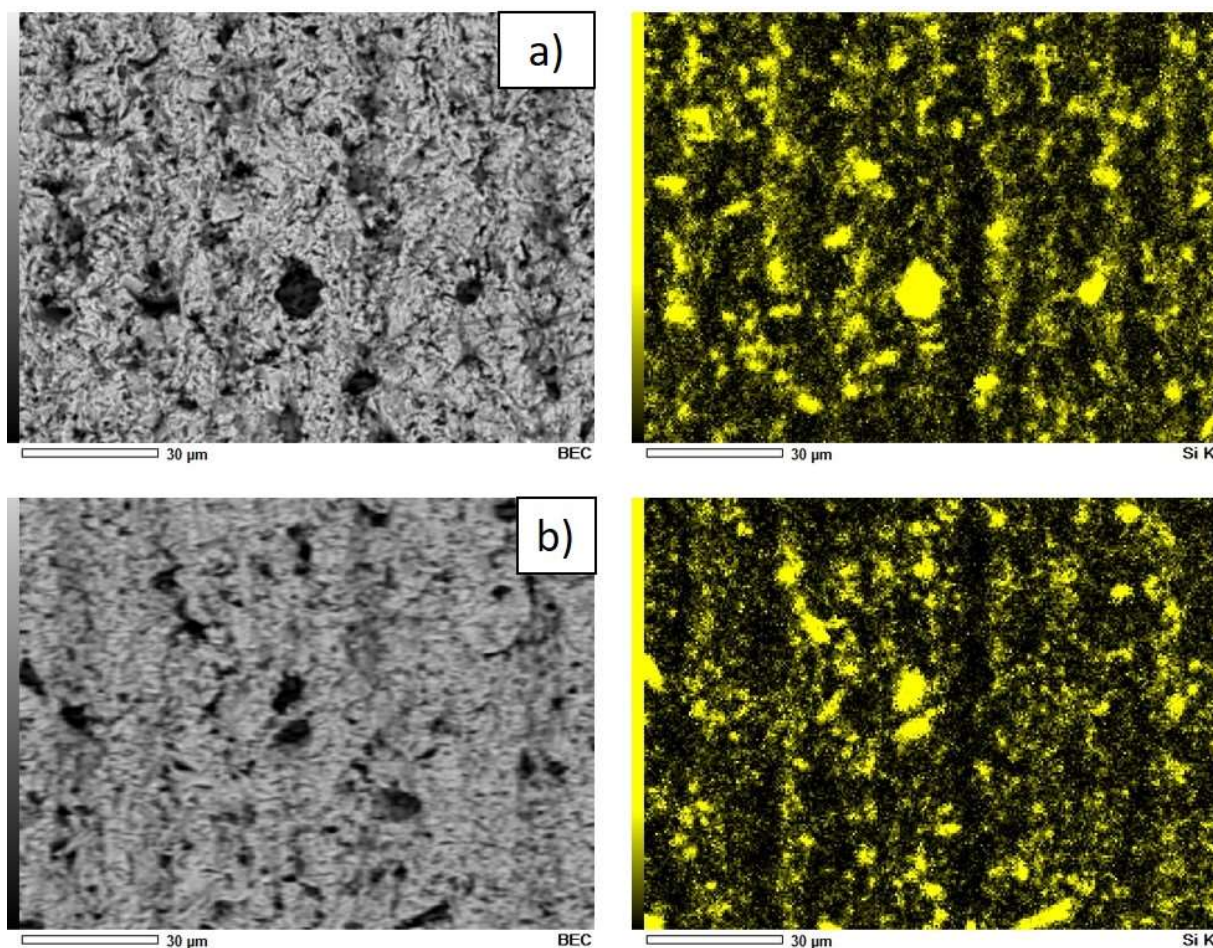


Figura 49 – Mapa composicional (EDS) das calotas de desgaste (aço AISI 1020) produzidas com esfera de zircônia – alumina nas condições de 0G para as cargas de a) 0,2 N e b) 0,4 N, onde veem-se abrasivos impregnados (silício – regiões amarelas) nas superfícies desgastadas.

O *ridge*, também, pode ter ocorrido por causa da rugosidade superficial da esfera, como mostrou Allsopp *et al.* (1998), seção 2.6. Baixa rugosidade superficial, tem-se maior dificuldade em arrastar abrasivos para o contato.

Outro problema de medição encontrado, relativo às calotas, foi o *pile up*, Figura 50. A elevada dureza da esfera gerou um acúmulo de material deformado plasticamente na borda de cratera, como já havia sido demonstrado por Schiffmann *et al.* (2005), seção 2.8.3.

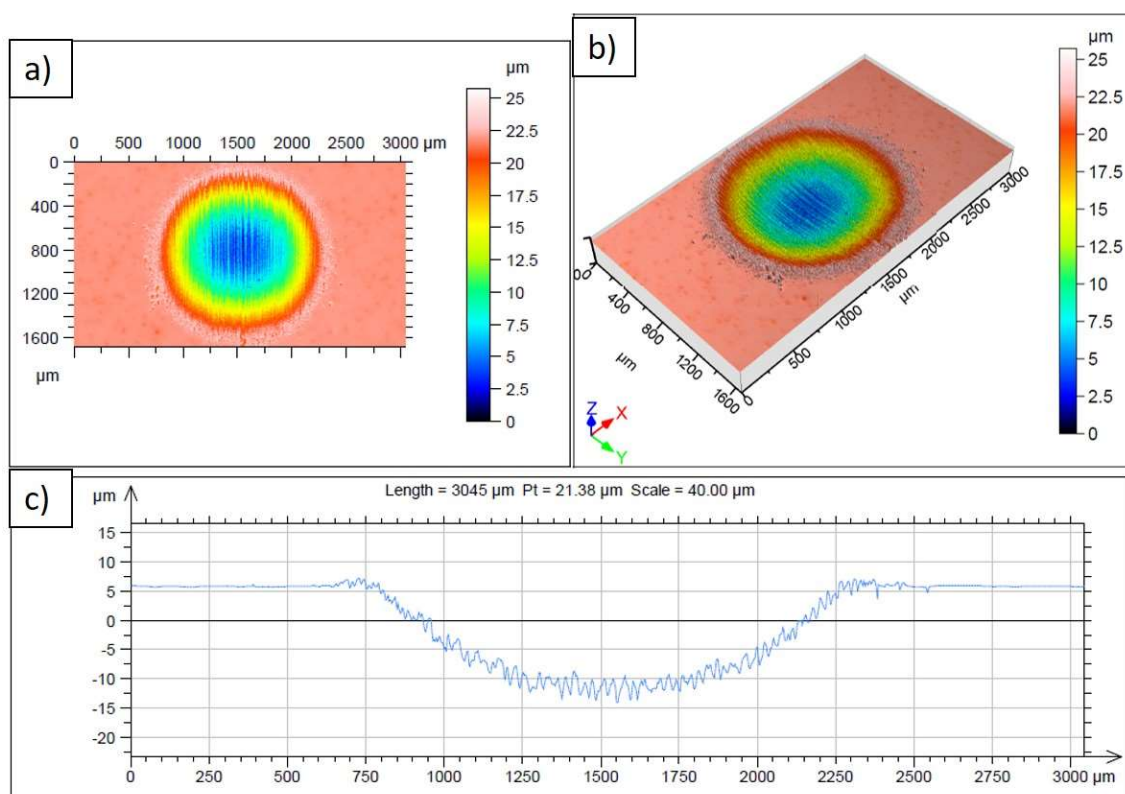


Figura 50 – Imagens realizadas através do analisador 3D de superfícies mostrando o material acumulado na borda da cratera. a) vista superior da cratera de desgaste, b) vista 3D e c) perfil transversal de desgaste.

4.2.5 Esfera de Borracha Poliuretano

Nos ensaios utilizando esferas de borracha poliuretano, o coeficiente de desgaste foi praticamente independente da distribuição granulométrica, Figuras 38 e 39. Apesar de ser um material elástico, o poliuretano é conhecido pela alta resistência à abrasão e ao corte. Para melhor investigar o processo de desgaste, foram realizadas imagens de MEV da trilha de desgaste da superfície da esfera, Figura 51.

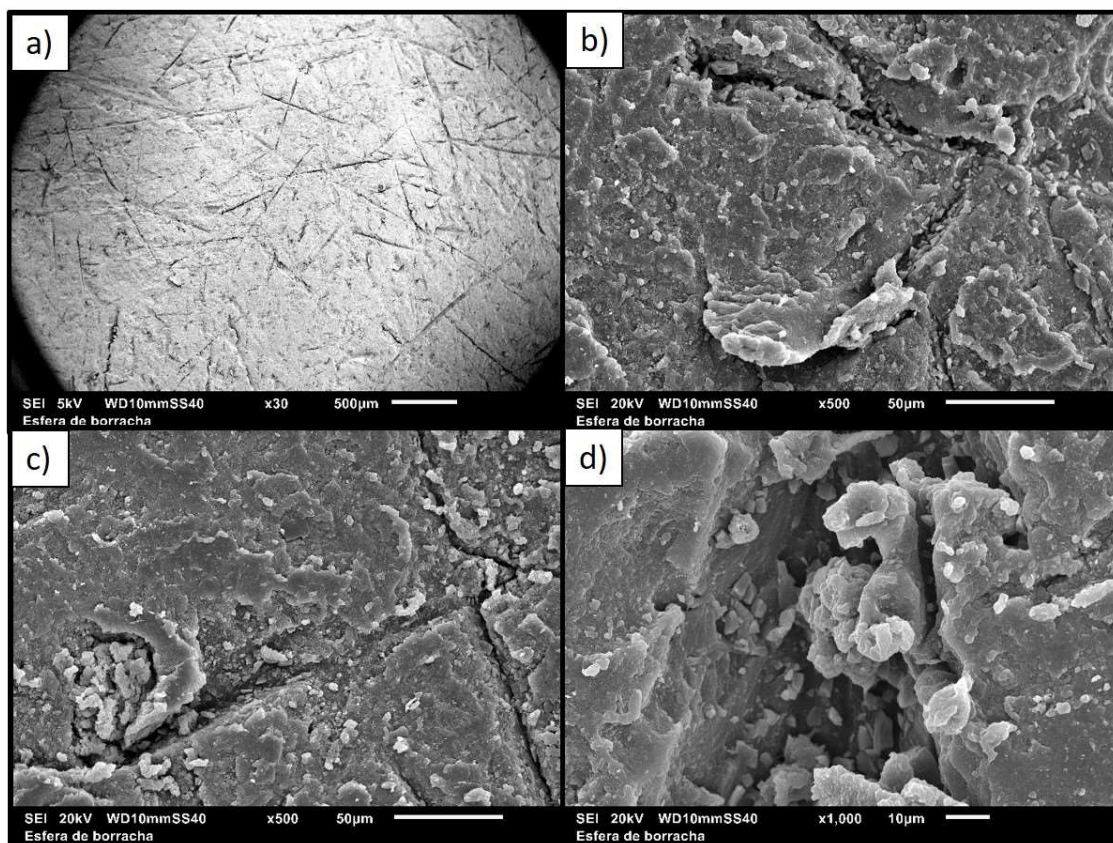


Figura 51 – Imagens de MEV da superfície da esfera de borracha após ensaios, com aumentos de a) 30x, b) 500x, c) 500x e d) 1000x.

A superfície apresentou grandes quantidades de riscos e, por meio do EDS, foi possível verificar que nestes, além de partículas abrasivas de SiC grandes e pequenas, como mostra figura Figura 52, também, vê-se a presença de debris, evidenciado pela presença do elemento químico ferro no mapa composicional da Figura 53 - d.

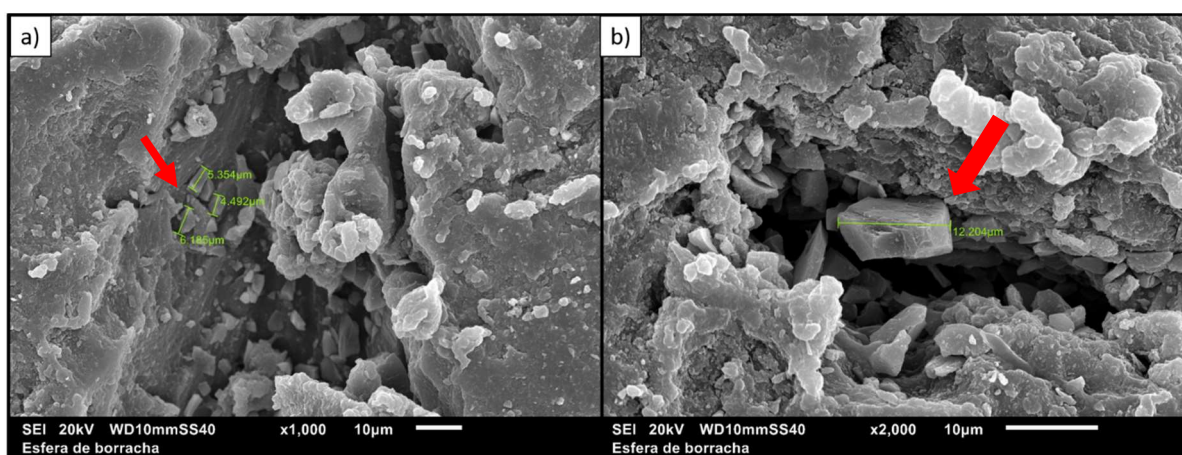


Figura 52 – Presença de abrasivos impregnados nos riscos da superfície esférica, a) abrasivos menores de 5 µm e b) abrasivos maiores de 12 µm.

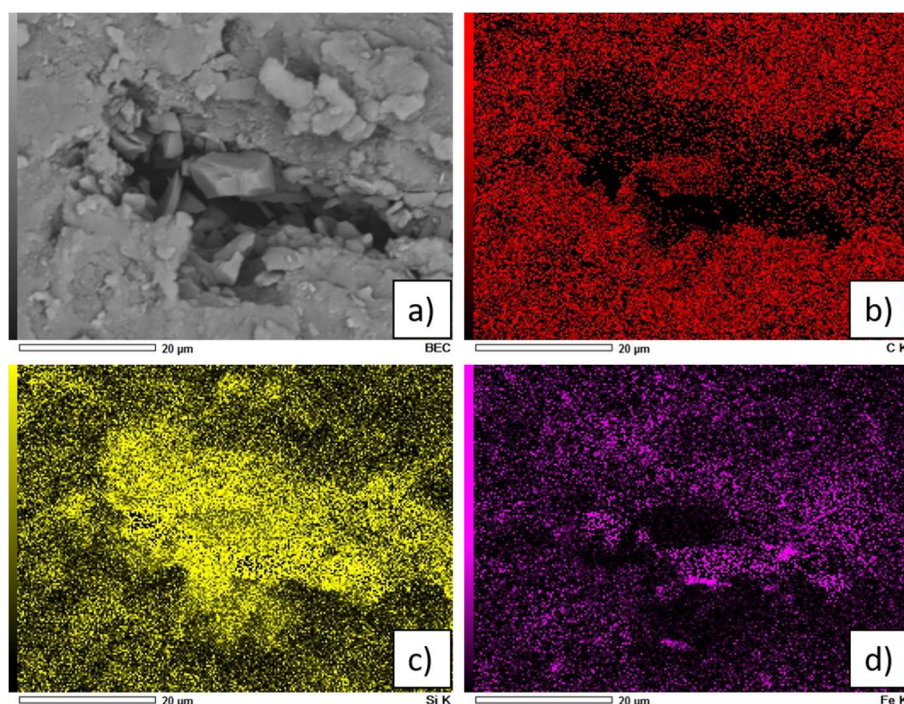


Figura 53 – a) Mapa composicional (EDS) da superfície da esfera de borracha mostrando elementos químicos encontrados, b) carbono – composição da borracha, c) silício – presente no SiC e d) ferro - debris.

Os abrasivos são facilmente engastados na superfície esférica. Por isso, a diferença da distribuição granulométrica não afeta significativamente os resultados, pois abrasivos grandes ou pequenos são alojados indiferentemente na borracha poliuretano. No geral, os valores dos coeficientes de desgaste dos ensaios com esfera de borracha são menores do que os ensaios com esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304, isso por causa da capacidade elástica do contra corpo, dificultando a transferência de força para o processo de desgaste.

Na condição mais extrema, 0,4 N e 100G, observou-se a dificuldade de obtenção de uma calota perfeitamente esférica, Figura 54. O ideal, para eliminar este tipo de problema, é que os volumes sejam obtidos por meio de perfilometria.

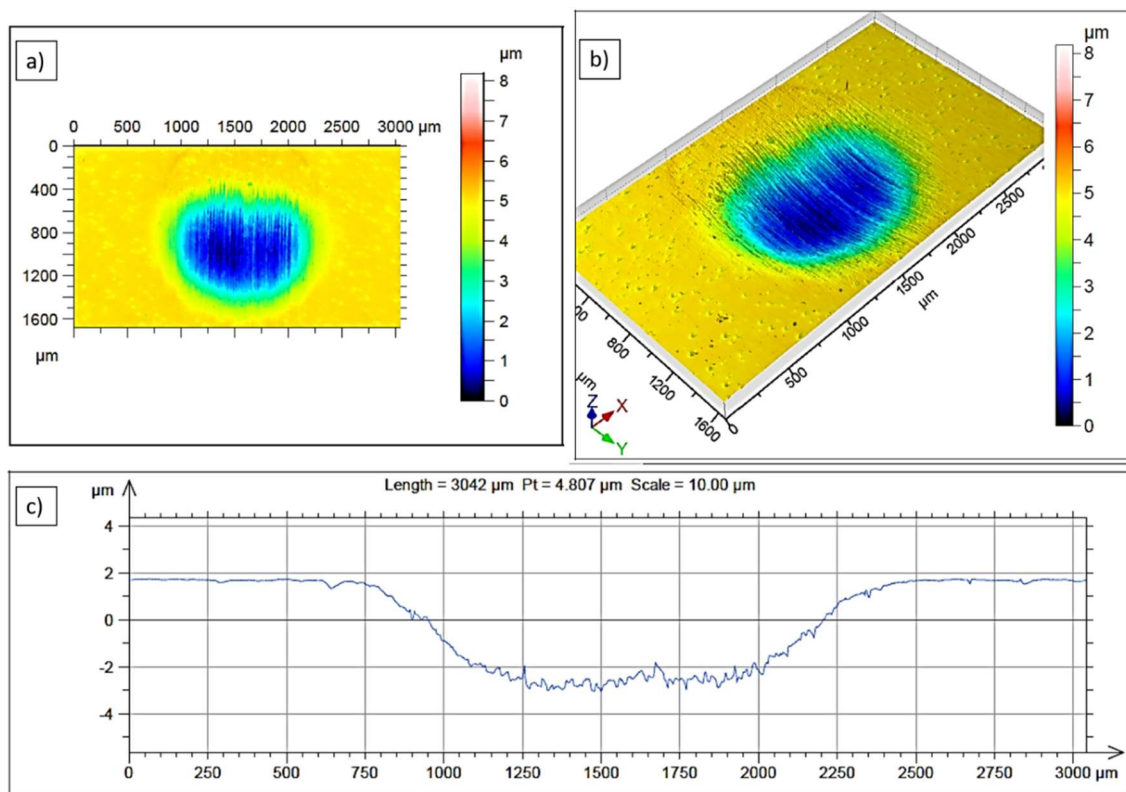


Figura 54 – Dificuldade na formação de calota esférica utilizando o contra corpo de borracha poliuretano na condição de 0,4 N e 100G, a) vista superior da cratera de desgaste, b) vista 3D e c) perfil transversal de desgaste.

4.3 COEFICIENTES DE DESGASTE PARA ENSAIOS VARIANDO A VELOCIDADE

Os resultados para os ensaios variando a velocidade angular do contra corpo de aço martensítico AISI 52100 e amostras de aço AISI 1020, utilizando o abrasivo SiC com tamanho médio de 6,57 μm, estão apresentados na Figura 55.

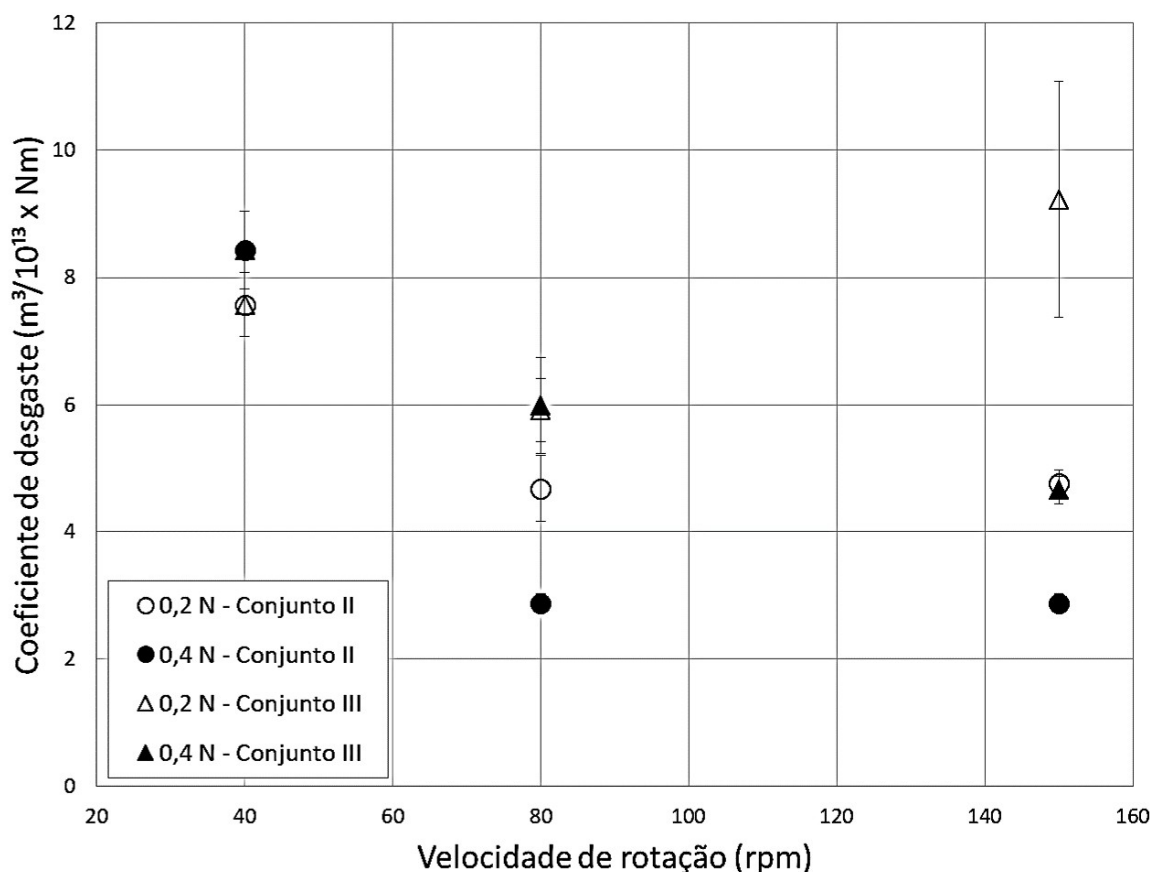


Figura 55 – Coeficiente de desgaste em função da velocidade angular para abrasivos de tamanho médio de 6,57 μm .

Os ensaios onde a concentração abrasiva da solução foi mantida constante e igual a 0,1 $\text{g}_{\text{SiC}}/\text{cm}^3_{\text{água}}$ apresentaram redução do coeficiente de desgaste. Como estes ensaios foram realizados com a mesma distância de deslizamento, o tempo de ensaio, necessariamente, variou, causando dúvida se a diminuição do desgaste não estaria relacionada à quantidade total de abrasivos que passaram pelo contato. Por isso, novos ensaios foram adotados com objetivo de manter constante o volume de abrasivos passante no contato. Logo, buscou-se compatibilizar tempo de ensaio e concentração. Por exemplo, para tempos menores, tem-se o aumento na concentração da solução abrasiva.

Considerando o volume de uma gota como 0,05 ml e uma taxa de gotejamento de 25 gotas/min, o volume total de abrasivos durante o ensaio será (Tabela 15):

Volume de SiC = taxa de gotejamento x tempo de ensaio x volume de 1 gota x fração volumétrica.

Tabela 15 – Volume total de SiC durante os ensaios.

| Tempo total de ensaio (min) | 20 | 37,5 | 75 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|
| Solução com concentração constante | 0,78 ml | 1,46 ml | 2,93 ml |
| Solução variando a concentração | 2,96 ml | 2,93 ml | 2,93 ml |

Pela Figura 55, é possível observar que mesmo com o ajuste do volume total de carbeto de silício durante o ensaio, de forma geral, ainda foi apresentada a tendência de diminuição do coeficiente de desgaste com o aumento da velocidade. A exceção se faz apenas para os ensaios realizados com a carga de 0,2 N e velocidade de 150 rpm. Todavia, há uma grande incerteza associada a este resultado (grande desvio padrão).

Os ensaios empregando a velocidade de 80 e 150 rpm, também foram realizados com abrasivos de menor tamanho ($2,11 \mu\text{m}$) mantendo, desta vez, a concentração da solução fixa em $0,1 \text{ g}_{\text{SiC}}/\text{cm}^3_{\text{água}}$, Figura 56. Para ambas as cargas utilizadas, o aumento da velocidade resultou em uma diminuição do coeficiente de desgaste.

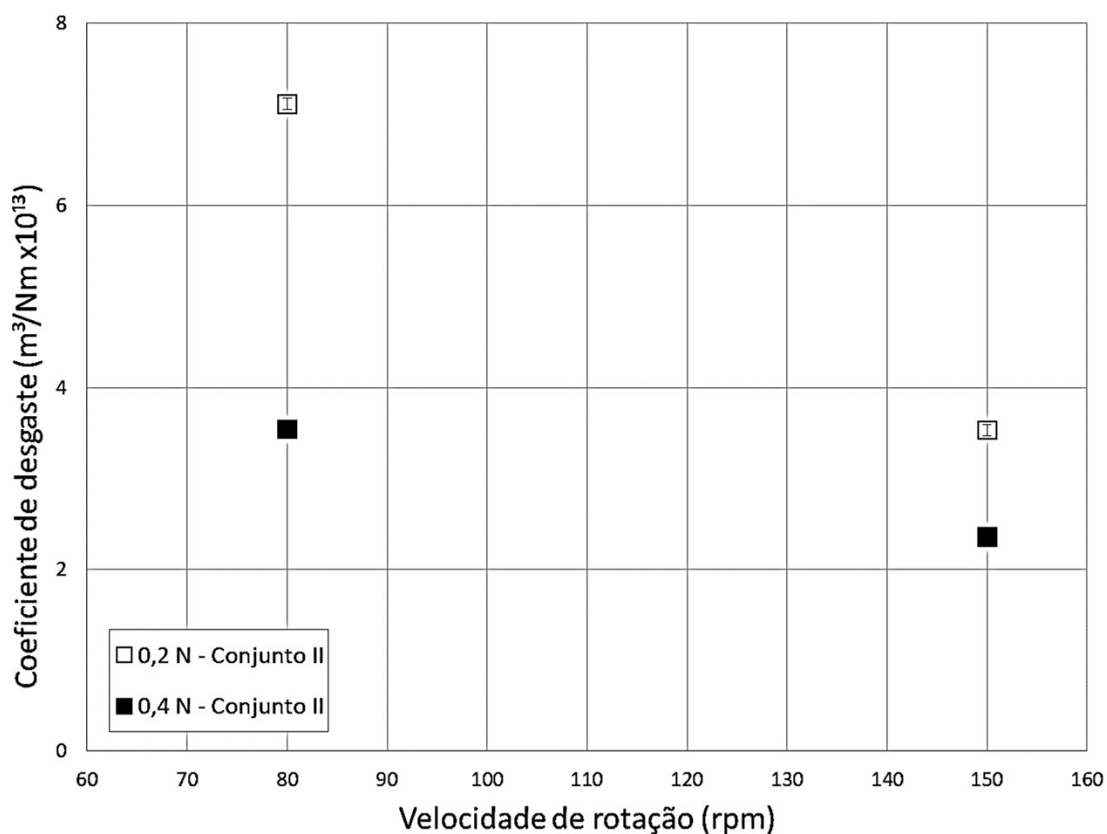


Figura 56 – Coeficiente de desgaste em função da velocidade angular para abrasivos de tamanho médio de $2,11 \mu\text{m}$.

De uma maneira geral, os resultados seguem as tendências apresentadas nos trabalhos discutidos na seção 2.6.1. Porém, as justificativas daqueles autores não são conclusivas.

Utilizando a equação de Reynolds, foi possível calcular (Equação 17, seção 2.6.1) a espessura da camada hidrodinâmica, Figura 57, que aumenta exponencialmente com o aumento da velocidade.

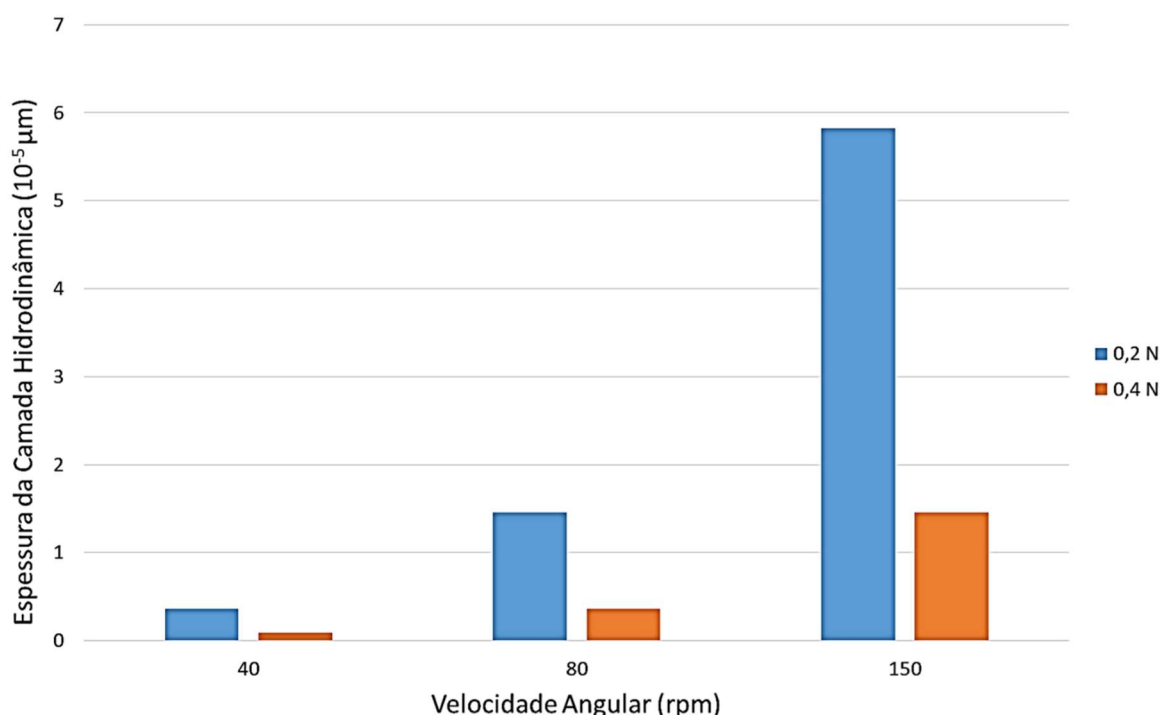


Figura 57 - Espessura da camada hidrodinâmica em função da velocidade angular.

De acordo com Rutherford e Hutchings (1996), seção 2.6.1, a espessura da camada hidrodinâmica influencia nos resultados apenas quando é maior do que o tamanho médio do abrasivo. Entretanto, Figura 57, foi mostrado que a espessura da camada é muito inferior aos tamanhos médios $6,57 \mu\text{m}$ e $2,11 \mu\text{m}$, mas isso não exclui a hipótese da camada agir como um lubrificante da superfície esférica.

Na tentativa de entender melhor tal lubrificação, foram obtidas imagens de MEV das crateras de desgaste, Figura 58, onde observa-se o aumento de abrasivos grandes incrustados na superfície desgastada com o aumento da velocidade de rotação, resultado que já havia sido observado por Bello e Wood (2003), Figura 27.

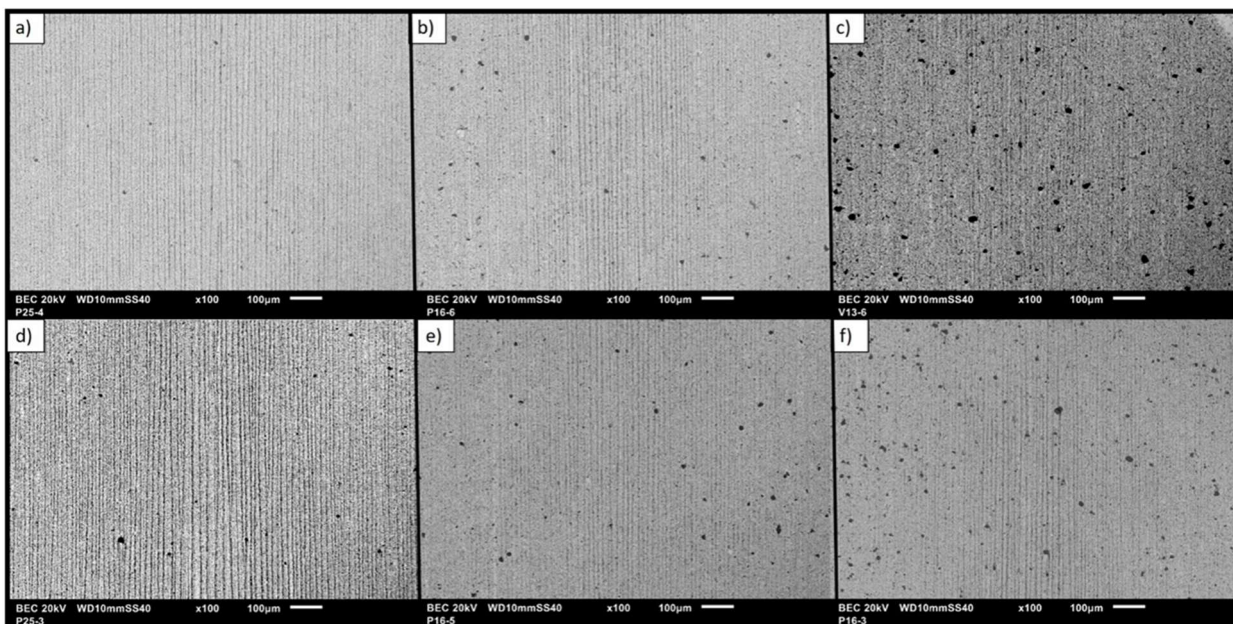


Figura 58 – Micrografias obtidas pelo MEV indicando o aumento de abrasivos incrustados na superfície desgastada com o aumento da velocidade para concentração de $0,1 \text{ gSiC/cm}^3_{\text{água}}$. Para carga de 0,2N, a) 40 rpm, b) 80 rpm e c) 150 rpm. Para carga de 0,4N, d) 40 rpm, e) 80 rpm e f) 150 rpm.

O aumento das partículas incrustadas fica ainda mais evidente ao se observar a região de entrada dos abrasivos na cratera de desgaste, Figura 59.

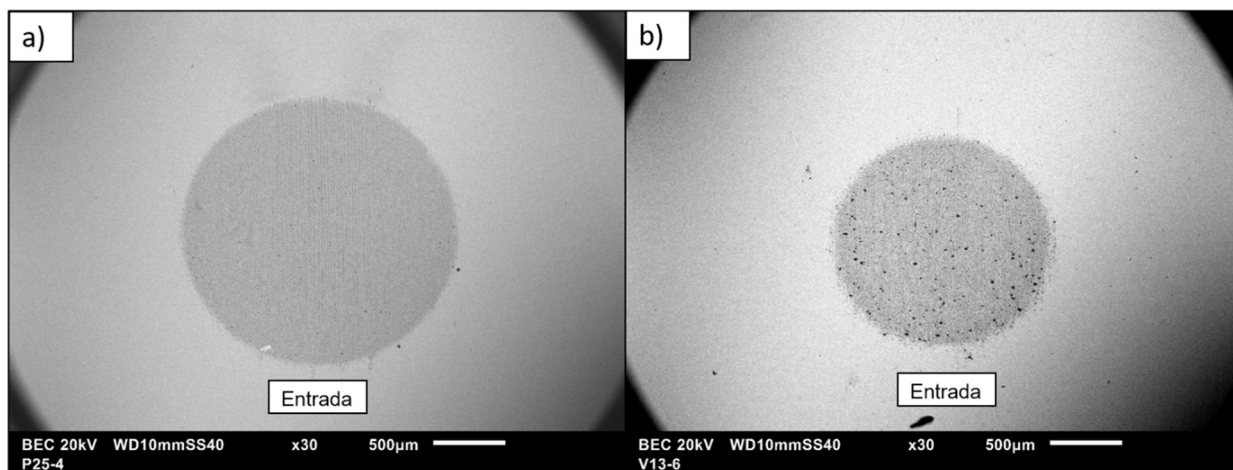


Figura 59 – Micrografias via MEV das crateras de desgaste mostrando o aumento da quantidade de pequenas regiões escuras (partículas abrasivas de SiC incrustadas) na superfície desgastada, principalmente na região de entrada. a) 40 rpm e b) 150 rpm.

A Figura 58 revela a diferença de tamanho entre abrasivos impregnados na entrada e no meio de uma mesma calota. Observa-se que no meio da cratera de desgaste não

existem partículas grandes incrustadas, sugerindo que não havia condições mecânicas (atrito) para arrastá-las junto ao contato.

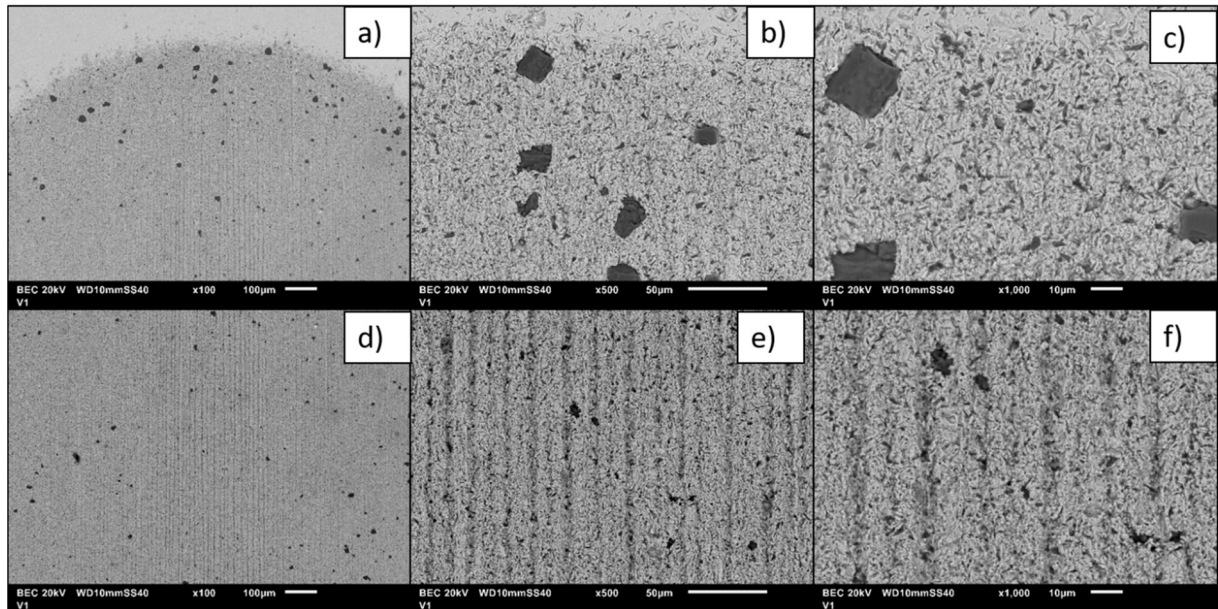


Figura 60 – Imagens de MEV, elétrons retroespalhado, mostrando a diferença entre abrasivos (pontos escuros) engastados na amostra: região de entrada e no meio da calota de desgaste.

Allsopp *et al.* (1998), seção 2.6, sugerem que os abrasivos engastados na entrada do contato é um fenômeno característico de ensaios empregando esferas lisas, que não possuem rugosidade suficiente para retirar e arrastar as partículas para o meio do contato. No entanto, neste trabalho, os ensaios foram levados a cabo de modo aleatório e com a mesma esfera, sendo esta previamente condicionada, o que corrobora com a hipótese do filme hidrodinâmico agir como um lubrificante, diminuindo o efeito da rugosidade superficial da esfera.

4.3.1 Cálculo da distância de separação para diferentes velocidades de rotação da esfera

Para estes ensaios, foi assumido o modelo de partículas ativas baseado em Greenwood e Williamson (1966), seção 4.2.1. Para o abrasivo menor, $2,11 \mu\text{m}$, o percentual ativo para suportar o contato aumentou, assumindo que não houve *ridge*, conforme

Tabela 16.

Tabela 16 – Percentual de partículas ativas no contato e diâmetros médio.

| | | % de partículas atuantes consideradas | Diâmetro médio das maiores partículas (μm) |
|-------------------|-------|---------------------------------------|---|
| Abrasivo B | 0,2 N | 23,35 | 10,41 |
| | 0,4 N | 31,49 | 9,78 |
| Abrasivo A | 0,2 N | 80,28 | 2,26 |
| | 0,4 N | 80,28 | 2,26 |

Para o gráfico da distância de separação pelo número de revoluções, utilizando as áreas geradas nos ensaios, mantendo a concentração da solução abrasiva constante, foi mostrado um aumento da distância de separação apenas para as condições de menores velocidades (40 rpm), Figura 61. Utilizando o equacionamento de Adachi e Hutchings (2003) para o cálculo da distância de separação (Equação 15), onde todas as variáveis são mantidas constantes, era esperado que, para uma mesma carga, a distância de separação permanecesse a mesma, pois a equação não considera a influência da velocidade, como pode ser visto nos pontos iniciais do gráfico.

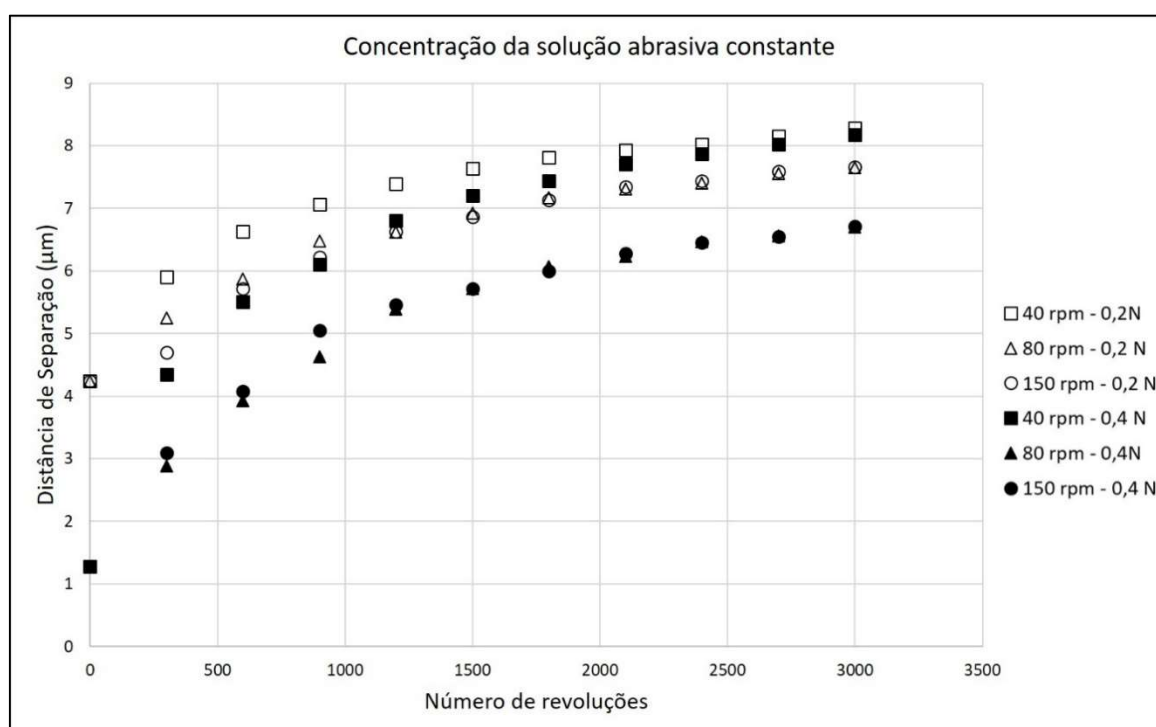


Figura 61 - Distância de separação em função do número de rotações para ensaios variando a velocidade mantendo a concentração da solução abrasiva fixa.

A maior distância de separação, em 40 rpm, permite que abrasivos maiores participem do desgaste, além de ter menor influência do filme hidrodinâmico, mostrado na Figura 57, os coeficientes de desgaste aumentam.

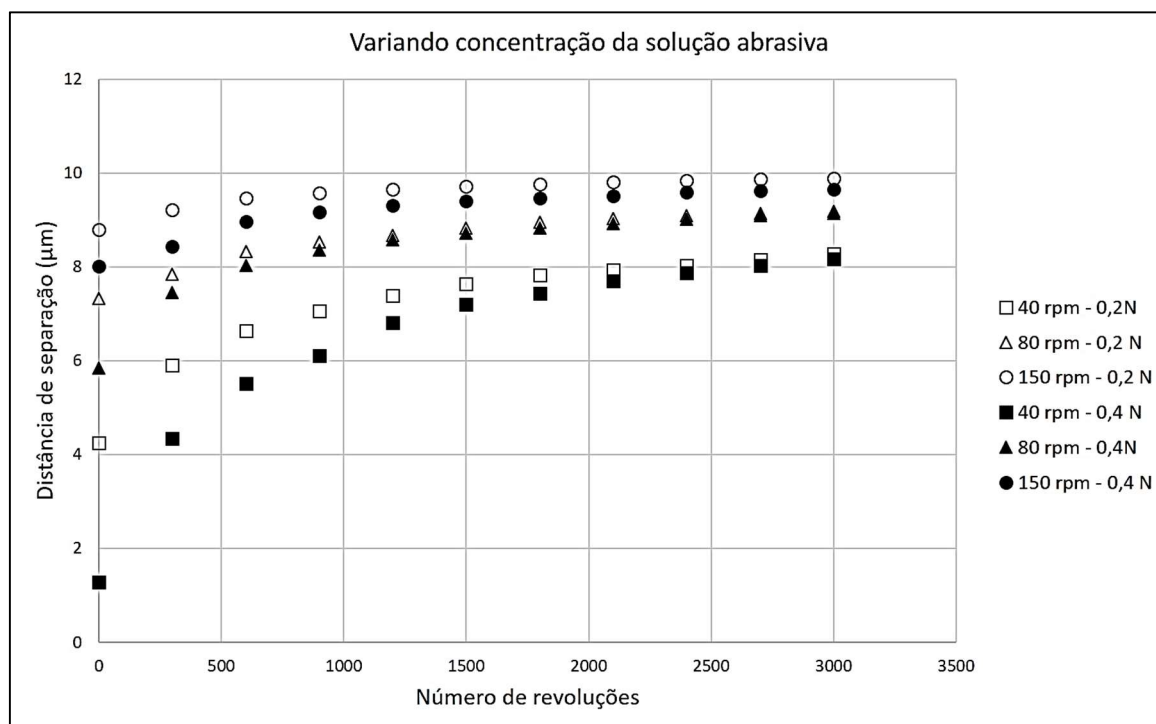


Figura 62 - Distância de separação em função do número de rotações para ensaios variando a velocidade com concentração da solução abrasiva variável.

Em oposição, ao construir-se o gráfico da distância de separação pelo número de rotações do ensaio, Figura 62, variando a concentração de abrasivos, a distância de separação aumenta com o aumento da velocidade e da concentração, sendo a fração volumétrica uma variável na Equação 15.

4.4 MICROMECHANISMOS DE DESGASTE

Devido à diferença da distribuição de tamanho das partículas, foram encontrados neste trabalho, riscos causados por partículas maiores e rolamento entre os riscos causado por partículas menores, como já havia sido observado por Imbeni *et al.* (2003) e, também, em outros trabalhos mais recentes (GAVA *et al.*, 2013, GOMEZ *et al.*,

2015). Isso se verifica para as condições onde a diferença do tamanho de partícula é percebido durante o ensaio, assim, a exceção se faz para o caso de borracha poliuretano.

4.4.1 Esfera de aço martensítico AISI 52100

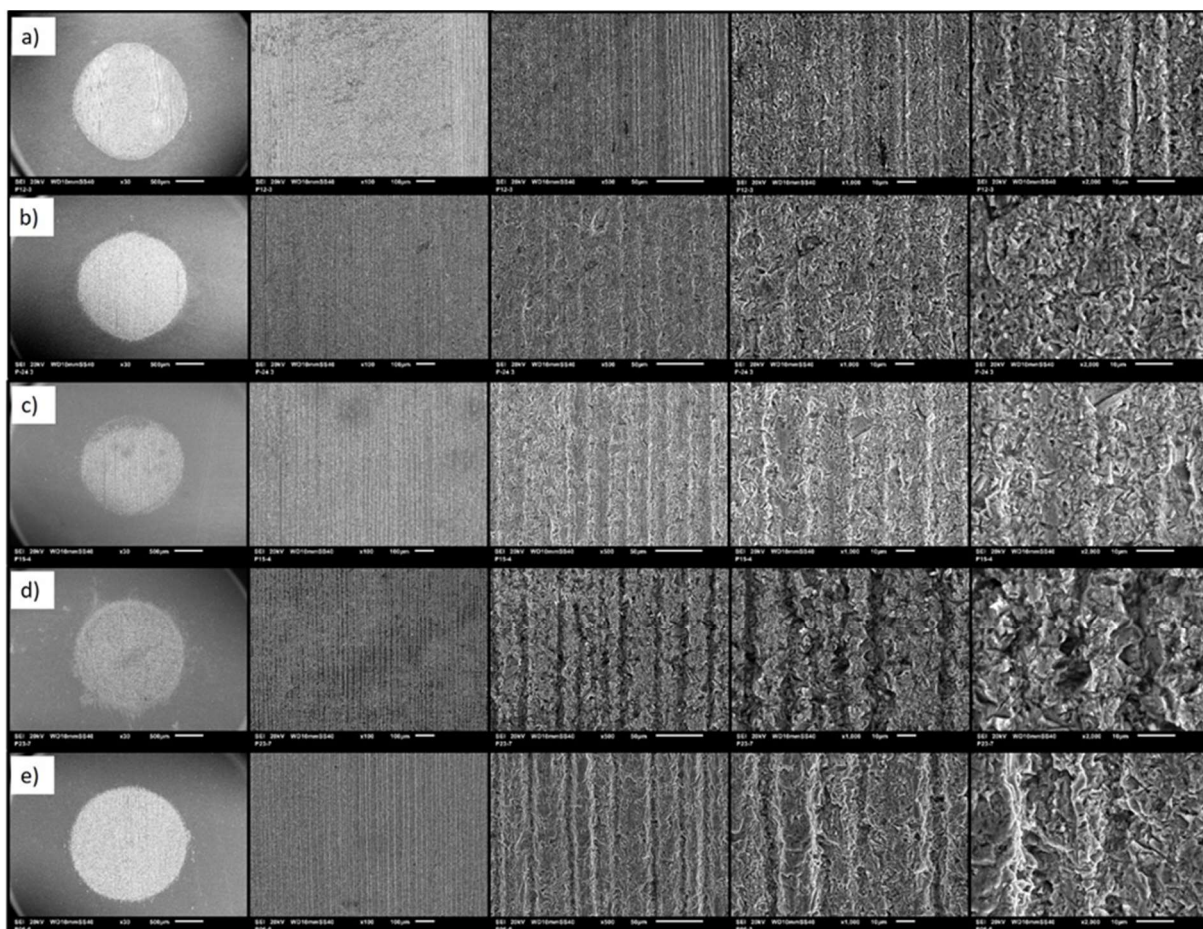


Figura 63 – Micrografias obtidas pelo MEV mostrando os micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 20G, c) 50G, d) 80G e e) 100G com aumentos sequenciais de 30, 100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,2 N com esfera de aço martensítico 52100.

Pela Figura 63, utilizando esfera de aço martensítico 52100, com o aumento percentual do abrasivo de maior tamanho (100G), o movimento de deslizamento das partículas duras foi favorecido, para as duas cargas. Em 0,4 N, a utilização do abrasivo 100G proporcionou uma maior penetração nas amostras, resultado de um aumento na carga suportado pelas partículas, proporcionando o aparecimento de riscos mais definidos e largos, Figura 64.

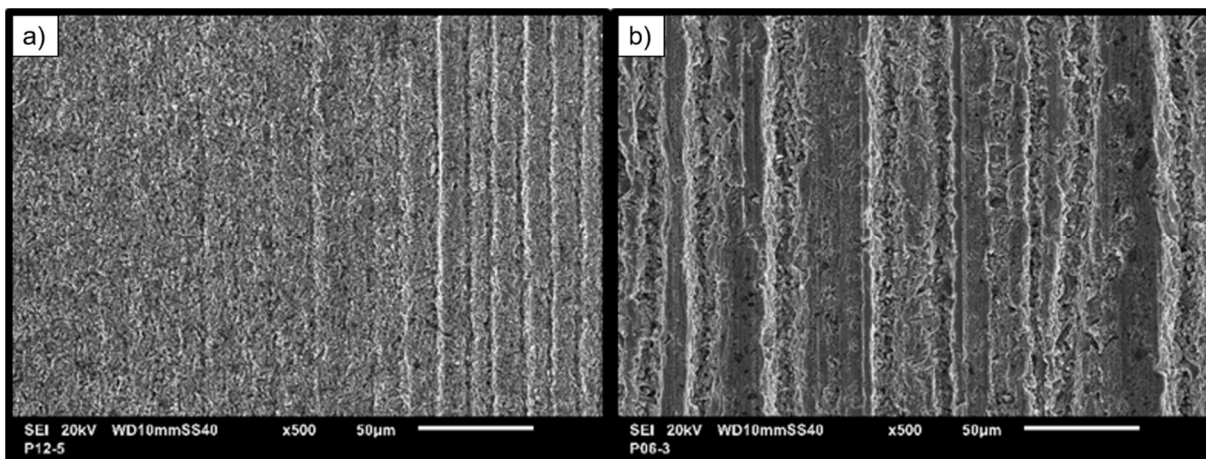


Figura 64 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G e b) 100G, com carga de 0,4N.

4.4.2 Esfera de aço inoxidável austenítico AISI 304

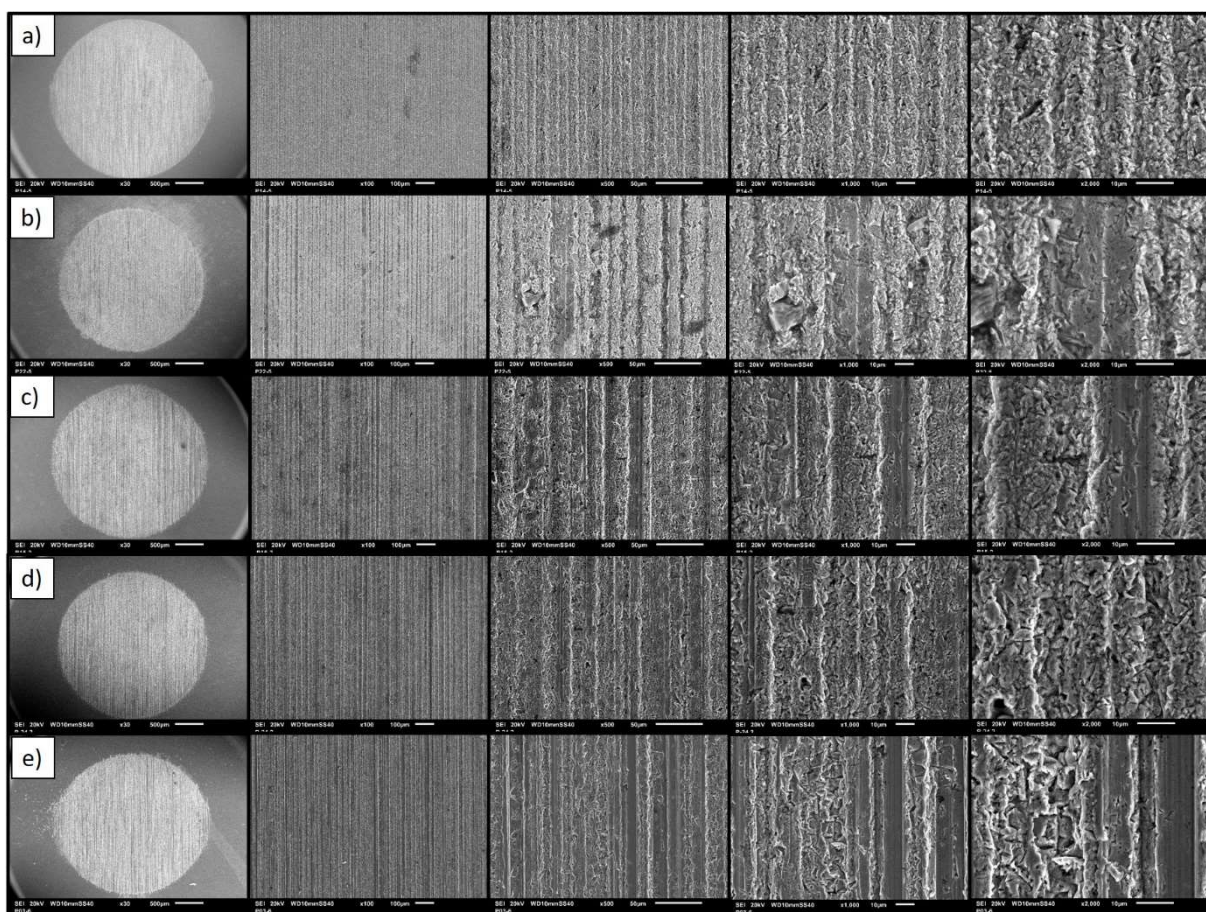


Figura 65 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 20G, c) 50G, d) 80G e e) 100G com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,4N com esfera de aço inoxidável austenítico 304.

Ao utilizar a esfera de aço inoxidável AISI 304, os micromecanismos de desgaste são mostrados na Figura 65. Devido à proximidade de dureza da amostra e do contra corpo, o aumento da carga e da fração mássica do abrasivo de maior tamanho (100G) resultou em um aumento da carga por partícula, aumentando-se, também, a profundidade de indentação do abrasivo na esfera e tornando os riscos mais evidentes, Figura 66.

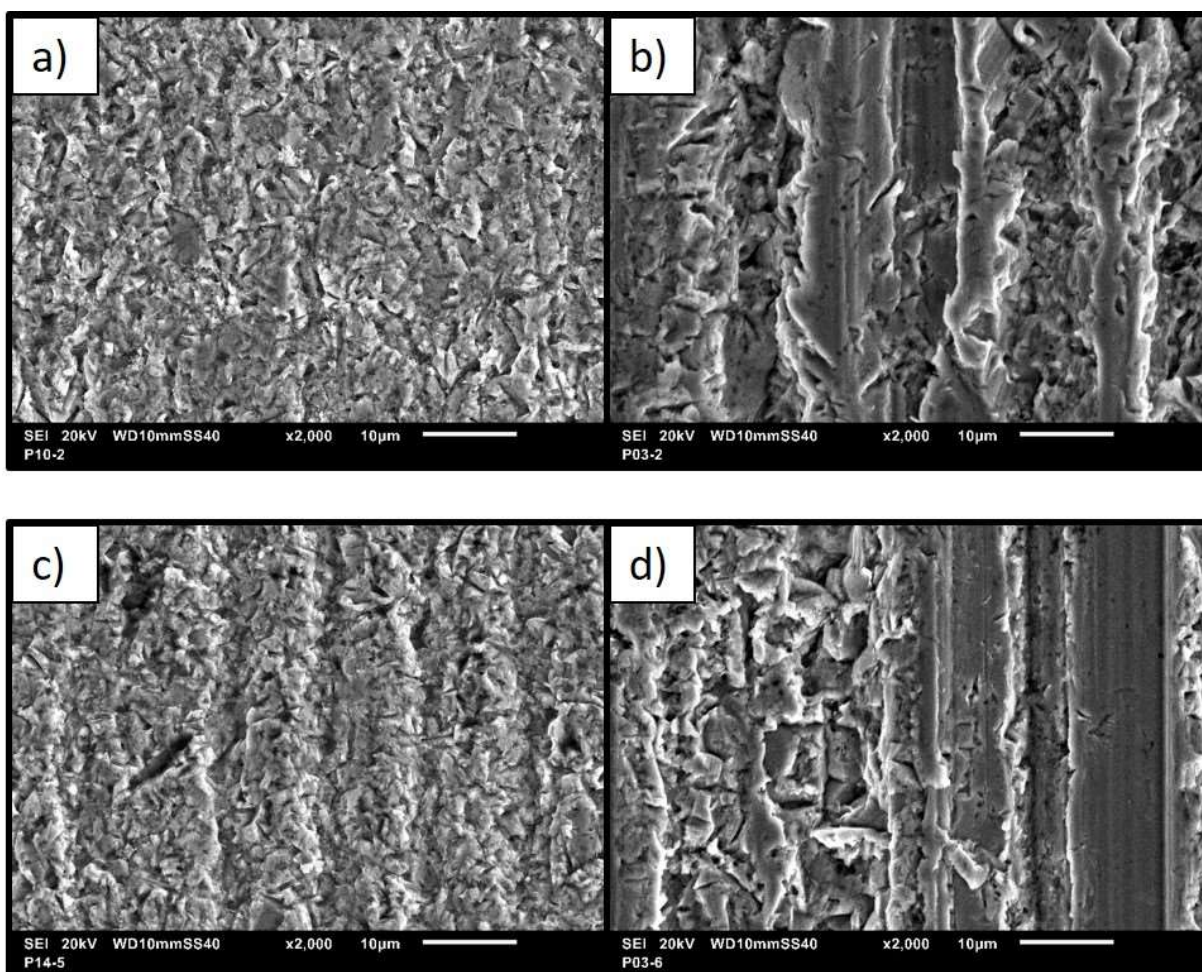


Figura 66 - Imagens de MEV, elétrons secundários, dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 100G, com carga de 0,2N e c) 0G, d) 100G, com carga de 0,4N, aumentos de 2000x, utilizando esfera de aço inoxidável austenítico 304.

4.4.3 Esfera de zircônia-alumina

Para contra corpos com elevada dureza, de um modo geral, o mecanismo de rolamento das partículas é favorecido, pois os abrasivos encontram dificuldade em engastar na esfera (TREZONA *et. al.*, 1999). Mas, em baixas frações volumétricas de abrasivo grande (20G), a carga por partícula é maior, resultando em uma maior profundidade de penetração na amostra, gerando riscos nas calotas, Figura 67 – a e Figura 68 - a . A medida que a fração de abrasivos grandes cresce no contato, aumenta-se, também, a tendência de rolamento das partículas, diminuindo os riscos aparentes Figura 67 – d e Figura 68 – d.

O comportamento da partícula na região de desgaste foi semelhante para as duas cargas utilizadas.

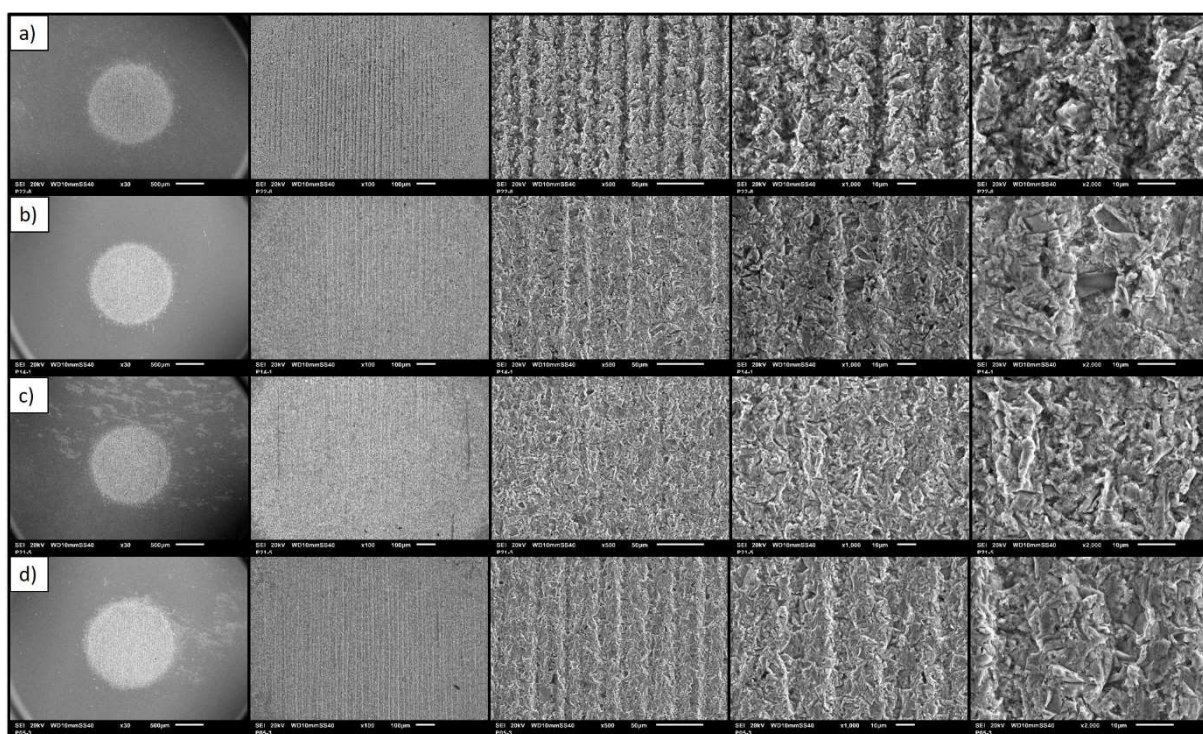


Figura 67 – Micrografias via MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 20G, b) 50G, c) 80G e d) 100G. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,2N com esfera de zircônia-alumina.

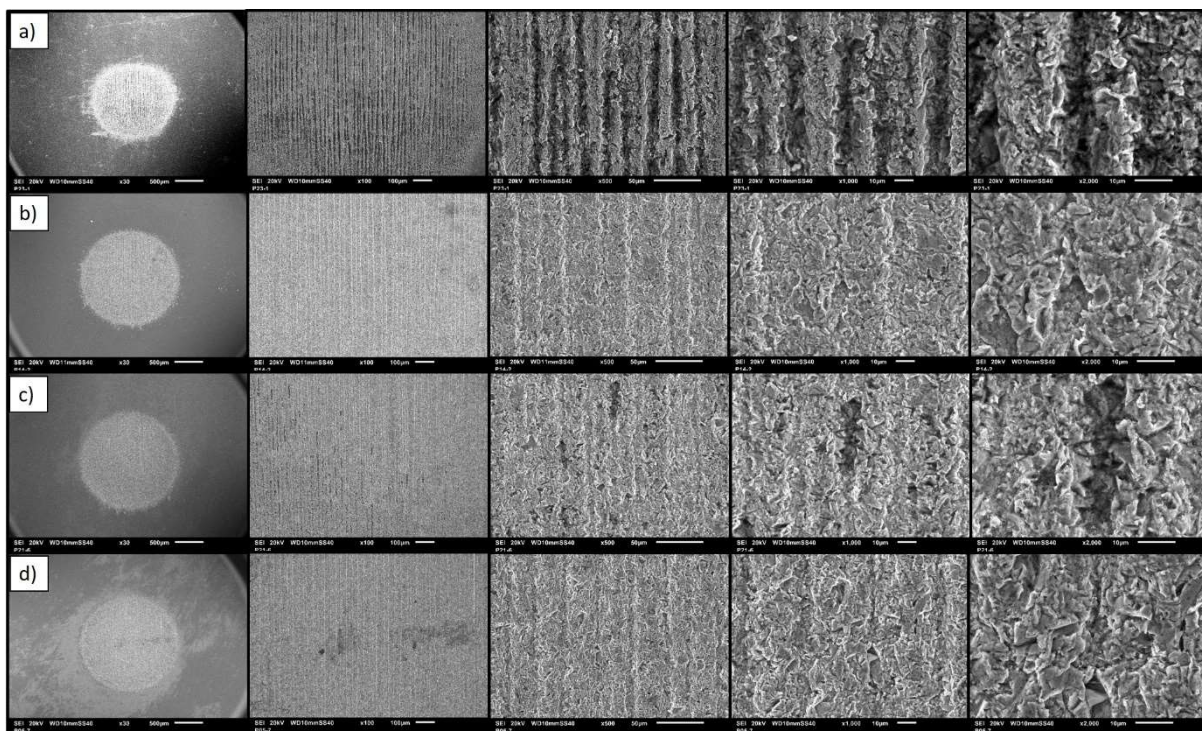


Figura 68 – Micrografias via MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 20G, b) 50G, c) 80G e d) 100G. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,4N com esfera de zircônia-alumina.

Na condição de 80G, para 0,2 N, aparenta, Figura 67 – c, um aumento do mecanismo de múltiplas indentações e, no gráfico do desgaste, Figura 38, observa-se uma pequena redução do coeficiente.

4.4.4 Esfera de borracha poliuretana

Ao utilizar esfera de borracha poliuretano, foram encontrados apenas riscos nas calotas, Figura 69, corroborando a hipótese de que, com este contra corpo, a diferença do tamanho das partículas abrasivas não é relevante, sendo a única combinação de amostra e contra corpo que não apresentou microrrolamento.

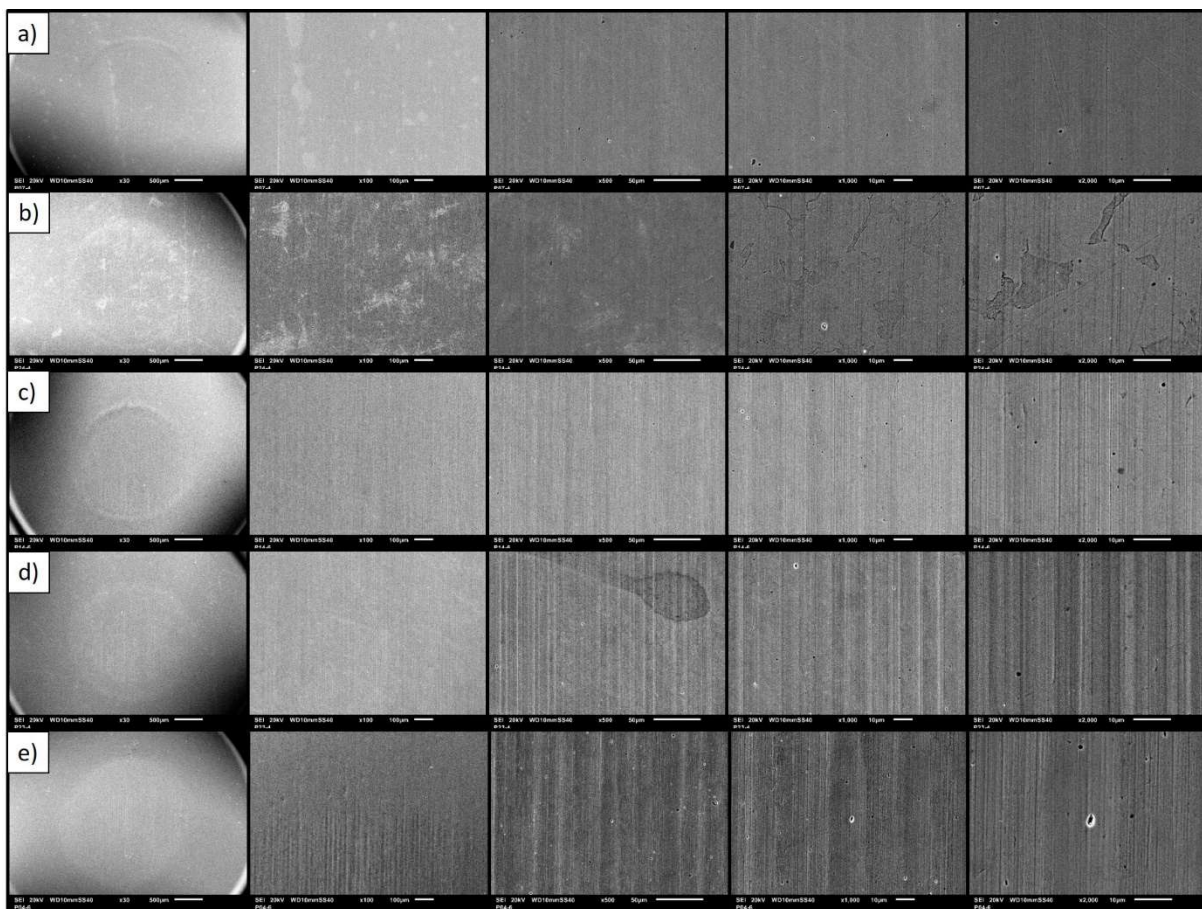


Figura 69 - Imagens de MEV, elétrons secundários, dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 0G, b) 20G, c) 50G, d) 80G e e) 100G. Com aumentos sequenciais de 30,100, 500, 1000 e 2000x, para carga de 0,4N com esfera de borracha poliuretano.

4.4.5 Variação da velocidade

Para ensaios variando a velocidade, os micromecanismos são predominantemente constituídos de riscos, havendo, em todas as condições, algum microrrolamento inter-riscos, Figura 70 e Figura 71.

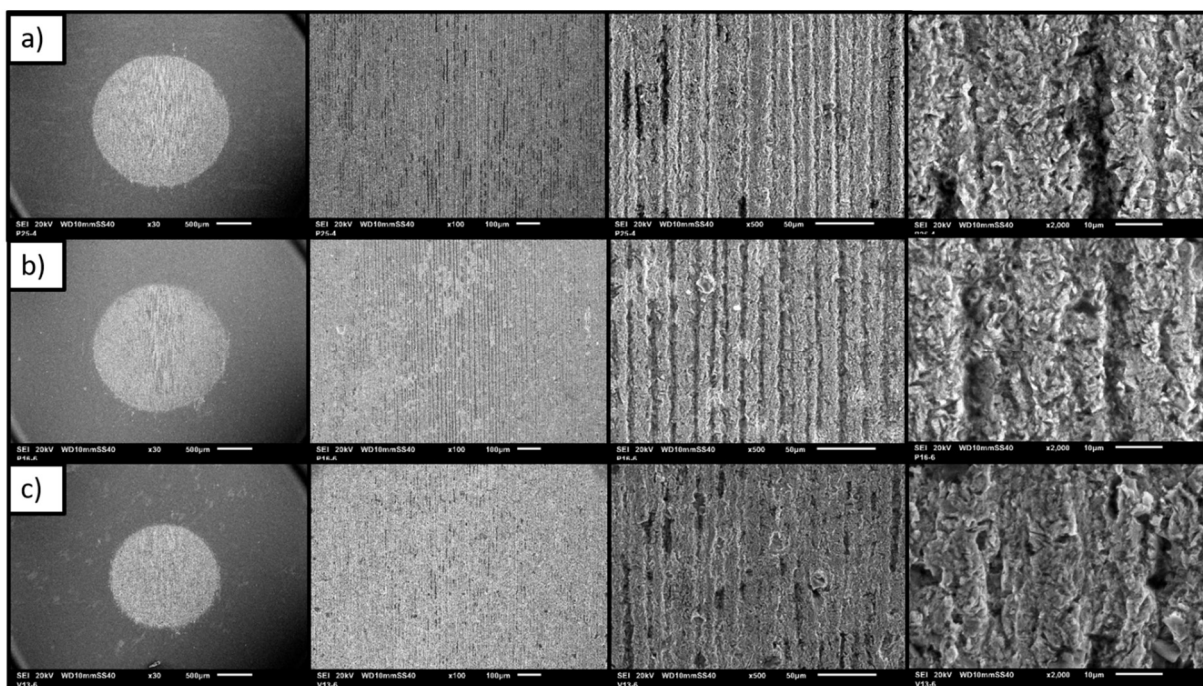


Figura 70 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 40 rpm, b) 80 rpm e c) 150 rpm. Com aumentos sequenciais de 30, 100, 500 e 2000x, para carga de 0,2N com concentração da solução fixa.

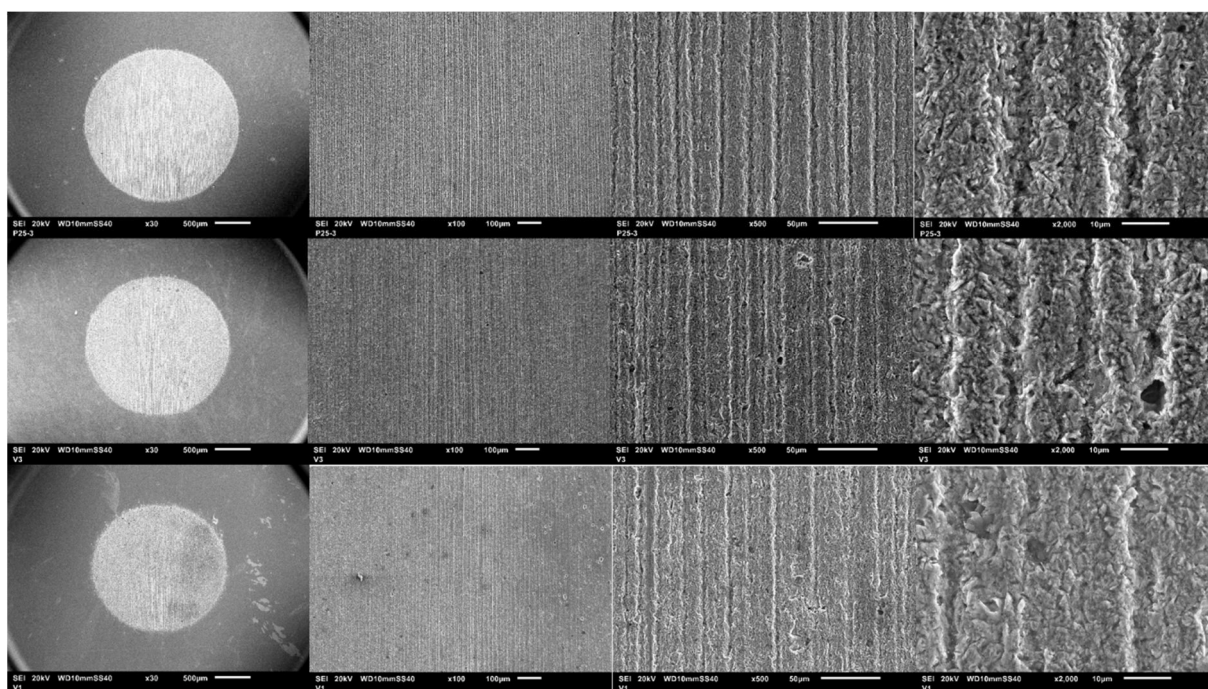


Figura 71 - Imagens de MEV dos micromecanismos de desgaste para as condições de a) 40 rpm, b) 80 rpm e c) 150 rpm. Com aumentos sequenciais de 30, 100, 500 e 2000x, para carga de 0,4N com concentração da solução variada.

4.5 SEVERIDADE DE CONTATO

As Figuras 72 a 76 mostram os resultados da evolução da severidade de contato para os ensaios realizados com a carga de 0,2 N, para as diferentes frações mássicas (0G, 50G e 100G) (20G e 80G em APÊNDICE). O ponto inicial foi calculado por meio das equações de Adachi e Hutchings (2003) utilizando a área da cratera de contato inicial (A_0), e a evolução da severidade de contato é dada pelas áreas geradas durante o ensaio de microabrasão (GOMEZ *et al.*, 2015).

Pelo mapa de severidade de desgaste, pode-se confirmar a diminuição da severidade com a evolução do ensaio, como já havia sido observado por Cozza *et al.* (2007) e Gomez *et al.* (2015), com a tendência de sair do domínio de riscamento para rolamento das partículas. Estes resultados estão em consonância com os micromecanismos encontrados nos ensaios, isto é, microrriscamento com indentações múltiplas entre os riscos.

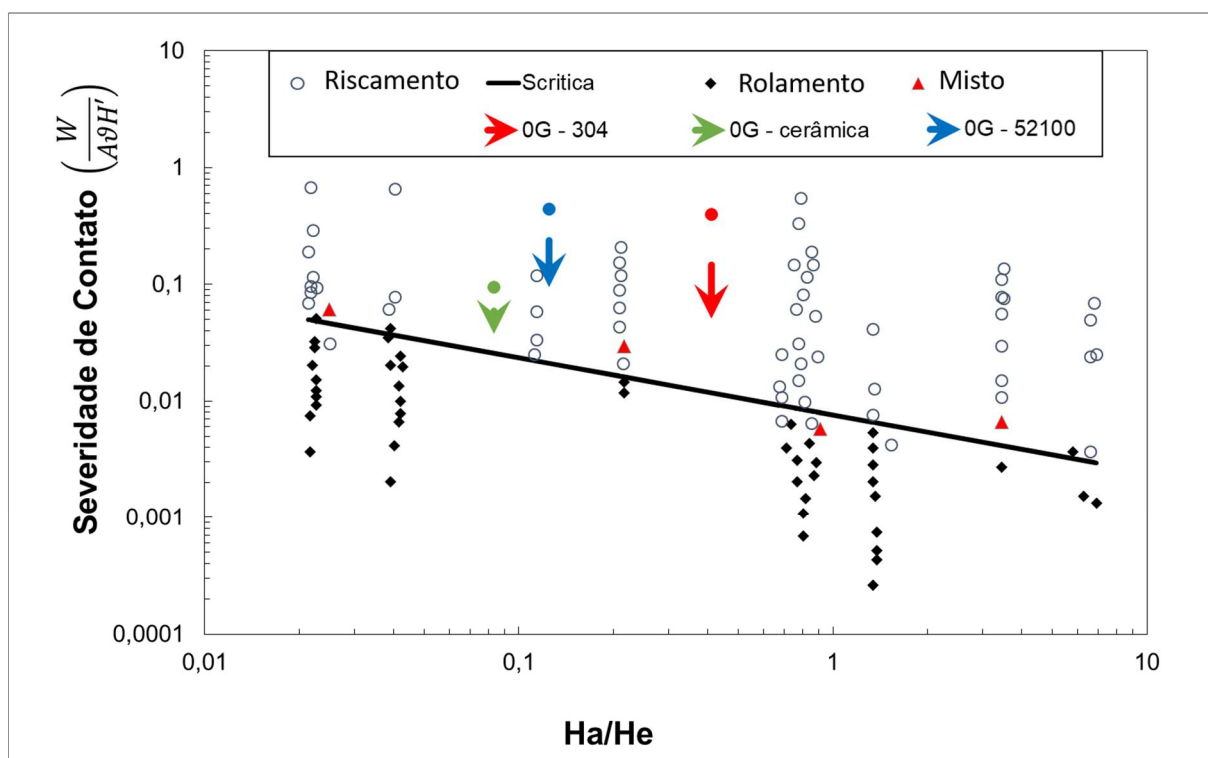


Figura 72 - Análise da evolução da severidade de contato para 0G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina (cerâmica), segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).

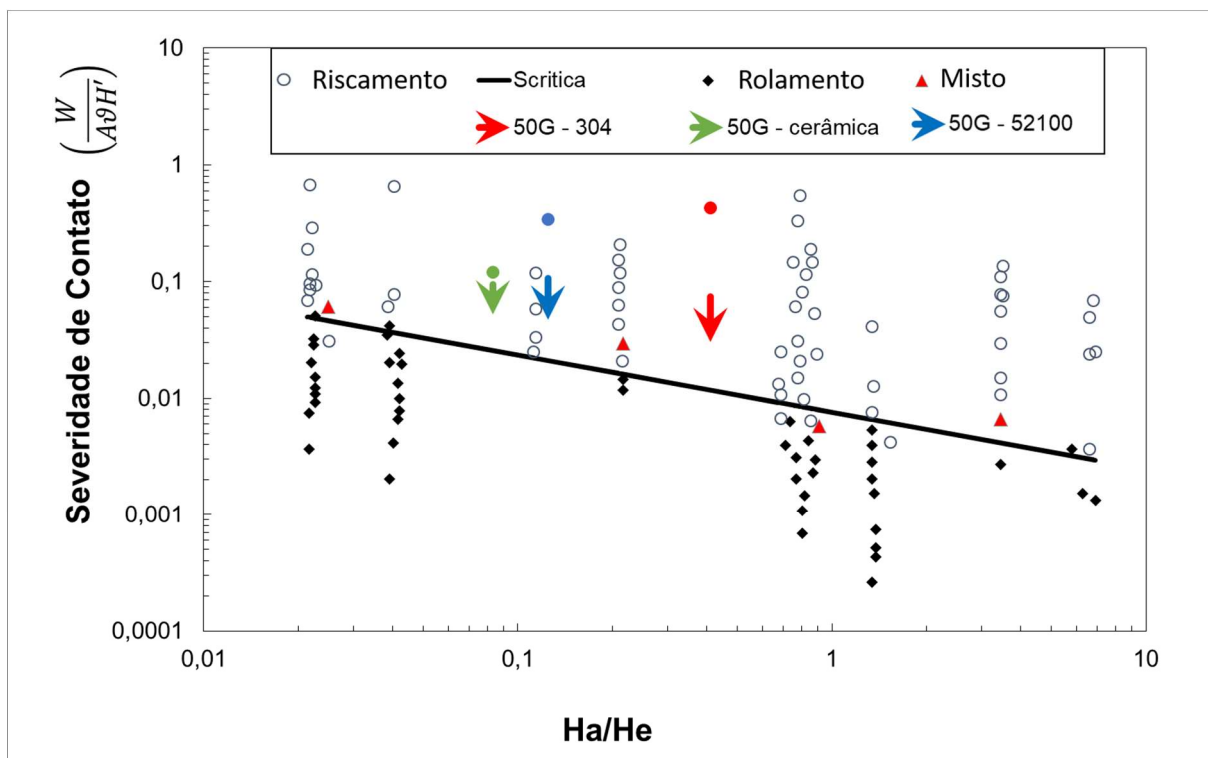


Figura 73 - Análise da evolução da severidade de contato para 50G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina (cerâmica), segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).

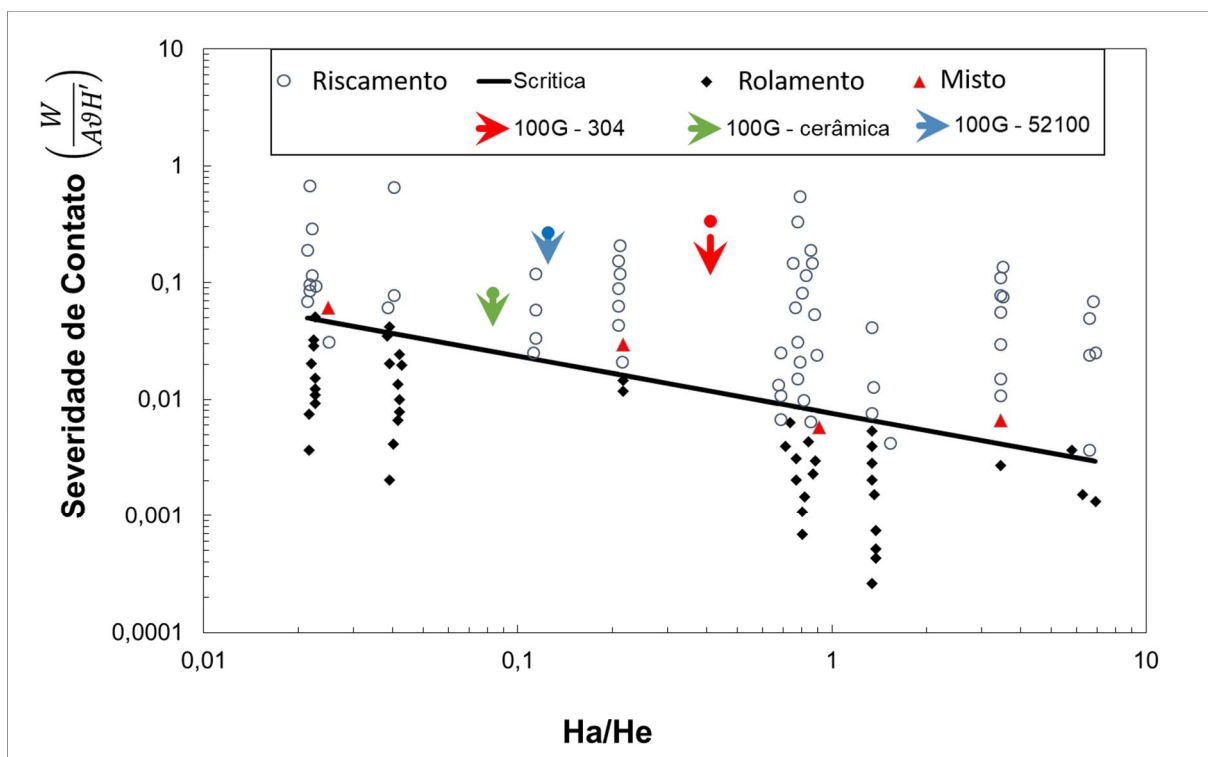


Figura 74 - Análise da evolução da severidade de contato para 100G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina (cerâmica), segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).

4.5.1 Variando a velocidade de rotação

Para ensaios variando a velocidade, também, foi possível observar a diminuição da severidade com a evolução do ensaio, tendendo a aumentar o rolamento das partículas.

A diferença na variação da severidade com a diminuição da velocidade pode ser observada na Figura 75, quando são utilizadas as áreas medidas nos ensaios. A diferença não é observada com o cálculo da área teórica, pois, o equacionamento, como já fora mostrado, não considera a velocidade.

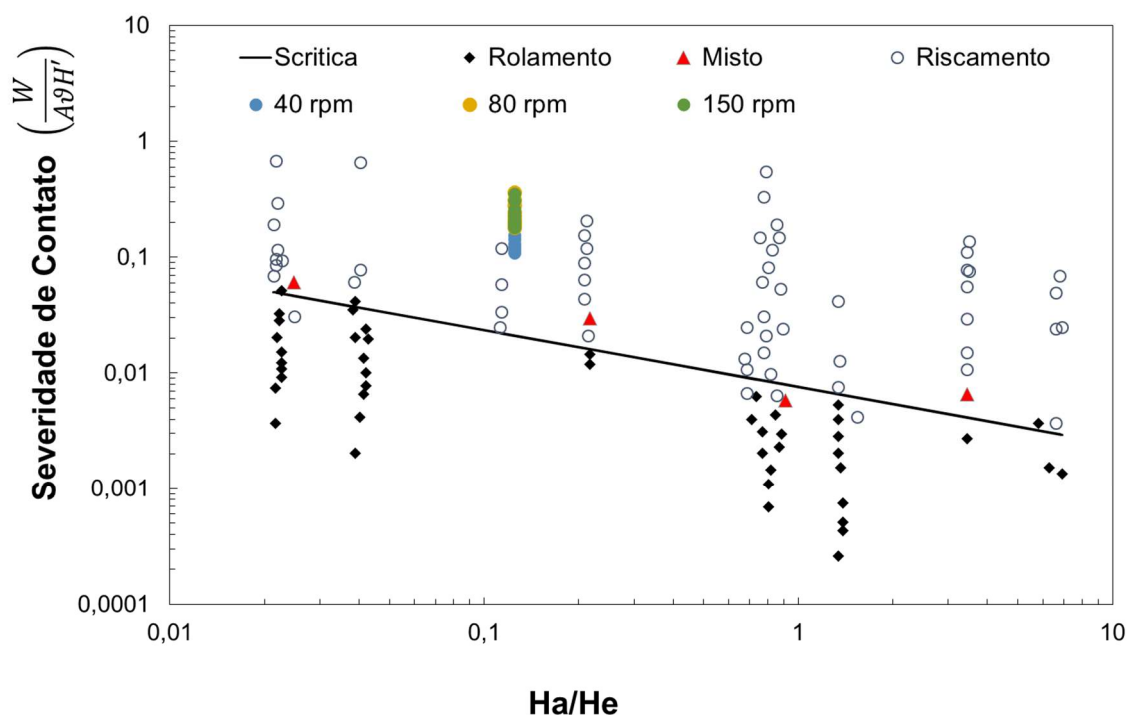


Figura 75 - Análise da evolução da severidade de contato para ensaios variando a velocidade e com concentração da solução abrasiva constante, com carga normal de 0,4N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).

Ao variar a fração volumétrica, o aumento da velocidade gera uma diminuição na severidade de contato, o que, ao se observar os micromecanismos, parece estar de acordo com o mapa de severidade, Figura 71.

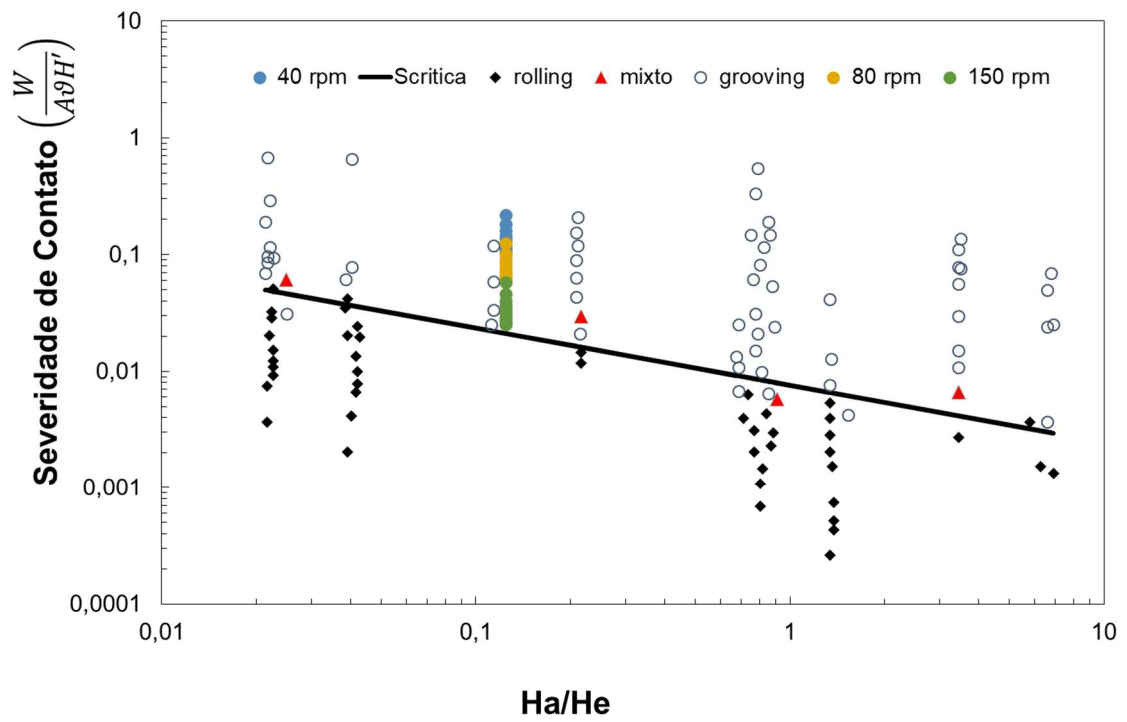


Figura 76 - Análise da evolução da severidade de contato para ensaios variando a velocidade e a concentração da solução abrasiva, com carga normal de 0,2N, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).

5 CONCLUSÕES

Ao variar a natureza dos contra corpos esféricos, as distribuições dos tamanhos das partículas abrasivas influenciam de forma diferente nos coeficientes de desgaste.

Ensaio realizado com a esfera de aço AISI 52100 obtiveram menores valores dos coeficientes de desgaste em 50G, como já havia sido observado na literatura. Utilizando esferas mais macias, como aço inox AISI 304, os menores coeficientes foram gerados em 20G. Já para os ensaios utilizando esferas de borracha poliuretano, altamente elástica, o coeficiente de desgaste foi praticamente independente da distribuição granulométrica e ao elevar a dureza, empregando esferas de zircônia-alumina, os coeficientes de desgaste mostraram-se proporcionais ao aumento da fração mássica de abrasivo com maior tamanho médio (100G).

No geral, a utilização de esferas mais macias resultou nos maiores coeficientes de desgaste.

O modelo apresentado por Gomez *et. al.* (2015), para a fração de abrasivos ativos no contato inicial, não se aplica a todas as combinações de materiais. Para as esferas de aço, o modelo foi melhor adaptado baseado na teoria de Greenwood e Williamson (1966).

O aumento da velocidade de rotação do contra corpo, independente da fração volumétrica de abrasivos, culminou em uma diminuição do coeficiente de desgaste e em um aumento na quantidade de abrasivos impregnados na superfície da calota de desgaste.

A espessura do filme hidrodinâmico, gerado pela lama abrasiva, aumenta exponencialmente com o incremento da velocidade e pode agir como um lubrificante no contato reduzindo o efeito da rugosidade superficial da esfera.

Para os ensaios variando a natureza dos contra corpos com diferentes distribuições granulométrica e para os ensaios aumentando-se a velocidade angular, de forma geral, as superfícies de desgaste apresentaram riscamento com microrrolamento entre os riscos. A exceção da esfera de borracha poliuretana, que exibiu apenas riscos.

Os micromecanismos observados estão em consonância com a diminuição da severidade durante o ensaio, observados no mapa de severidade.

O mapa de severidade e os equacionamentos de Adachi e Hutchings (2003) apresentam limitações quanto a velocidade de rotação da esfera no ensaio e a morfologia das partículas abrasivas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entender a real fração volumétrica de partículas ativas no contato durante o ensaio de microabrasão, por meio de simulação numérica, para diferentes combinações de amostras e esferas.

Estudar a influência da morfologia das partículas e da velocidade de rotação da esfera na severidade de contato, propondo melhorias ao modelo de Adachi e Hutchings (2003).

Investigar como ocorre a possível lubrificação do contra corpo esférico com a variação da velocidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I.M. Wear mode-mapping for the micro-scale abrasion test. **Wear** p. 23-29, 2003.

ALLSOPP, D. N. Abrasive wear of bulk materials and hard coatings, **Ph. D Thesis**, University Cambridge, Cambridge, United Kingdom, 1999.

ALLSOPP, D.N.; TREZONA, R.I.; HUTCHINGS, I.M. The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test. **Tribology Letters**, p. 259-264, 1998.

ASTM G40 – 17- **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**.

BELLO, J.O.; WOOD, R.J.K. Grooving micro-abrasion of polyamide 11 coated carbon steel tubulars for downhole application, **Wear**, v. 255, p. 1157–1167, 2003.

BETHKE, R.; SCHIFFMANN, K. Ball cratering wear test: review of the state of the art, **Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik**, Braunschweig, 2001.

COSTA, H.L.; ARDILA, M.A.N.; LABIAPARI, W.S.; SILVA, W.M.; DE MELLO J.D.B. Effect of surface topography on the dynamics of the abrasive particles during micro-abrasion. **Wear**, V. 324-325, 129–139, 2015.

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**, p.111-116, 2007.

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**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COZZA, R.Z. Third abrasive wear mode: is it possible? **Journal of Materials Research and Technology**, p. 191-193, 2014.

DE MELLO, J. D. B.; LABIAPARI, W. S.; ARDILA, M. A. N.; OLIVEIRA, S. A. G.; COSTA, H. L. Strain Hardening: Can it Affect Abrasion Resistance? **Tribol Lett**, 2017.

DOWSON, D. **History of Tribology**. Second edition, 1998.

DWAN, J. D. Production of diamond impregnated cutting tools. **Powder Metallurgy**, v. 41, n. 2, pp. 84-86, 1998.

EL MANSORI, M.; MEZGHANI, S.; ZAHOUANI, H.; DIVO, F. Biomimetic touch perception of edge finish of ophthalmic lens. **Wear**, 2013.

FERREIRA, A. O., BRANDÃO, M. **Guia Prático da Farmácia Magistral**. 4. ed. São Paulo: Pharmabooks, V. I e II, 2008.

GANT, A.J.; GEE, M.G. A review of micro-scale abrasion testing, **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2011.

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**, v. 76, p. 130-136, 2013.

GEE, M.G.; GANT, A.; HUTCHINGS, I.M.; BETHKE, R.; SCHIFFMAN, K.; VAN ACKER, K.; POULAT, S.; GACHONF, Y.; VON STEBUT, J. progress towards standardisation of ball cratering. **Wear**, p. 1-13, 2003.

GOMEZ, V.A.O.; DE MACÊDO, M.C.S.; SOUZA, R.M.; SCANDIAN, C. Effect of abrasive particle size distribution on the wear rate and wear mode in micro-scale abrasive wear tests. **Wear** (Lausanne), v. 328-329, p. 563-568, 2015.

GREENWOOD, J.A.; WILLIAMSON, J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. **Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Sci**, v. 295(1442), p. 300–319, 1966.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992.

IMBENI, V.; MARTINI, C.; PRANDSTRALLER, D.; POLI, G.; TREPANIER, C.; DUERIG, T.W. Preliminary study of micro-scale abrasive wear of a NiTi shape memory alloy. **Wear**, p. 1299–1306, 2003.

JOST, H. P. **Lubrication (tribology) education and research**. Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966.

JOST, H. P. Tribology-origin and future. **Wear**, v.136, pp.1-17, 1990.

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**, p. 75,84, 1991.

KELLY, D. A.; HUTCHINGS, I. M. A new method for measurement of particle abrasivity. **Wear**, p. 76-80, 2001.

LEITE, M. V.; FIGUEROA, C. A.; BAUMVOL, I. J. R.; BASSO, R. L. O.; MEI, P. R.; SINATORA, A. Desgaste e atrito da camada nitretada do aço ABNT H13 nitretado por plasma pulsado. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 67-72. 2009.

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**, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 2008.

MARQUES, F.; DA SILVA, W.M.; PARDAL, J.M.; TAVARES, S.S.M.; SCANDIAN, C. Influence of heat treatments on micro-abrasion wear resistance of a superduplex stainless steel, **Wear**, p. 1288-1294, 2011.

MISRA, A.; FINNIE, I. A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester. **Wear**, v. 60, p. 111 – 121, 1980.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L.A.; RUSSELL, P.G. A study of abrasive wear under three-body conditions. **Wear**, v.4, p. 345 -355, 1961.

RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS, I.M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. **Surface and Coating Technology**, p. 231-239, 1996.

SHIPWAY, P.H. The role of test conditions on the microabrasive wear behaviour of soda-lime glass, **Wear**, p. 191–199, 1999.

SINATORA, A. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. **Prova de Erudição**, São Paulo, 2005.

STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, J. M. Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles. **Tribology International**, 2006.

SUNDFELD R.H. et al. Remoção de manchas do esmalte dental pela técnica da microablação. **FOA – UNESP**, Araçatuba – SP, 2013,

SZUDER, A. Contribution Experimentale a L ´ Etude du Rodage Plan. **University Claude Bernard**, Lyon, 1977. (in French)

THOMPSON, V. The determination of composition depth profiles using spherical erosion and scanning auger electron spectroscopy. **Surface Technology**, v.8, p. 421 – 428, 1979.

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**, p. 205-214, 1999.

WILLIAMS, J.A.; HYNICICA, A.M. Mechanism of abrasive wear in lubricated contacts. **Wear**, p. 57-74, 1992.

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

8 APÊNDICE

Mapa da severidade de contato para ensaios utilizando as misturas de 20G e 80G, Figuras A1 e A2, respectivamente.

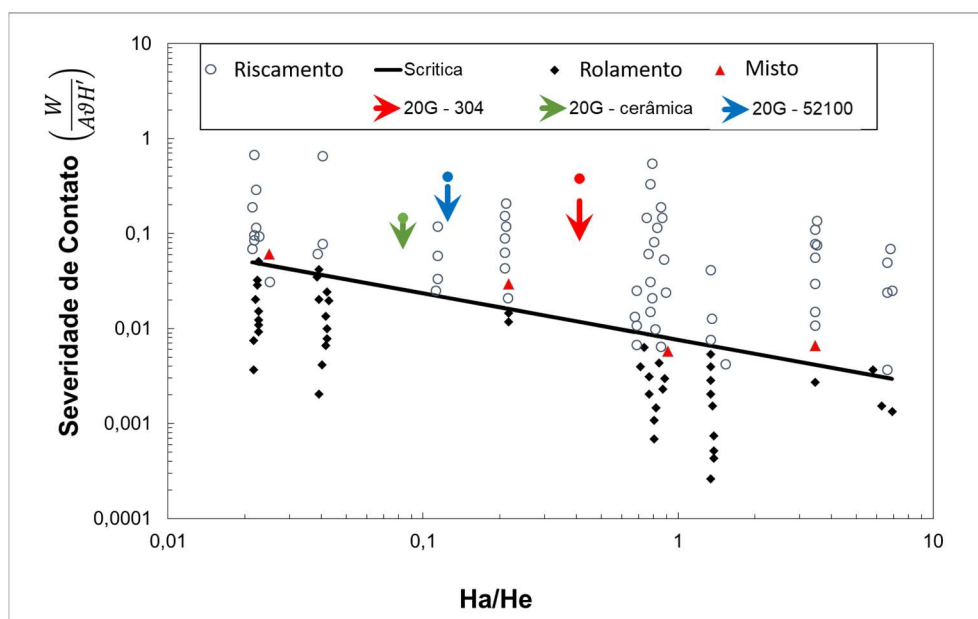


Figura A1 - Análise da evolução da severidade de contato para 20G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).

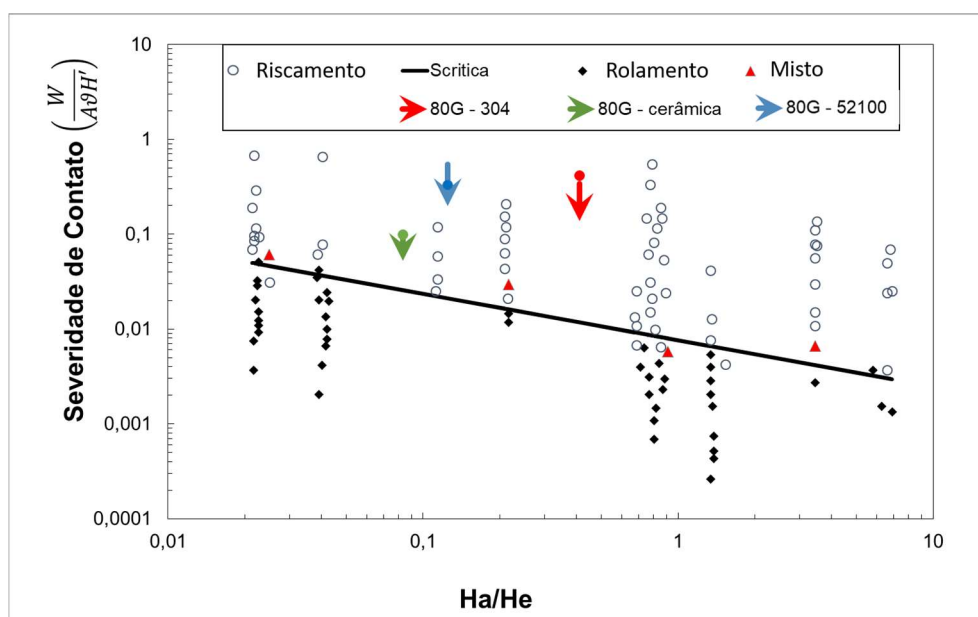


Figura A2 - Análise da evolução da severidade de contato para 80G, e com carga normal de 0,2 N, utilizando esferas de aço AISI 52100, aço inox AISI 304 e zircônia-alumina, segundo o mapa de desgaste proposto por Adachi e Hutchings (2003).